

# 双面叠合剪力墙的阵列超声成像检测

张 健<sup>1</sup>,王奉飞<sup>2</sup>,潘永东<sup>1</sup>,顾 盛<sup>3</sup>

(1. 同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092;2. 上海同济工程项目管理咨询有限公司, 上海 200092;  
3. 昆山市建设工程质量检测中心, 昆山 215337)

**摘 要:**采用阵列超声成像技术对双面叠合剪力墙结构进行无损检测,发现检测成像结果的目标对象深度与实际深度存在较大误差。通过有限元仿真分析误差成因,发现检测深度误差是由后浇混凝土与两侧预制混凝土内部声速间的差异造成的,且可采用射线跟踪技术来改善检测结果。浇筑了强度不同的双层混凝土试块进行阵列超声成像检测,进一步确认深度检测误差和成因,发现原检测误差达 10% 以上;采用射线跟踪技术来改善成像结果,其误差小于 3%。上述结果对双面叠合剪力墙内部的阵列超声成像检测具有指导意义,可以根据具体检测精度需求进行选择,对于高精度检测项目,可采用射线跟踪技术对采集到的数据进行后处理,以减小深度检测误差,提高检测精度。

**关键词:**双面叠合剪力墙;阵列超声成像;无损检测;射线跟踪

**中图分类号:** TG115.28      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-6656(2023)12-0063-05

## Array ultrasonic imaging detection for double-sided superimposed shear wall

ZHANG Jian<sup>1</sup>, WANG Fengfei<sup>2</sup>, PAN Yongdong<sup>1</sup>, GU Sheng<sup>3</sup>

(1. School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China;  
2. Shanghai Tongji Engineering Project Management Consulting Co., Ltd., Shanghai 200092, China;  
3. Kunshan Construction Project Quality Testing Center, Kunshan 215337, China)

**Abstract:**Nondestructive testing of double-sided superimposed shear wall structures was carried out by array ultrasonic imaging technology. It was found that there existed large errors between the depth of targeted object and the actual depth. The causes of the error were analyzed by theory and finite element simulation. The results showed that the error was caused by the difference between the strength of the postcast concrete and that of the precast concrete on both sides, and the ray tracking technology can be used to improve the detection results. The double-layer concrete test blocks with different strengths were poured, and array ultrasonic imaging was carried out to further confirm the detection errors and causes. It was found that the detection errors were more than 10%. Ray-tracking technology was used to improve imaging results, with an error of less than 3%. The above results had guiding significance for array ultrasonic imaging detection in double-sided superimposed shear walls.

**Key words:**double-sided laminated shear wall; array ultrasonic imaging; nondestructive testing; ray tracing

双面叠合剪力墙的建造过程为:由桁架钢筋将两侧的预制混凝土墙板联系在一起,通过在双面叠合剪力墙的空腔中后浇混凝土,然后插入连接钢筋

将上下层剪力墙连接到一起。双面叠合剪力墙具有成本低、质量优、无污染、施工方便等优点,被广泛应用于各种建筑工程项目中。但双面叠合剪力墙结构可能会出现后浇混凝土浇筑不密实、内部存在孔洞、裂缝等缺陷和损伤的问题,因此需要找到一种能够准确评估双面叠合剪力墙内部损伤情况的方法。

赵雪磊<sup>[1]</sup>采用 X 射线检测法对双面叠合剪力墙空腔内后浇混凝土密实度进行有效检测,检测结

收稿日期:2023-04-14

作者简介:张 健(1997—),男,硕士研究生,主要从事超声无损检测的研究工作

通信作者:顾 盛,gushengksjc@163.com

果清晰可靠;刘承灵等<sup>[2]</sup>采用超声斜测法对后浇混凝土密实度进行检测,可以识别构件内明显缺陷,但检测结果容易受人为操作影响。何胜华等<sup>[3]</sup>分别采用超声透射法和相控阵超声成像法对双面叠合剪力墙内部缺陷进行检测,并通过钻芯取样验证检测结果,结果表明两种方法均可识别剪力墙内部缺陷。

笔者在使用阵列超声成像设备对双面叠合剪力墙进行损伤检测时,发现检测结果中目标对象深度与其实际深度存在较大误差。通过理论分析与有限元仿真对检测深度误差成因进行了分析,并进行试验验证,发现各混凝土层内部声速的差异会导致阵列超声成像结果中目标深度存在误差,且采用射线跟踪技术可有效改善成像结果,减小检测深度误差,结合两种技术进行检测对双面叠合剪力墙阵列超声成像检测效果的改善具有指导意义。

### 1 现场检测

对某工程楼体双面叠合剪力墙进行超声检测,单面预制混凝土墙板厚度为 50 mm,后浇层厚度为 100 mm,墙体总厚度为 200 mm,其结构如图 1 所示。检测设备为 A1040 MIRA 型超声断层成像扫描仪,其实物如图 2 所示,仪器带有 4×12 的换能器阵列,可激发横波信号,激发中心频率为 50 kHz,基于合成孔径的收发模式采集数据。

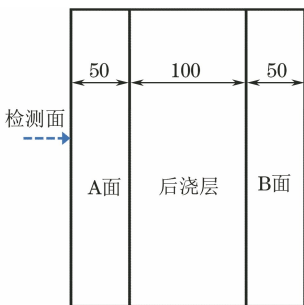


图 1 双面叠合剪力墙结构示意图



图 2 超声断层成像扫描仪实物

在现场选择一处混凝土平台进行检测,在待测区域均匀布点,对各测点下方混凝土进行检测,继而评估双面叠合剪力墙内部是否存在损伤并确定缺陷位置,部分检测结果如图 3 所示。由图 3 可见,测点

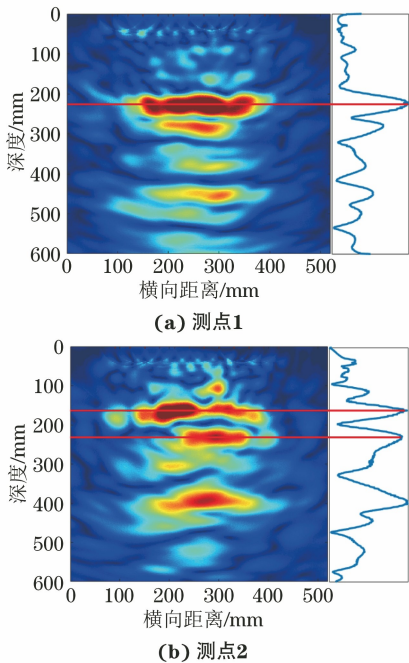


图 3 双面叠合剪力墙阵列超声成像结果

1,2 的成像结果中均可以观察到明显的界面反射信号,检测时取成像结果中反射信号幅值最大处为信号位置深度,图中以红色横线标识。根据测点 1 成像结果可知剪力墙厚度为 225 mm,绝对误差为 25 mm,相对误差为 12.5%。根据测点 2 成像结果可知剪力墙厚度为 231 mm,绝对误差为 31 mm,相对误差为 15.5%;B 面与后浇层分界面处存在缺陷信号,深度为 166 mm,绝对误差为 16 mm,相对误差为 10.7%。可见,双面叠合剪力墙的阵列超声成像结果中目标深度存在较大误差(大于 10%),对双面叠合剪力墙的损伤评估有较大影响。

### 2 误差成因

阵列超声成像原理为:计算每个像素点对应每种收发通道的声程,除以超声波在介质中的传播速度,得到像素点对应的传播时间,然后找到相对应的采样点,将所有通道对应的采样点幅值叠加,即为该像素点的像素值;计算成像范围内所有像素点的像素值,即可得到成像结果。双面叠合剪力墙后浇层混凝土强度通常与 A,B 层混凝土强度不同,且浇筑时间晚于 A,B 层混凝土,导致后浇层混凝土与 A,B 层混凝土的声阻抗存在差异,内部超声传播速度也存在差值,超声波信号传播到后浇层与 A,B 层分界面时会发生折射和反射效应,传播方向也会改变,双面叠合剪力墙超声折射路径如图 4 所示。因此若阵列超声成像过程中,使用了错误的声传播路程与后

浇层声速来计算声时,则会导致成像结果中信号深度出现误差。针对介质声速差异导致超声成像结果中目标深度出现误差的问题,SHLIVINSKI A 等<sup>[4]</sup>将射线跟踪技术与超声成像相结合,实现了对分层介质结构的超声成像。

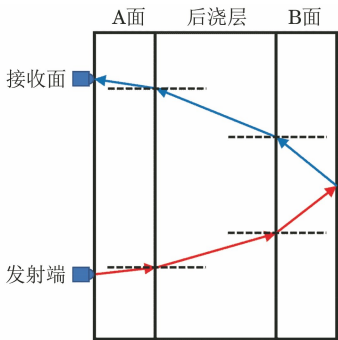


图 4 双面叠合剪力墙超声折射路径示意

在仿真软件 COMSOL Multiphysics 5.6 中进行有限元仿真分析,建立了如图 5 所示的双层混凝土仿真模型,其尺寸为 800 mm×500 mm(长×宽),上层混凝土强度为 C60,厚度为 100 mm,下层混凝土强度为 C25,厚度为 400 mm,在距检测面 300 mm 深度处设置直径为 50 mm 的圆形孔洞缺陷。混凝土材料参数如表 1 所示,经计算,C60 混

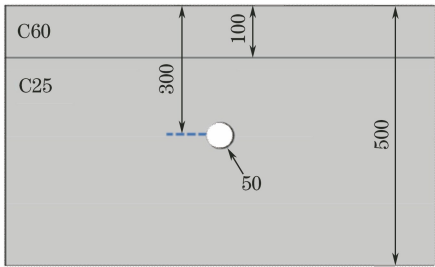


图 5 双层混凝土仿真模型

表 1 混凝土材料参数

材料	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\mu$	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
C60	36.00	0.20	2 300.00
C25	28.00	0.20	2 300.00

表 2 成像结果中缺陷与底面深度及对应误差

检测目标	实际深度/mm	阵列超声成像			射线跟踪		
		检测深度/mm	绝对误差/mm	相对误差/%	检测深度/mm	绝对误差/mm	相对误差/%
圆形缺陷	275	309	34	12.4	276	1	0.4
底面	500	569	69	13.8	502	2	0.4

3 试验验证

为观察混凝土层强度差异对阵列超声成像结果的影响并验证射线跟踪技术能否对检测成像结果进

土层中超声波理论声速为  $2\,554\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,C25 混凝土层中超声波理论声速为  $2\,252\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

在仿真模型上表面设置 12 个点,相邻点间距设置为 30 mm,模拟超声换能器阵列发射与接收超声信号,共采集 66 组不同收发模式下的数据,每组通道信号各采集 2 048 个数据。经过匹配滤波、去除直达波、Hilbert 包络变换等预处理过程后,分别使用阵列超声成像方法与射线跟踪技术进行成像处理,成像结果如图 6 所示。成像纵向分辨率为 1/2 波长,即 22.5 mm,圆形缺陷直径大于纵向分辨率,故图中高幅信号中心对应于圆形缺陷上边界位置,即 275 mm 深度处。缺陷与底面检测深度以及各自对应误差如表 2 所示,结果表明,当上下层混凝土强度不同时,直接使用阵列超声成像方法,深度结果确实存在较大误差,误差大于 10%;结合射线跟踪技术可以对成像结果进行修正,修正后深度误差为 0.4%。

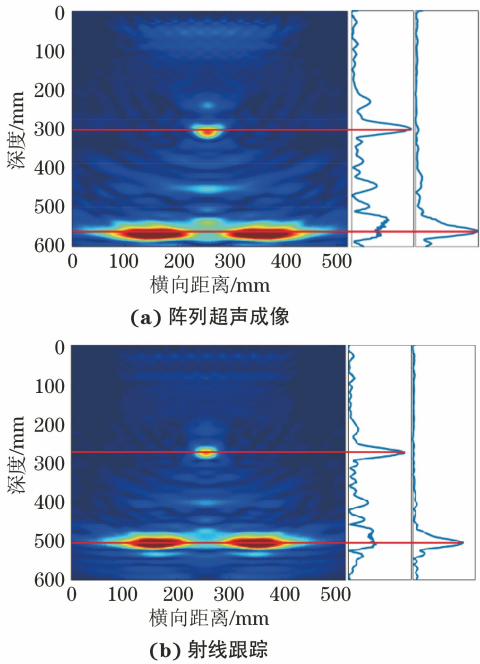


图 6 双层混凝土的阵列超声与射线跟踪仿真成像结果

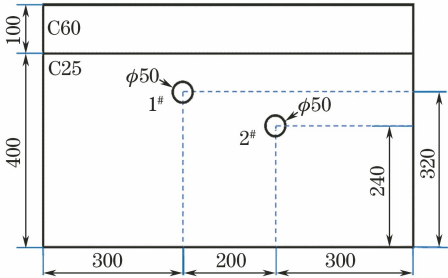
行改善,浇筑了 1 组素混凝土试块(不含钢筋),试验现场如图 7(a)所示。试块长为 800 mm,宽为 400 mm,高为 500 mm,分为上下两层结构。上层结构高度为 100 mm,使用 C60 混凝土浇筑;下层结



构高度为 400 mm,使用 C25 混凝土浇筑,内部缺陷用预埋 PVC 管的方式制作。试块中预埋了两根 PVC 管作为缺陷,管径为 50 mm,分别位于深度 180 mm(1<sup>#</sup>),260 mm(2<sup>#</sup>)处,试块结构如图 7(b)所示。使用 MIRA 超声断层成像扫描仪分别对缺陷区域(测点1)与无缺陷区域(测点2)进行检测,测点布



(a) 试验现场



(b) 试块结构

图 7 双层混凝土试块实物及其结构示意图

置位置如图 8 所示。

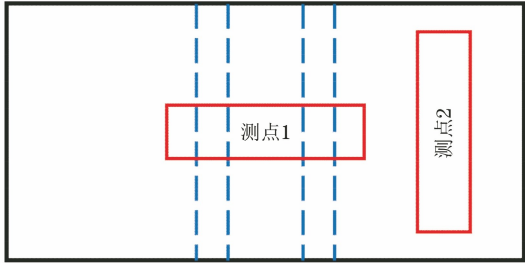


图 8 试验测点布置示意

分别使用阵列超声成像方法与射线跟踪技术对双层混凝土试块进行成像,结果如图 9 所示。成像纵向分辨率为 1/2 波长,即 27.3 mm,PVC 管直径大于纵向分辨率,故成像图中高幅信号中心对应于圆形缺陷上边界位置,试块中 1<sup>#</sup> PVC 管上边界深度为 155 mm,2<sup>#</sup> PVC 管上边界深度为 235 mm。缺陷检测深度与底面检测深度以及各自对应误差如表 3 所示。测点 2 成像结果中左右两侧出现的高幅信号,应是由测点 2 检测区域距两边界较近引发的边界效应引起。结果表明:对多层混凝土结构进行阵列超声检测,各层混凝土强度差异会导致检测成像结果中目标深度存在误差,误差达 10%以上;采用射线跟踪技术进行后成像处理,能够有效修正混凝土强度差异造成的检测结果深度误差,修正后误差小于 3%。

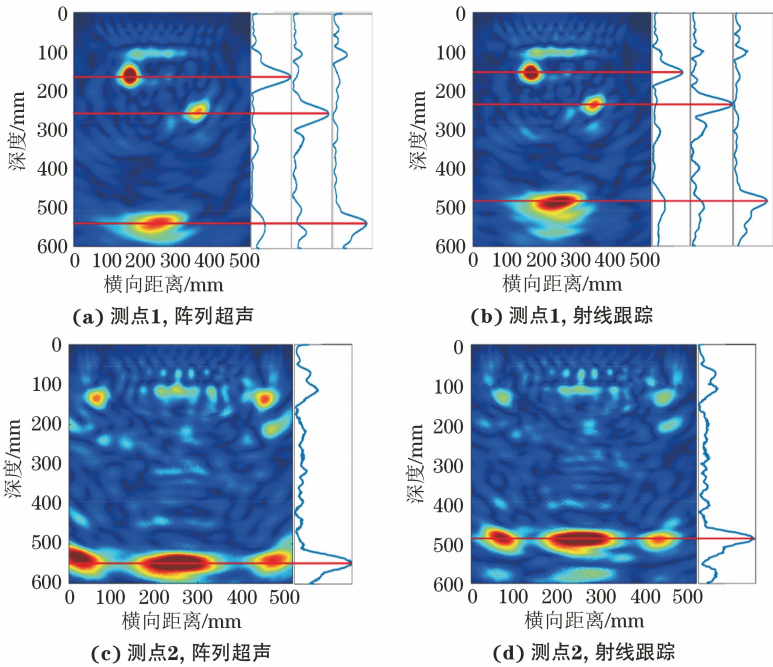


图 9 双层混凝土试块的阵列超声与射线跟踪成像结果

表 3 成像结果中缺陷与底面检测深度及对应误差

测点编号	检测目标	实际深度/mm	阵列超声成像			射线跟踪		
			检测深度/mm	绝对误差/mm	相对误差/%	检测深度/mm	绝对误差/mm	相对误差/%
1	1 <sup>#</sup> PVC 管	155	171	16	10.3	153	2	1.3
	2 <sup>#</sup> PVC 管	235	259	24	10.2	234	1	0.4
	底面	500	549	49	9.8	485	15	3.0
2	底面	500	550	50	10.0	488	12	2.4

4 结语

对双面叠合剪力墙进行现场阵列超声成像检测，成像结果中目标深度与实际深度存在较大误差，通过有限元仿真分析该深度误差成因，发现该误差是由后浇层混凝土与两侧单面混凝土内部声速差异造成的，且可采用射线跟踪技术有效修正检测结果误差。

通过试验验证，发现现有的阵列超声成像检测结果中目标深度确实存在较大误差，且误差达 10% 以上；采用射线跟踪技术对成像结果进行修正，改善后深度检测误差小于 3%。在需要高精度检测的项目中，可以使用射线跟踪技术对采集数据进行后处理，以有效减小深度误差，提高检测精度。该研究对双面叠合剪力墙以及类似分层混凝土结构的阵列超

声无损检测具有指导意义。

参考文献：

[1] 赵雪磊. 双皮墙现浇混凝土密实度 X 射线法检测应用创新[J]. 新型工业化, 2021, 11(12): 226-227.

[2] 刘承灵, 曹铨, 王平安, 等. 超声斜测法检测预制双面叠合剪力墙空腔混凝土密实度[J]. 砖瓦, 2022, (10): 76-78.

[3] 何胜华, 徐劲, 阎亮. 超声法与超声成像法检测装配式混凝土叠合构件缺陷研究[J]. 广东土木与建筑, 2018, 25(6): 29-32.

[4] SHLIVINSKI A, LANGENBERG K J , Defect imaging with elastic waves in inhomogeneous - anisotropic materials with composite geometries[J]. Ultrasonics, 2007, 46(1): 89-104.



(上接第 50 页)

[6] 葛泉江, 孙慧广, 苏伟强. 轴承套圈成品及锻件水浸超声检测技术应用[J]. 哈尔滨轴承, 2015, 36(3): 23-26.

[7] 胡玉平, 高鸿波, 吴伟, 等. 基于希尔伯特变换的铝/铝胶接结构缺陷尺寸的超声测量[J]. 无损检测, 2017, 39(11): 39-43.

[8] 闫彧. 异种金属扩散焊接接头的超声检测[J]. 无损检测, 2021, 43(1): 5-8.

[9] 竺科仪. 水浸超声探头频率、声场特性的分析及测定研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

[10] 王知颖, 付锐, 杜金辉, 等. 超声 C 扫检测系统灵敏度

影响因素探讨[J]. 物理测试, 2020, 38(3): 33-36.

[11] 张昱, 周瑞琪, 何才厚, 等. 基于 LabVIEW 的超声扫描仪数据采集系统设计[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2019, 33(2): 102-108.

[12] 刘尊伟, 余波, 李建文. 小直径棒料的超声波检测[J]. 无损检测, 2011, 33(3): 24-26.

[13] 徐圆飞, 徐春广, 肖定国, 等. 基于小球反射法的超声换能器脉冲声场模型研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2): 253-258.

[14] 韩冥生, 杨平. 脉冲回波法与水听器法测量超声探头声场参数比较研究[J]. 计量学报, 2015, 36(2): 166-170.

欢迎网上投稿

欢迎订阅

欢迎刊登广告