引用格式：刘建镇, 龙士国, 唐海翔, 等. 粘结混凝土结构超声波时域和频域特性研究[J]. 声学技术, 2021, **40**(5): 614-623. [LIU Jianzhen, LONG Shiguo, TANG Haixiang, et al. Research on ultrasonic time-domain and frequency-domain characteristics of bonded concrete structures[J]. Technical Acoustics, 2021, **40**(5): 614-623.] **DOI**: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.05.005

粘结混凝土结构超声波时域和频域特性研究

刘建镇，龙士国，唐海翔，张高峰
(湘潭大学土木工程与力学学院，湖南湘潭 411105)

摘要：装配式建筑在后浇混凝土过程中存在不同混凝土相互结合的问题，混凝土结合面粘结质量对粘结混凝土结构的受力性能具有重要影响。为研究粘结混凝土结构在不同粘结质量情况下的声波特性，运用有限元方法建立六类粘结混凝土结构在不同粘结质量情况下的物理模型，模拟了超声波在粘结混凝土结构模型中的传播过程。通过提取时域信号峰值，对频域数据进行积分处理，对比分析了各类粘结混凝土结构在不同粘结质量情况下的时域特征和频域特征。结果表明：不同混凝土强度等级相结合的粘结混凝土结构，界面反射较强，且强度等级差别越大，界面反射越强；时域信号峰值与频域积分随着粘结界面质量的提高而增大。根据这一特征，通过试验制作了三种不同粗糙度的粘结混凝土结构样本，采用斜测法对样本进行超声测试，结果表明界面粗糙度越高，超声波透射粘结界面区域内的时域信号峰值和频域积分越大。研究结果可为粘结混凝土结构质量检测提供参考和依据。

关键词：粘结混凝土结构；粘结质量；超声波；信号峰值；频域积分
中图分类号：TU375　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-3630(2021)-05-0614-10

Research on ultrasonic time-domain and frequency-domain characteristics of bonded concrete structures

LIU Jianzhen, LONG Shiguo, TANG Haixiang, ZHANG Gaofeng
(*College of Civil Engineering and Mechanics*, *Xiangtan University*, *Xiangtan* 411105, *Hunan*, *China*)

Abstract: In the process of post casting concrete of prefabricated buildings, there is a problem of mutual combination of different concretes. The bonding quality of concrete joint surface has an important impact on the mechanical performance of bonded concrete structure. In order to study the acoustic characteristics of bonded concrete structures with different bonding qualities, the physical models of six types of bonded concrete structures with different bonding qualities are established by using the finite element method, and the propagation process of ultrasonic wave in the bonded concrete structure model is simulated. By extracting the peak of time-domain signal and integrating the frequency-domain data, the time-domain and frequency-domain characteristics of various bonded concrete structures with different bonding qualities are compared and analyzed. The results show that the interface reflections of bonded concrete structures with different concrete strength grades are strong, and the greater the difference in strength grades, the stronger the interface reflection. The peak of time domain signal and the frequency domain integration increase with the improvement in bonding interface quality. According to this feature, three kinds of specimens of bonded concrete structure with different roughness are made through experiments, and the oblique measurement method is used to test the specimens. The results show that the higher the interface roughness, the greater the peak of time-domain signal and the frequency-domain integration in the bonded interface area of ultrasonic transmission. The research results can provide a reference and basis for the quality inspection of bonded concrete structure.

Key words: bonded concrete structure; bonding quality; ultrasonic; signal peak; frequency domain integration

0　引 言

随着我国经济转型发展和建筑工业化进程的加快，为了适应新时期建筑行业的可持续发展，装配式建筑在全国得到了大量推广应用[1-2]。装配式混凝土建筑是指以工厂化生产的混凝土预制构件为主，通过现场装配的方式设计建造的混凝土结构建筑。装配式混凝土建筑与传统混凝土建筑相比，具有施工质量高、施工周期短和节能减耗等优点[3]。装配式建筑采用了大量的预制构件，预制构件在后浇混凝土时，浇筑面积大、钢筋密集且预埋管线线路繁多，如果浇筑时振捣不密实，或者结合面没有

收稿日期：2020-07-20; **修回日期：**2020-12-02
基金项目：湖南省科技重大专项(2017SK1010)项目。
作者简介：刘建镇(1994－), 男, 湖南浏阳人, 硕士研究生, 研究方向为粘结混凝土结构粘结质量检测。
通信作者：刘建镇, E-mail: 1827653278@qq.com

按照规范要求处理，在结合面上会形成各类缺陷[4]。两次浇筑的混凝土之间需要保持良好的结合，使新旧混凝土形成一个整体，共同承担荷载。在第二次浇筑混凝土时，由于种种原因往往不能完全按照规范要求处理已硬化混凝土的表面，很难保证结合面质量[5]。

相关研究学者对粘结混凝土结构结合面粘结质量的检测研究也取得了一定成果。张晋峰等[6]采用钻芯植筋拉拔法对装配式叠合试件结合面的粘结强度进行了试验研究。王大永等[7]使用钻芯取样法、地质雷达法和超声波检测法对装配式结构的新旧混凝土结合面的质量进行检测，研究表明超声波法能够准确地检测装配式混凝土结构粘结界面的粘结质量。超声法[8]可以在不破坏混凝土结构的基础上检测到混凝土内部的缺陷，同时具有激发容易、操作简单和用途广泛等优点，在国内外得到了非常好的推广应用，成为应用最广泛的混凝土无损检测方法[9]。颜华等[10]为检测装配式混凝土结构中现浇混凝土的施工缺陷，通过试验检测超声波在不同脱空率混凝土模型构件中的声学信号，得到了超声波在脱空率较高的混凝土结构模型构件中声速、波幅和主频明显减小的变化规律。通过现场测试结果和试验数据比较，能够对整体结构缺陷进行有效的识别。赵军等[11]采用超声波首波声时法对拼装柱的密实性进行了检测，试验得到了缺陷位置的声波数据并分析了缺陷数据的规律性，通过建立空洞缺陷的计算模型，能有效预测空洞尺寸。但是试件数量和检测的数据较少。罗维刚等[12]采用超声波斜测法[13]和超声波平测法对梁施工结合面进行了质量检测，研究表明采用超声波平测法检测混凝土结合面质量是可行的。

李华良等[14]采用相控阵超声成像技术对钢管混凝土柱混凝土浇筑质量进行无损检测。结果表明相控阵超声成像技术在混凝土与其他介质材料结合面单面检测中取得良好效果，可反映结构内部混凝土浇筑质量。何胜华等[15]采用超声透射法和相控阵超声成像法检测混凝土叠合墙试件内部混凝土缺陷，并进行钻芯验证，结果表明采用超声波透射法及相控阵超声成像技术均可以识别明显的孔洞等缺陷。胡红波等[16]利用相控阵超声成像检测技术对叠合面预埋人工缺陷的装配式钢筋混凝土叠合板试件进行了检测，结果表明相控阵超声成像法可以识别叠合层明显的胶结不良、内部孔洞等缺陷。

综上所述，目前对于粘结混凝土结构结合面粘结质量的检测还没有形成统一的方法和标准。对于检测不同类型以及不同粘结质量的粘结混凝土结构也没有深入研究。针对粘结混凝土结构，在已有研究的基础上，本文采用 COMSOL 有限元模拟软件，对不同粘结混凝土结构的声场进行了仿真模拟，研究不同类型粘结混凝土结构在不同粘结质量情况下的时域特征和频域特征。根据这一特征设计实验，制作了三种不同界面粗糙度的粘结混凝土结构模型试件，采用超声波斜测法对模型试件进行测试，测试结果表明超声波透射不同粗糙度粘结界面的时域和频域特征变化明显。

1　粘结混凝土结构声场模拟方法

1.1　有限元模型的建立

根据粘结混凝土结构的特征，本文建立了如下二维有限元物理模型。如图 1 所示，从左至右的介质层依次为混凝土 1 区、粘结界面区、混凝土 2 区，各介质层的宽分别为 19、2、19 cm，高为 30 cm。采用超声波斜测法对激发点和接收点进行测点布置，激发点与接收点距粘结界面区的距离为 4 cm。模型的左右边界设置为低反射边界以减小界面反射对模拟结果的影响。通过对粘结混凝土结构模型各个介质层添加不同的材料参数，共建立六类粘结混凝土结构。C20-C20、C40-C40、U-U 为相同混凝土强度等级相结合的粘结混凝土结构模型；C40-C20、U-C40、U-C20 不同混凝土强度等级相结合的粘结混凝土结构模型。其中粘结界面区域的材料参数取界面区域两侧混凝土区域材料参数的平均值，各模型的材料参数如表 1 所示。

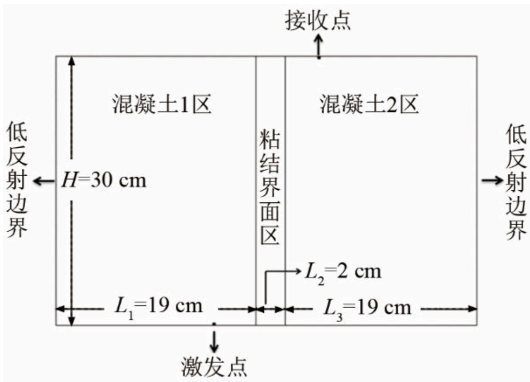


图 1　粘结混凝土结构物理模型
Fig.1　Physical model of bonded concrete structure

在各类粘结混凝土结构模型的粘结界面区域内随机均匀设定孔径大小为 1～2 mm 的不同数量的空洞缺陷、数量为 30、60、90、120，分别代表不同粘结质量的粘结混凝土结构模型，图 2 为随机空洞个数为 30 的粘结混凝土结构模型。

确定粘结混凝土结构模型的有限元单元类型和

表 1 模型的材料参数

Table 1 Material parameters of different bonded concrete structure models

粘接混凝土结构	介质层	密度/ $kg\cdot m^{-3}$	泊松比	弹性模量/ GPa	强度等级
C20-C20	混凝土 1 区	2 400	0.18	25.5	C20
	粘结界面区	2 400	0.18	25.5	–
	混凝土 2 区	2 400	0.18	25.5	C20
C40-C40	混凝土 1 区	2 500	0.20	32.5	C40
	粘结界面区	2 500	0.20	32.5	–
	混凝土 2 区	2 500	0.20	32.5	C40
U-U	混凝土 1 区	2 700	0.24	42.5	UHPC
	粘结界面区	2 700	0.24	42.5	–
	混凝土 2 区	2 700	0.24	42.5	UHPC
C40-C20	混凝土 1 区	2 500	0.20	32.5	C40
	粘结界面区	2 450	0.19	29.0	–
	混凝土 2 区	2 400	0.18	25.5	C20
U-C40	混凝土 1 区	2 700	0.24	42.5	UHPC
	粘结界面区	2 600	0.22	37.5	–
	混凝土 2 区	2 500	0.20	32.5	C40
U-C20	混凝土 1 区	2 700	0.24	42.5	C40
	粘结界面区	2 550	0.21	34.0	–
	混凝土 2 区	2 400	0.18	25.5	C20

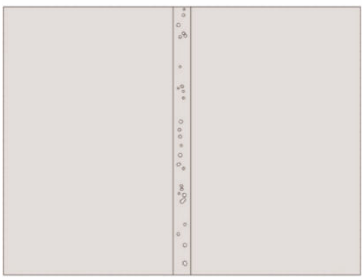


图 2 随机空洞个数为 30 的粘结混凝土结构模型

Fig.2 Structural model of bonded concrete with 30 random holes

材料参数之后，将图 1 和图 2 中的粘结混凝土结构模型生成有限元网格划分模型。网格划分在有限元建模过程中非常重要，网格尺寸划分的合理性与计算结果的准确性在很大程度上呈直线相关。为了保证计算精度，声波沿传播方向每个波长内至少有 10～20 个单元[17]，最大单元的尺寸选择如表 2 所示。

表 2 模型最大单元尺寸

Table 2 Maximum unit size in structural model

介质层	纵向尺寸/mm	横向尺寸/mm
混凝土 1 区	≤2	≤2
粘结界面区	≤2	≤2
混凝土 2 区	≤2	≤2

1.2 激励信号的选取

模拟采用的激励信号由 3 个单音频信号叠加并经过汉宁(Hanning)函数调制而成。相对一般的半正弦、矩形波和尖脉冲等信号，Hanning 窗脉冲信号主瓣高，旁瓣瞬间衰减很快，在信号识别中频率敏感度高，这种窄带激励函数既可以使应力波的传播距离增大，又可以增强自身的信号强度[18]。通过模拟结果对比分析，选择脉冲信号的频率 f=100 kHz、脉冲宽度 T=30 μs、计算时间 t=600 μs 时接收到的波形较好，易于提取分析。激励信号的时域图及频谱图如图 3 和图 4 所示。在模拟过程中先编写激励信号的函数表达式，然后以瞬时荷载的形式加载到激发点处，所加载的激励信号[19]的数学表达式为

$$X(t)=-10\left(1-\cos\frac{2\pi ft}{n}\right)\sin(2\pi ft) \tag{1}$$

式中：f 为频率；n 为单音频数；t 为时间。

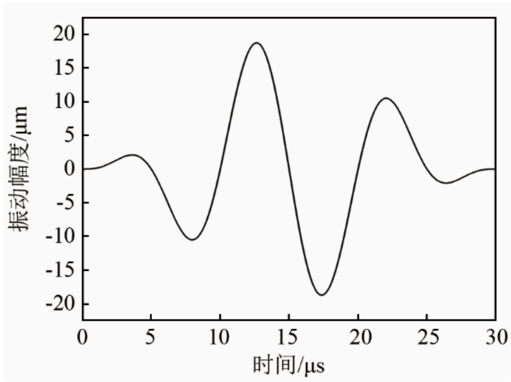


图 3 激励信号的时域图

Fig.3 Time domain plot of excitation signal

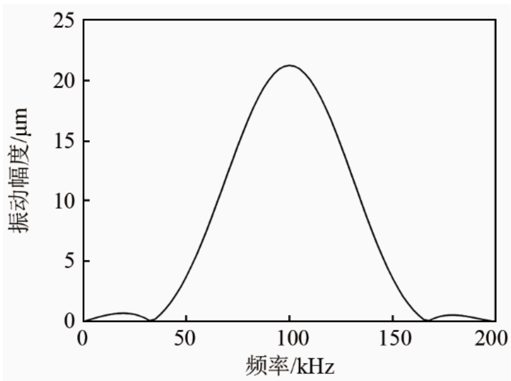


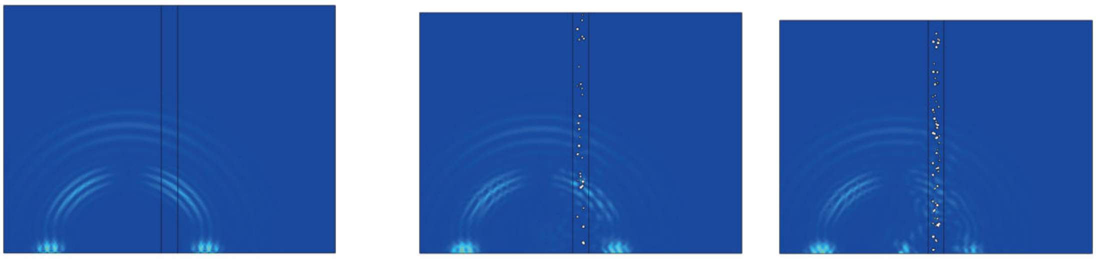
图 4 激励信号的频谱图

Fig.4 Spectrum of the excitation signal

2 模拟结果分析

2.1 声波在介质中的传播声场

图 5 是超声波在 C40-C40 不同空洞数量模型中传播的声场快照。由图 5 可知，在激发点处激励超声波信号后，超声波就会在粘结混凝土结构模型中传播。当超声波通过粘结界面区域时，在粘结界面区域内遇到空洞缺陷会发生界面反射，而且随着空洞数量的增加，超声波在界面区域发生的反射越多，超声波透射粘结界面区域的能量越小。



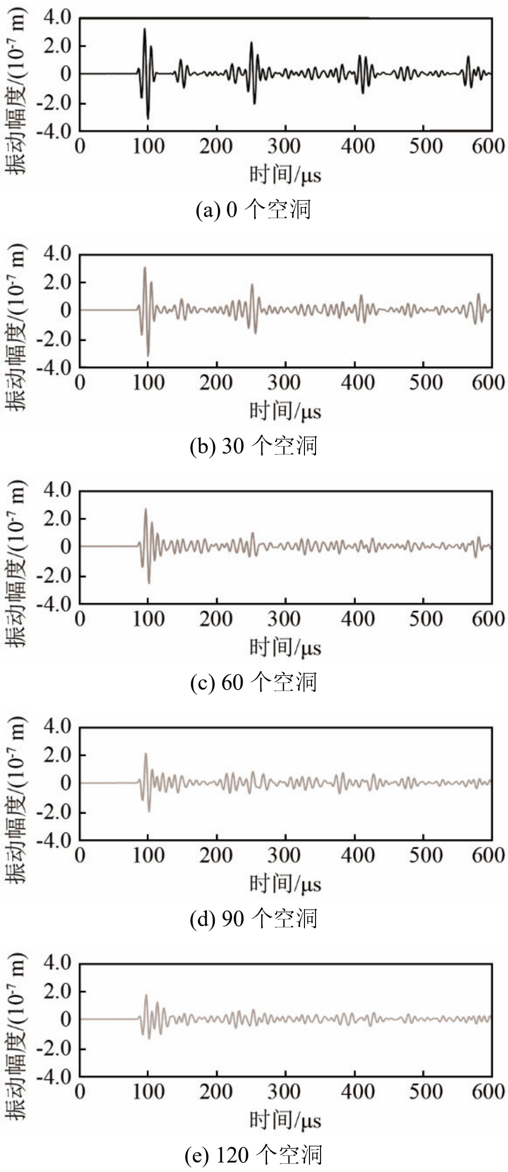
(a) 随机空洞个数为 0 的粘结混凝土结构模型　(b) 随机空洞个数为 30 的粘结混凝土结构模型　(c) 随机空洞个数为 60 的粘结混凝土结构模型

图 5　C40-C40 不同空洞数量模型声波传播云图

Fig.5　Nephograms of sound wave propagation in C40-C40 model with different numbers of holes

2.2　时域分析

取 C40-C40 和 U-C40 不同空洞数量模型的时域波形数据为例，图 6 和图 7 分别为 C40-C40、U-C40 不同空洞数量模型的时域波形。通过对比不同空洞数量模型的首脉冲到达时刻(简称首波声时)可以发



(a) 0 个空洞

(b) 30 个空洞

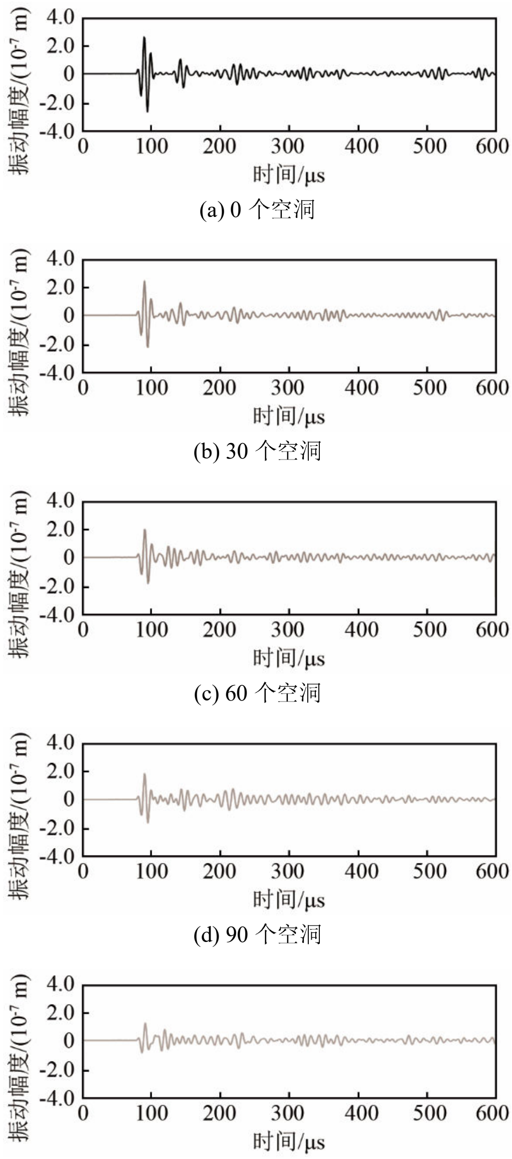
(c) 60 个空洞

(d) 90 个空洞

(e) 120 个空洞

图 6　C40-C40 不同空洞数量模型时域波形

Fig.6　Time-domain signal waveforms in C40-C40 model with different number of holes



(a) 0 个空洞

(b) 30 个空洞

(c) 60 个空洞

(d) 90 个空洞

(e) 120 个空洞

图 7　U-C40 不同空洞数量模型时域波形

Fig.7　Time-domain signal waveforms in U-C40 model with different number of holes

现，不同空洞数量模型的首波声时基本一致。当空洞数量为 30 或 60 时，时域信号衰减较慢，当空洞数量为 90 或 120 时，时域信号衰减较快，但是用首波声时难以区分不同空洞数量的模型。

图 8 和图 9 分别为 C40-C40 和 U-C40 不同空洞数量模型接收到的时域信号峰值对比图。由图 8 和图 9 可知，空洞数量为 0 时，时域信号峰值最大，随着空洞数量的增加，时域信号峰值依次降低，不同空洞数量模型的时域信号峰值呈规律性变化，因此对所有模型的时域信号峰值进行提取分析。

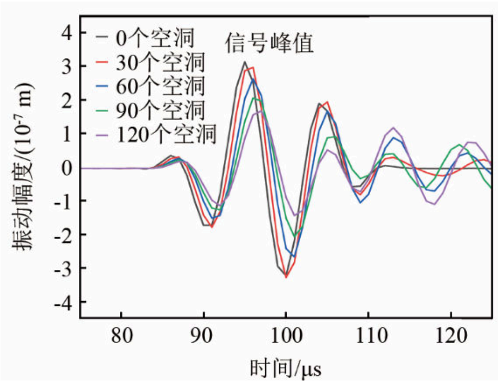


图 8 C40-C40 不同空洞数量模型时域信号峰值对比
Fig.8 Comparison of the peaks of time-domain signal in C40-C40 model with different number of holes

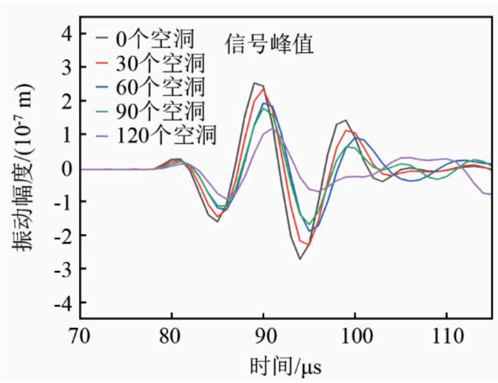


图 9 U-C40 不同空洞数量模型时域信号峰值对比
Fig.9 Comparison of the peaks of time-domain signal in U-C40 model with different number holes

图 10 为不同空洞数量模型的时域信号峰值。由图 10 可知，空洞数量为 0 时，C20-C20、C40-C40、U-U 相同混凝土强度等级相结合的粘结混凝土结构模型，信号峰值分别为 3.3×10^{-7} m、3.2×10^{-7} m、3.0×10^{-7} m，信号峰值较大。C40-C20、U-C40、U-C20 不同混凝土强度等级相结合的粘结混凝土结构模型，信号峰值分别为 2.8×10^{-7} m、2.6×10^{-7} m、2.0×10^{-7} m，信号峰值依次降低。由此可以看出，相同混凝土强度等级相结合的粘结混凝土结构，界面反射较小，超声波透射粘结界面区的能量大，接收点的信号峰值较大。不同混凝土强度等级相结合的粘结混凝土结构，界面反射增强，超声波透射粘结界面区域的能量减小，且强度等级差别越大，界面反射越强，超声波透射粘结界面区域的能量越小，接收点的信号峰值越小。通过对比不同空洞数量模型的时域信号峰值可知，空洞数量越多的粘结混凝土结构模型，信号峰值越小。由此可知粘结质量越好，超声波透射粘结界面区域的信号峰值越大。

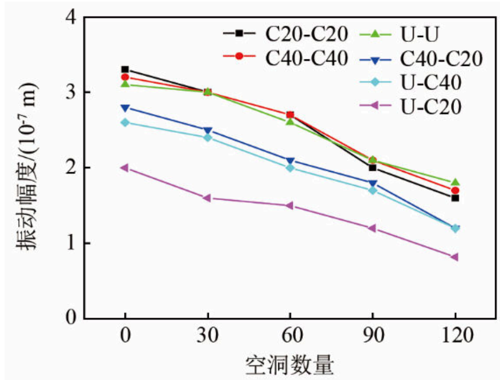
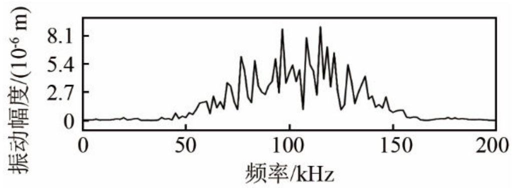


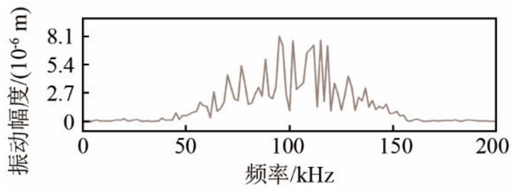
图 10 不同空洞数量模型时域信号峰值
Fig.10 Peaks of time-domain signal in different models with different number of holes

2.3 频域分析

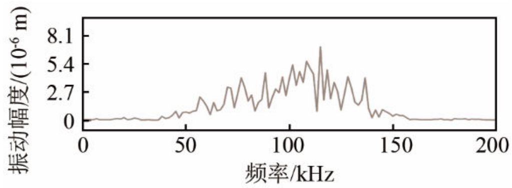
对所有模型的时域信号进行 FFT，图 11、12 分别为 C40-C40、U-C40 不同空洞数量模型的频谱



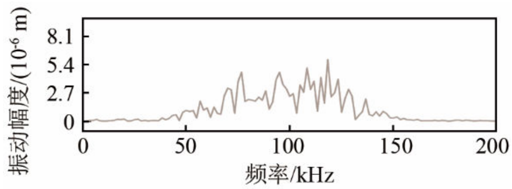
(a) 0 个空洞



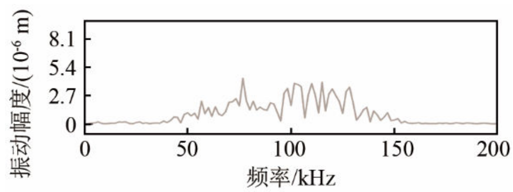
(b) 30 个空洞



(c) 60 个空洞



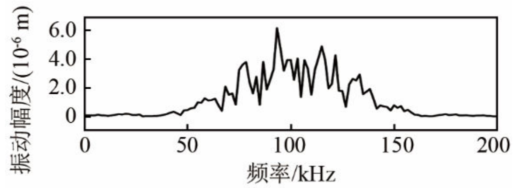
(d) 90 个空洞



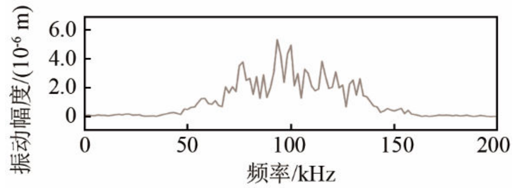
(e) 120 个空洞

图 11　C40-C40 不同空洞数量模型频谱曲线

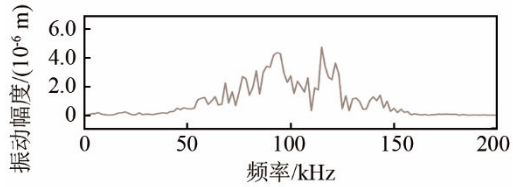
Fig.11　Spectrum curves for C40-C40 model with different number of holes



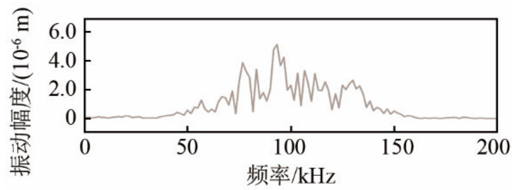
(a) 0 个空洞



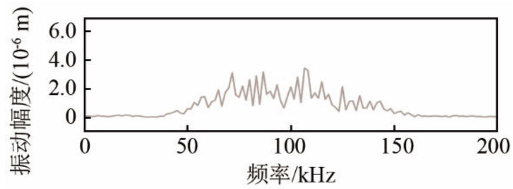
(b) 30 个空洞



(c) 60 个空洞



(d) 90 个空洞



(e) 120 个空洞

图 12　U-C40 不同空洞数量模型频谱曲线

Fig.12　Spectrum curves for U-C40 model with different number of holes

曲线。

将图 11 和图 12 中各模型的频域信号进行对比可以发现，在粘结质量较好的情况下，频域信号分布在 50～150 kHz 之间，且在 100 kHz 处存在明显的峰值。当粘结区域存在空洞时，且空洞数量越多，峰值信号降低的现象越明显。因此可以对其进行频域积分，图 13 为不同空洞数量模型的频域积分。

由图 13 可知，空洞数量为 0 时，C20-C20、C40-C40、U-U 相同混凝土强度等级相结合的粘结混凝土结构模型，频域积分分别为 0.340、0.338、0.326，频域积分较大。C40-C20、U-C40、U-C20 不同混凝土强度等级相结合的粘结混凝土结构模型，频域积分分别为 0.239、0.237、0.186，频域积分依次减小。由此可知，相同混凝土强度等级相结合的粘结混凝土结构，超声波透射粘结界面区域的频域积分较大。不同混凝土强度等级相结合的粘结混凝土结构，超声波透射粘结界面区域的频域积分减小。通过对比不同空洞数量模型频域积分可知，空洞数量越多的粘结混凝土结构模型，频域积分越小。由此可知，粘结界面区域内空洞数量越少，粘结界面粘结质量越好，超声波透射粘结界面区域的频域积分越大。

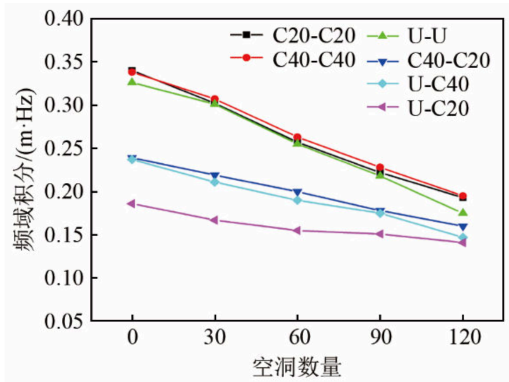


图 13　不同空洞数量模型频域积分

Fig.13　Frequency domain integration in different models with different number of holes

3　实验测试

3.1　粘结混凝土结构模型设计与制作

根据工程实际情况以及试验需要，本文设计了适当简化的粘结混凝土结构模型，图 14 为粘结混凝土结构模型的设计图。

模型的制作流程主要分为以下三个步骤：(1) 预制混凝土试件制作，试件的几何尺寸为 700 mm×300 mm×600 mm，浇筑 C40 混凝土。(2) 粘结界面粗糙度处理，预制混凝土试件养护完成后，取预制混凝土试件 300 mm×600 mm 平面作为粘结面进行粗糙度处理，粗糙处理界面划分为 3 个相同的面积区域，通过人工凿毛法对粘结界面进行粗糙处理，并采用灌沙法测定粘结界面的粗糙度，试验设计并制作了界面粗糙度为 4 mm、8 mm 和 12 mm 三种混凝土粗糙度界面。(3) 浇筑新混凝土，新浇筑混凝土部分的几何尺寸为 300 mm×300 mm×600 mm，

采用 C30 混凝土进行浇筑而成。图 15 为粘结混凝土结构模型制作过程照片。

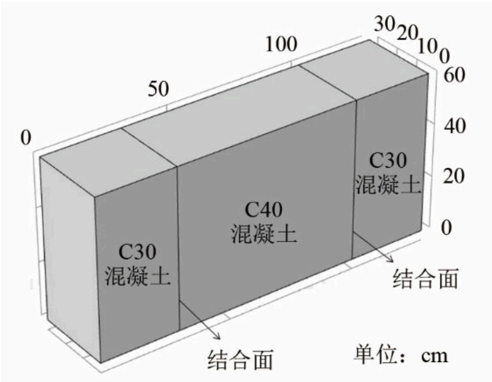
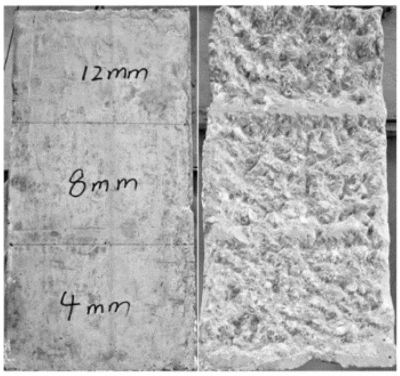


图 14 粘结混凝土结构模型设计图
Fig.14 Model design drawing of bonded concrete structure

(a) 预制混凝土试件制作



(b) 粘结界面粗糙度处理

(c) 浇筑新混凝土

图 15 粘结混凝土结构试样的制作过程照片
Fig.15 Photos of the making process of bonded concrete structure specimen

3.2 粘结混凝土结构模型模型测试

采用超声波斜测法对粘结混凝土结构模型进行声波测试，分别在粘结混凝土结构的粘结界面测区和界面两侧的 C30、C40 混凝土测区进行声波测试，超声波斜测法测试粘结混凝土结构示意图如图 16 所示。其中 T 表示超声波激发换能器，R 表示超声波接收换能器，T1-R1 测试 C30 混凝土测区的声波，T2-R2 测试粘结界面测区的声波，T3-R3 测试 C40 混凝土测区的声波。超声测距 L=0.335 m，不同粗糙度粘结界面测区各选择三条测试截面，分别为粘结混凝土结构粗糙面测区的上部、中部和下部。各截面选择三个点进行测试。

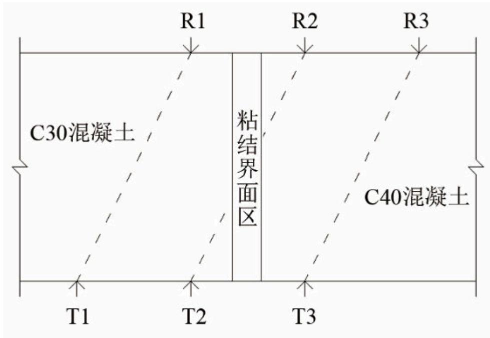


图 16 超声波斜测法测试粘结混凝土结构示意图
Fig.16 Schematic diagram of testing bonded concrete structure by ultrasonic oblique measurement

超声波测试仪器采用本课题组自主研发的 TH204 型多功能声波参数测试仪，换能器激发频率为 100 kHz，图 17 为 TH204 型多功能声波参数测试仪，图 18 为粘结混凝土结构模型现场测试照片。

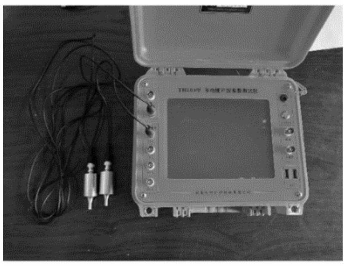
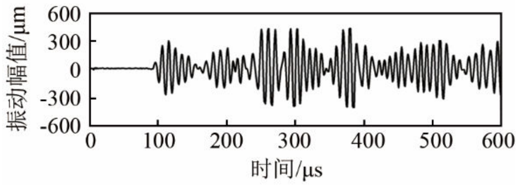


图 17 TH204 型多功能声波参数测试仪
Fig.17 TH204 multi-function acoustic parameter tester

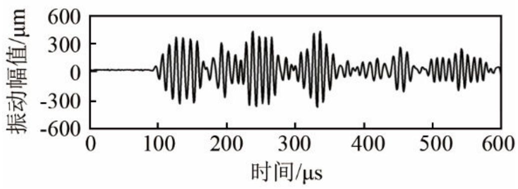
图 18 粘结混凝土结构模型现场测试照片
Fig.18 Field test photos of bonded concrete structure model

3.3　粘结混凝土结构模型测试结果分析

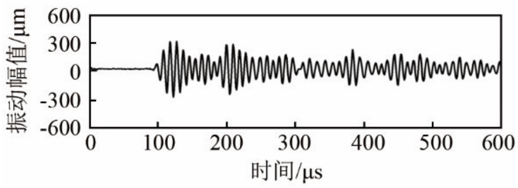
图 19 为粘结混凝土结构各测区的时域波形图，由图可知，C40 混凝土测区和 C30 混凝土测区的时域信号峰值较大，时域信号衰减较慢；当超声波透射粘结界面区时，时域信号峰值降低明显，界面粗糙度为 12 mm 的粘结界面测区的时域信号峰值最大，界面粗糙度为 4 mm 的粘结界面测区的时域信号峰值最低。模拟结果表明，时域信号峰值随着粘结密实度的提高而增大，因此推断界面粗糙度为 4 mm 的混凝土粘结界面质量最差。



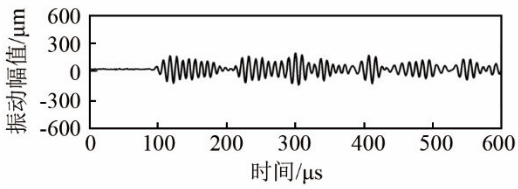
(a) C40 混凝土



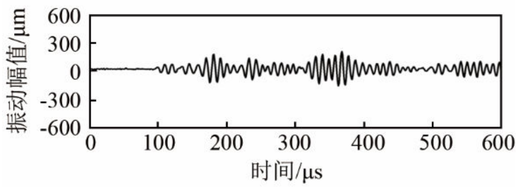
(b) C30 混凝土



(c) 粗糙度 12 mm 界面



(d) 粗糙度 8 mm 界面



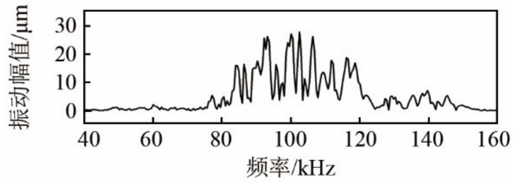
(e) 粗糙度 4 mm 界面

图 19　粘结混凝土结构各测区的时域波形图

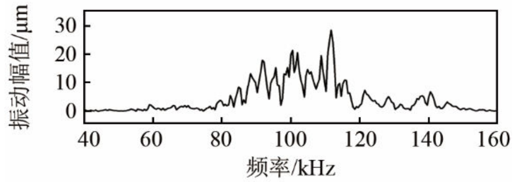
Fig.19　Time-domain signal waveforms of each measurement area in bonded concrete structure

对所有测区的时域信号进行 FFT，并将频域信号进行频域积分处理，图 20 为粘结混凝土结构各测区的频域图，图 21 为粘结混凝土结构各测区频域积分。由图 20 和图 21 可知，当超声波透射 C40 混凝土测区和 C30 混凝土测区时，频域信号集中分布在 50～100 kHz 之间，且在 100 kHz 处存在明显的峰值；当超声波透射粘结界面测区时，且粘结界面粗糙度越低，峰值信号降低现象更明显。

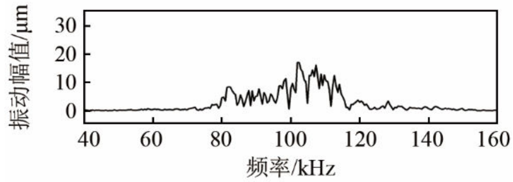
由实验测试可得，超声波透射不同粗糙度的粘结混凝土结构具有明显的时域变化和频域变化，界面粗糙度不足导致两次浇筑的混凝土粘结不密实，增加界面粗糙度，超声波透射粘结界面区的时域信号峰值和频域积分增加，这是由于增加界面粗糙度能够增加粘结界面区域内的粘结面积，使得新旧混凝土之间粘结更加紧密，超声波透射粘结界面区域的能量越大。



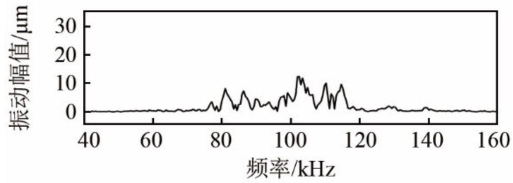
(a) C40 混凝土



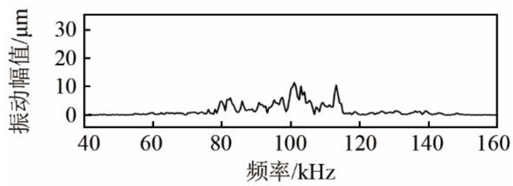
(b) C30 混凝土



(c) 粗糙度 12 mm 界面



(d) 粗糙度 8 mm 界面



(e) 粗糙度 4 mm 界面

图 20　粘结混凝土结构各测区频域图

Fig.20　Frequency domain diagram of each measurement area in bonded concrete structure

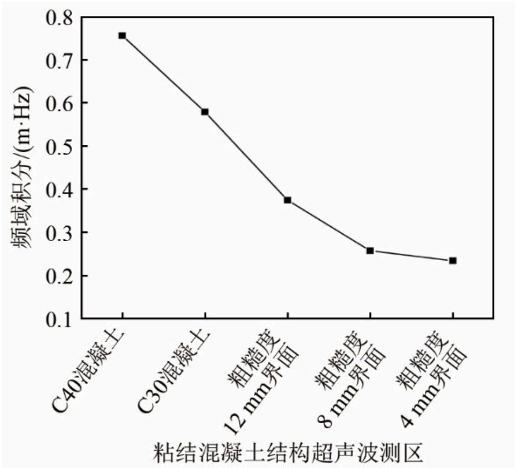


图 21 粘结混凝土结构各测区频域积分

Fig.21 Frequency domain integration of each measurement area in bonded concrete structure

4 结 论

(1) 通过 COMSOL 有限元数值模拟软件，模拟了超声波在不同空洞数量粘结混凝土结构模型中的传播过程，通过对比不同空洞数量粘结混凝土结构模型的时域波形，发现各模型的首波声时基本一致，首波声时并不能区分不同空洞数量的粘结混凝土结构模型。

(2) 时域分析表明，相同混凝土强度等级相结合的粘结混凝土结构，界面反射较小，接收点的信号峰值较大；不同混凝土强度等级相结合的粘结混凝土结构，界面反射增强，且强度等级差别越大，界面反射就越强，接收点的信号峰值就越小；粘结界面区域内的空洞数量越少，粘结界面质量越好，超声波透射粘结界面的能量越大，接收点的信号峰值越大。

(3) 频域分析表明，相同混凝土强度等级相结合的粘结混凝土结构，界面反射较小，接收点的频域积分较大；不同混凝土强度等级相结合的粘结混凝土结构，界面反射增强，且强度等级差别越大，界面反射就越强，接收点的频域积分就越小；粘结界面区域内的空洞数量越少，粘结界面质量越好，超声波透射粘结界面的能量越大，接收点的频域积分越大。

(4) 数值模拟和实验测试结果表明，超声波透射不同粘结质量的粘结混凝土结构，具有明显的时域变化和频域变化，对于粘结混凝土结构的粘结质量，可以通过超声波时域信号峰值和频域积分进行有效的识别。

参 考 文 献

[1] 王俊，赵基达，胡宗羽. 我国建筑工业化发展现状与思考[J]. 土木工程学报, 2016, **49**(5): 1-8.
WANG Jun, ZHAO Jida, HU Zongyu. Review and thinking on development of building industrialization in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, **49**(5): 1-8.

[2] 刘琼，李向民，许清风. 预制装配式混凝土结构研究与应用现状[J]. 施工技术, 2014, **43**(22): 9-14, 36.
LIU Qiong, LI Xiangmin, XU Qingfeng. Present research and application of precast concrete structure[J]. Construction Technology, 2014, **43**(22): 9-14, 36.

[3] 蒋勤俭. 国内外装配式混凝土建筑发展综述[J]. 建筑技术, 2010, **41**(12): 1074-1077.
JIANG Qinjian. Summary on development of assembled concrete building both home and abroad[J]. Architecture Technology, 2010, **41**(12): 1074-1077.

[4] 姚利君，李华良，管文，等. 相控阵超声成像法检测钢筋混凝土叠合构件缺陷研究[J]. 施工技术, 2017, **46**(17): 20-22, 40.
YAO Lijun, LI Hualiang, GUAN Wen, et al. Inspection of reinforced concrete composite component defects by phased array ultrasonic imaging method[J]. Construction Technology, 2017, **46**(17): 20-22, 40.

[5] 张治泰，邱平. 超声波在混凝土质量检测中的应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

[6] 张晋峰，孙彬，毛诗洋，等. 装配式结构混凝土结合面粘结强度试验研究[J]. 建筑结构, 2018, **48**(23): 17-21, 27.
ZHANG Jinfeng, SUN Bin, MAO Shiyang, et al. Experimental study on bond strength of concrete interface of prefabricated structure[J]. Building Structure, 2018, **48**(23): 17-21, 27.

[7] 王大永，刘钊，谢丽霞，等. 装配式混凝土新旧结合面质量检测技术分析与研究[J]. 中国港湾建设, 2019, **39**(12): 20-24.
WANG Dayong, LIU Zhao, XIE Lixia, et al. Analysis and research of testing technology for new and old joints of prefabricated concrete[J]. China Harbour Engineering, 2019, **39**(12): 20-24.

[8] AGGELIS D G, SHIOTANI T, KASAI K. Evaluation of grouting in tunnel lining using impact-echo[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, **23**(6): 629-637.

[9] SCHABOWICZ K. Ultrasonic tomography - The latest nondestructive technique for testing concrete members - Description, test methodology, application example[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2014, **14**(2): 295-303.

[10] 颜华，宋波. 装配式混凝土密实度的超声波现场测试[J]. 科学技术与工程, 2019, **19**(7): 224-230.
YAN Hua, SONG Bo. Ultrasonic field test of density of fabricated concrete[J]. Science Technology and Engineering, 2019, **19**(7): 224-230.

[11] 赵军，戴昌强，朱万旭，等. 超声波检测装配式混凝土结构接缝密实性试验研究[J]. 混凝土, 2018(12): 122-125.
ZHAO Jun, DAI Changqiang, ZHU Wanxu, et al．Experimental study on joint compactness of fabricated concrete structures w ith ultrasonic testing[J]. Concrete, 2018(12): 122-125.

[12] 罗维刚，宋彧，来春景. 超声平测法在混凝土结合面质量检测中的应用[J]. 结构工程师, 2011, **27**(S1): 109-112.
LUO Weigang, SONG Yu, LAI Chunjing. Application of the pulsed ultrasound plane monitor method for inspection of concrete jointing surface quality[J]. Structural Engineers, 2011, **27**(S1): 109-112.

[13] 中国工程建设标准化协会. 超声法检测混凝土缺陷技术规程:

CECS 21: 2000[S]. 北京, 2000.

[14] 李华良. 相控阵超声成像技术在钢管混凝土结构检测中的应用[J]. 施工技术, 2020, **49**(15): 64-66, 70.
LI Hualiang. Application of ultrasonic phased array imaging technology in the detection of concrete filled steel tubular structures[J]. Construction Technology, 2020, **49**(15): 64-66, 70.

[15] 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.
HE Shenghua, XU Jin, YAN Liang. Defects inspection for reinforced concrete composite component by ultrasonic method and ultrasonic imaging method[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2018, **25**(6): 29-32.

[16] 胡红波, 杨勇华, 宋雄彬. 相控阵超声成像法检测装配式钢筋混凝土叠合板构件缺陷研究[J]. 广州建筑, 2020, **48**(1): 6-9.
HU Hongbo, YANG Yonghua, SONG Xiongbin. Research on defects of prefabricated reinforced concrete composite plate by phased array ultrasound imaging method[J]. Guangzhou Architecture, 2020, **48**(1): 6-9.

[17] SONG K I, CHO G C. Numerical study on the evaluation of tunnel shotcrete using the Impact-Echo method coupled with Fourier transform and short-time Fourier transform[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, **47**(8): 1274-1288.

[18] 解廷菊, 龙士国. 超声波检测套管井水泥环缺陷仿真模拟[J]. 声学技术, 2017, **36**(4): 346-352.
XIE Tingju, LONG Shiguo. Simulation of cement defect in casing well with ultrasonic[J]. Technical Acoustics, 2017, **36**(4): 346-352.

[19] AGGELIS D G, TSIMPRIS N, CHAI H K, et al. Numerical simulation of elastic waves for visualization of defects[J]. Construction and Building Materials, 2011, **25**(4): 1503-1512.

· 简 讯 ·

2021 年浙黑苏鲁沪渝四省二市声学技术学术会议在金华举行

10 月 15—18 日，2021 年浙黑苏鲁沪渝四省二市声学技术学术会议在浙江金华召开。本次会议由浙江省声学学会、黑龙江省声学学会、江苏省声学学会、山东省声学学会、上海市声学学会、重庆市声学学会、中国声学学会水声学分会、声纳技术重点实验室、水声技术重点实验室、近代声学教育部重点实验室、浙江师范大学联合主办，浙江省声学学会和浙江师范大学共同承办。

浙江省声学学会励荣锋秘书长主持了大会开幕式。浙江师范大学钟依钧副校长、江苏省声学学会刘晓宙理事长分别致辞，对会议的成功举办表示祝贺，对各位领导、专家的支持表示感谢。

会议特别邀请了南京大学陶超教授、中国海洋大学高博副教授、同济大学李勇教授、重庆大学谢辉教授等专家分别做了题为“光声成像及其生物医学应用”“远程混响的理论建模及环境耦合特性研究”“超构表面声衬技术初步探索”“面向未来的智慧疗愈声景”的大会学术报告。来自全国多所高等院校、科研院所和企事业单位的 80 余位专家学者、在校师生参加了会议，24 篇学术论文在会议现场分专题进行了深入交流。

本次会议的成功举办为四省二市声学科技工作者提供了较高的交流平台，促进了声学科研和技术领域的交流合作，有效推动了声学领域科研创新能力的提高。

浙江省声学学会、黑龙江省声学学会、江苏省声学学会、山东省声学学会、上海市声学学会、
重庆市声学学会、中国声学学会水声学分会、声纳技术重点实验室、
水声技术重点实验室、近代声学教育部重点实验室、浙江师范大学