

◇ 研究报告 ◇

钢-混凝土结构弱粘接界面缺陷的超声导波检测*

张玉洁 陈兴杰 朱文发[†]

(上海工程技术大学城市轨道交通学院 上海 201620)

摘要: 钢-混凝土结构是土木工程中的一种常用结构形式, 钢与混凝土粘接处可能出现弱粘接甚至完全脱粘的缺陷, 严重影响结构的安全性。该文提出利用空气耦合超声导波衰减的方法实现钢-混凝土结构粘接状态的非接触无损检测方法, 分析不同厚度粘接界面对超声导波衰减的影响。基于全局矩阵技术对钢-混凝土结构求解理论频散方程和衰减曲线, 得到界面层不同粘接条件下的理论参数及衰减特性。建立不同粘接条件的有限元模型, 定量分析不同模式对粘接缺陷的检测灵敏度。研究界面层厚度分别为 1 mm 和 2 mm 两种情况下 S0 能量的衰减情况。研究表明: S0 模式可有效判断粘接结构的粘接状态, 对于同一界面层厚度, 随着界面粘接条件变弱, S0 最大幅值与 A0 最大幅值比不断增大; 不同厚度同一粘接条件下, 2 mm 相较于 1 mm 该值更大。该方法在钢-混凝土结构粘接界面缺陷的检测方面具有良好的应用价值和前景。

关键词: 超声导波; 钢-混凝土; 粘接界面; 弱粘接缺陷; 无损检测

中图法分类号: TU317+.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2020)03-0379-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2020.03.009

Ultrasonic guided wave detection of weak bond interface defects in steel-concrete structures

ZHANG Yujie CHEN Xingjie ZHU Wenfa

(School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Steel-concrete structure is a common structural form in civil engineering. It may have weak or even complete debonding defects in the bond between steel and concrete so that seriously affect the safety of the structure. In this paper, a non-contact non-destructive testing method for the bonding state of steel-concrete composite structures by air-coupled ultrasonic guided wave attenuation is proposed, and the influence of ultrasonic bonding on the attenuation of ultrasonic guided waves is analyzed. Based on the global matrix technique, the theoretical dispersion equation and attenuation curve are solved for the steel-concrete layered structure, and the theoretical parameters and attenuation characteristics of the interface layer under different bonding conditions are obtained. The finite element model with different bonding conditions was established to quantitatively analyze the sensitivity of different modes to the detection of bonding defects. The attenuation of S0 energy in the case of interface layer thickness of 1 mm and 2 mm was analyzed separately. The results show that the S0 mode can effectively judge the bonding state of the bonded structure. For the thickness of the same interface layer, as the interface bonding condition becomes weaker, the ratio of the maximum amplitude of S0 to the maximum amplitude of A0 increases continuously. Under bonding conditions, the value of 2 mm is larger than that of 1 mm. The method has good application value and development prospect in the detection of weak bond interface defects in steel-concrete structures.

Keywords: Ultrasonic guided wave; Steel-concrete; Bonding interface; Weak bonding defects; Non-destructive testing

2019-07-15 收稿; 2019-09-25 定稿

*国家自然科学基金项目 (11874255), 上海市科委重点科技支撑项目 (16030501400), 上海市科委重点支撑项目 (18030501300)

作者简介: 张玉洁 (1995-), 女, 安徽宣城人, 硕士研究生, 研究方向: 混凝土结构的超声检测。

[†]通信作者 E-mail: zhuwenfa1986@163.com

0 引言

具有结构坚固、可靠稳定和节省材料优势的钢-混凝土结构广泛应用于桥梁、超高层建筑和钢管混凝土拱桥等基础设施中。然而,由于施工工艺以及环境负荷将导致钢与混凝土粘接处界面发生脱粘,从而影响结构整体的极限承载能力和安全性。因此对钢-混凝土结构界面的粘接质量及安全性检测评估显得尤为重要。

由于粘接结构各层声阻抗存在差异、基体材料的高声衰减性和频散特性,复合结构多层界面间粘接质量的无损检测至今仍是一个难题。目前,国内外关于钢-混凝土组合结构的检测方法主要有红外热成像、冲击回波、表面波、声学检测等。田长彬等^[1]开发了适用于桥梁钢管混凝土裂缝监测的光纤光栅传感器,若钢层与混凝土层发生界面脱粘,预埋的传感器发生光纤微弯,造成能量传输损耗。该方法需预先埋置传感器且光纤造价高、容易被破坏。Renshaw等^[2]利用红外热成像检测了储罐和密封衬管试样的粘接状态,虽然重建缺陷图像,对目标缺陷高度敏感,但需均匀加热设备。Pan等^[3]提出了一种针对钢管局部模态的振动试验方法,可实现钢管混凝土拱桥界面分离实时监测,但需要传感器和待检测物之间的物理接触,不适用于结构大并需要大范围检查的情况。Zhu等^[4-5]进行了基于麦克风的混凝土板裂缝成像实验,结果表明表面波的传播经过裂缝时,声波的能量衰减程度和裂缝与波的传播方向夹角有一定关系,可定性识别局部界面脱粘损伤,不适合环境噪声较大的场合。郑善朴等^[6]研究多层结构中脱粘缺陷的超声检测方法,通过对不同脱粘缺陷超声脉冲回波的特征分析实现缺陷的定性、定位和定量。上述几种方法虽然可检测粘接界面损伤,但缺乏高效快速的无损检测方法。

超声导波检测是无损检测的一种,是最有效的检测方法之一,具有穿透力强、灵敏度高、等优点,可以检测金属与非金属以及复合材料等多种结构的损伤。本文提出一种利用空耦超声导波的衰减检测钢-混凝土粘接结构层间缺陷的方法,利用全局矩阵技术得到不同粘接条件下导波的理论频散特性和衰减特性,根据理论选择合适的频率、角度等参数。然后,建立有限元分析模型并对有限元时域结果进行二维傅里叶变换及归一化处理分析,得到不同粘接条件下S0模态和A0模态幅值变化规律。最后分

析粘接界面层不同厚度对导波在钢层与混凝土层中传播的影响。

1 理论模型

钢-混凝土组合结构是一种典型的层状结构,超声Lamb波在钢-混凝土中传播视为在层状介质中的传播。针对本文的钢-混凝土层状粘接结构,建立如图1所示的理论模型。

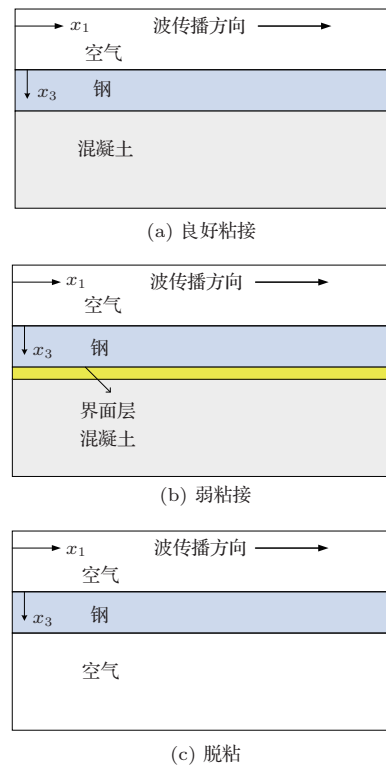


图1 钢-混凝土结构中导波传播模型

Fig. 1 Guided wave propagation model in steel-concrete structure

利用全局矩阵法^[7]建立层状各向同性固体中的声传播模型,通过层状介质中气-固界面及固-固界面处应力和位移连续性的边界条件,得到声波在固体层状结构中理论频散曲线及衰减曲线,分析声波在钢-混凝土层状粘接结构中的传播特性^[8-9]。其中各层参数属性如表1所示,其中, V_P 表示该层纵波波速, V_S 表示该层横波波速, ρ 表示密度^[10]。

当理论模型为如图1(a)所示时,矩阵方程通过式(1)表达:

$$[S] = \begin{bmatrix} [D_{1b}^-] & [-D_{2t}] \\ & [D_{2b}] & [-D_{3t}^+] \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中,上标“+”和“-”分别表示下行波和上行波, $[D_{jt}]$ 和 $[D_{jb}]$ 分别表示某一层的顶部和底部矩阵。

表1 各层材料参数

Table 1 Material parameters of each layer

材料	粘接状态	$V_P/(m \cdot s^{-1})$	$V_S/(m \cdot s^{-1})$	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$
钢		5800	3100	7850
混凝土		4066	2490	2400
界面层	良好粘接	4066	2490	2400
	弱粘接1	3049.5	1867.5	2400
	弱粘接2	1019.3	624.2	2400
	脱粘	343		1

当理论模型为如图1(b)所示时,矩阵方程通过式(2)表达:

$$[S] = \begin{bmatrix} [D_{1b}^-] & [-D_{2t}] \\ & [D_{2b}] & [D_{3t}] \\ & & [D_{3t}] & [-D_{4t}^+] \end{bmatrix}. \quad (2)$$

模态解的理论特征方程为

$$\det[S] = 0. \quad (3)$$

求解导波的频散曲线和衰减曲线即使频率、相速度和衰减量同时满足式(3),也即求解方程的零点。根据理论方程求得模态解、特征值,相速度和多层介质的导波衰减特性就可以确定。如图2(a)所示,钢层与混凝土层粘接良好中传播的波在单层半空间中表现为导波,通过改变界面层阻抗值来模拟钢层与混凝土层的之间粘接状态,每一层的阻抗值 Z 由式(4)计算得出:

$$Z = \rho V_P. \quad (4)$$

在不同的界面条件下寻找理论特征方程的波数,由于在上半空间是真空的情况下,上界面处的牵引必须为零,因此令上半空间的 $\rho = 0$ 并将 V_P 和 V_S 设置为任意非零值。根据已知的材料属性及厚度,通过求解全局矩阵方程可得到波数。实际上波数为复数,是其实部和虚部之和,可表示为式(5):

$$\mathbf{k} = \mathbf{k}_{Re} + i\mathbf{k}_{Im}, \quad (5)$$

其中, \mathbf{k}_{Re} 、 \mathbf{k}_{Im} 分别表示波数的实部和虚部。

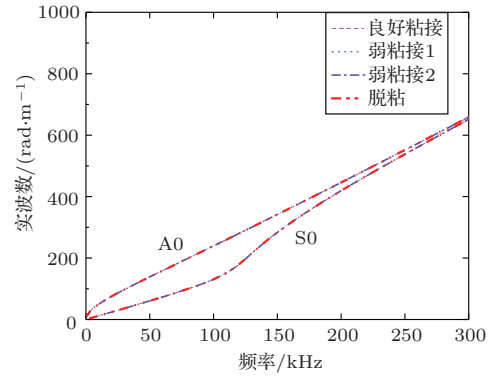
根据波数的实部和虚部可分别通过计算式(6)、式(7)得出相速度 c_p 和衰减量 α :

$$c_p = \frac{\omega}{\mathbf{k}_{Re}}, \quad (6)$$

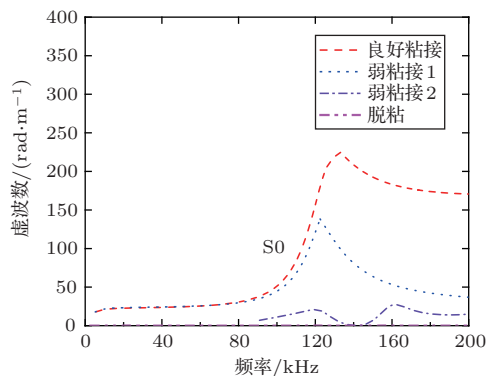
$$\alpha = -20 \lg e^{-\mathbf{k}_{Im}}, \quad (7)$$

其中, ω 为频率。

如图2(a)所示,频率-实波数曲线在界面层S0模态在界面层良好粘接、弱粘接及脱粘时,曲线无明显变化;A0模态在界面层良好粘接、弱粘接及脱粘时,曲线也无明显变化,难以区分界面的粘接状态。考虑到A0模态对界面粘接状态不敏感,因此理论虚波数(衰减)只考虑S0模态的情况。如图2(b)所示,观察到S0模态在界面层良好粘接、弱粘接及脱粘不同情况下曲线变化较明显。随着钢与混凝土之间界面层粘接变差,S0模态衰减量逐渐减小;同一粘接状态时,频率在80~125 kHz内,S0模态的衰减量单调递增。



(a) 理论实波数



(b) 理论虚波数

图2 不同界面粘接条件下的理论波数

Fig. 2 Theoretical wave number under different interface bonding conditions

2 有限元仿真及结果分析

2.1 有限元仿真模型

利用PZflex软件建立有限元模型,分析不同粘接条件S0模态的衰减特性。如图3所示,有限元模

型中钢层厚度为19 mm,混凝土层厚度为250 mm。为了消除边界反射的干扰,在有限元模型中加入吸收边界,有限元仿真参数如表2所示。

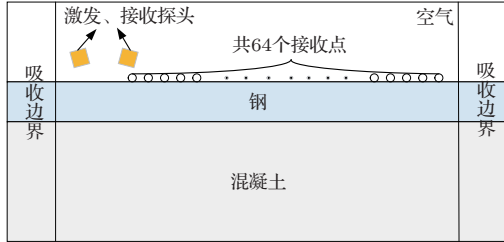


图3 有限元仿真模型

Fig. 3 Finite element simulation model

表2 有限元仿真模型参数

Table 2 Finite element simulation model parameters

材料	板尺寸/mm	时间步长/s	单元尺寸/mm	吸收边界尺寸/mm	探头距离板表/mm
钢板	600×500×19	7.5×10^{-5}	0.11	150	5

2.2 厚度为2 mm界面层的数据分析

根据理论衰减曲线的规律,选择S0模式衰减值最大时的频率为125 kHz,依据单层钢板在空气中

的频散曲线,如图4所示,选取入射角度为 4.9° ,接收点数64,接收点距离3 mm。由于板状结构中同时存在多个模式的Lamb波,需要通过二维傅立叶变换将幅度-时间曲线转换成频率-波数($f-k$)关系图,各个模式可以根据(频率,波数,幅值)的关系分离并进一步得到确认,这样就可以进行频散曲线的定量测量^[11]。为了更加清楚地观察到导波在钢-混凝土界面层中传播的各个模式,将有限元结果进行二维傅里叶变换,结果如图5所示。

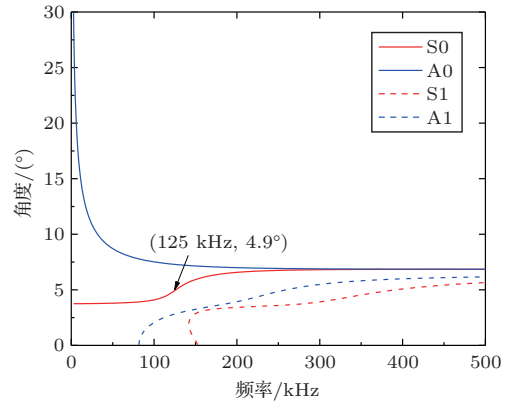


图4 钢板频散曲线

Fig. 4 Steel plate dispersion curve

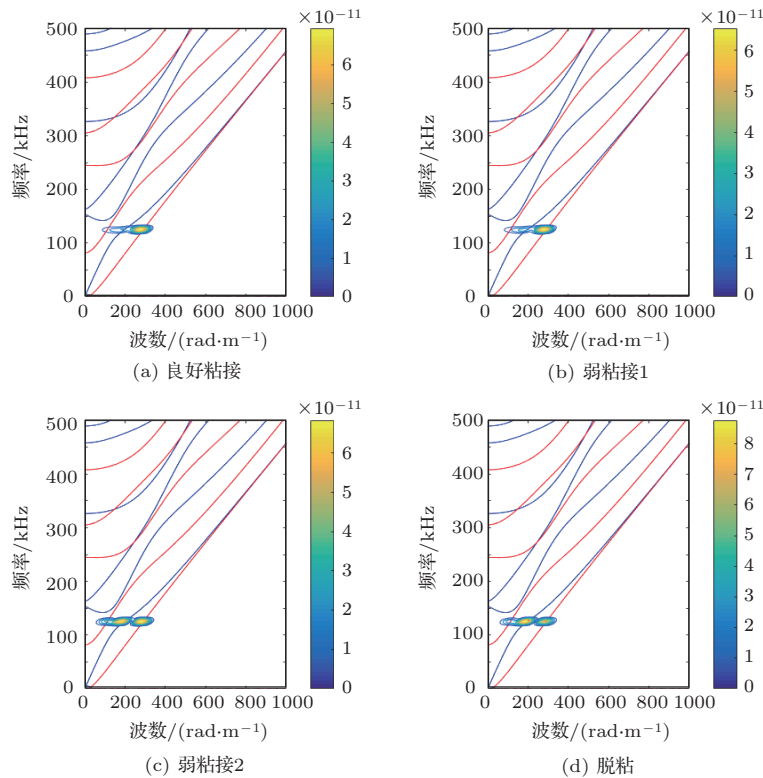


图5 不同粘接条件下傅里叶变换结果

Fig. 5 Fourier transform results under different bonding conditions

傅里叶变换结果表明：在钢-混凝土结构界面不同粘接条件下，A0 模态幅值变化不明显，S0 模态幅值变化明显。粘接良好时，由于 S0 模态在钢-混凝土层中表现出高衰减的特性，因此超声波早期大量泄漏至混凝土层中，在钢-混凝土界面层间几乎没有 S0 模态；然而随着粘接条件变差，S0 模态较少地泄漏至混凝土层，而在钢层与界面层间传播；钢层与混凝土层完全脱粘时，没有能量泄漏至混凝土层，仅在钢层中传播。根据此结果分析得出 S0 模态

可用来判断钢层与混凝土层的粘接状态。但仍需对粘接状态进行定量分析，因此对 S0 模态的幅值进行归一化处理，激发 f_C 的中心频率 $H(k_x, f)$ 处的波数谱，从 $f-k$ 域中的幅度谱中提取 A_{S0}^N (由式 (8) 计算)，得到不同粘接条件下的波数谱，如图 6 所示。将不同粘接条件下的 A_{S0}^N 结果提取得到图 7。

$$A_{S0}^N = A_{S0}/A_{A0}, \quad (8)$$

其中， A_{S0} 和 A_{A0} 分别是 $f-k$ 域中 S0 模态和 A0 模态的最大幅值。

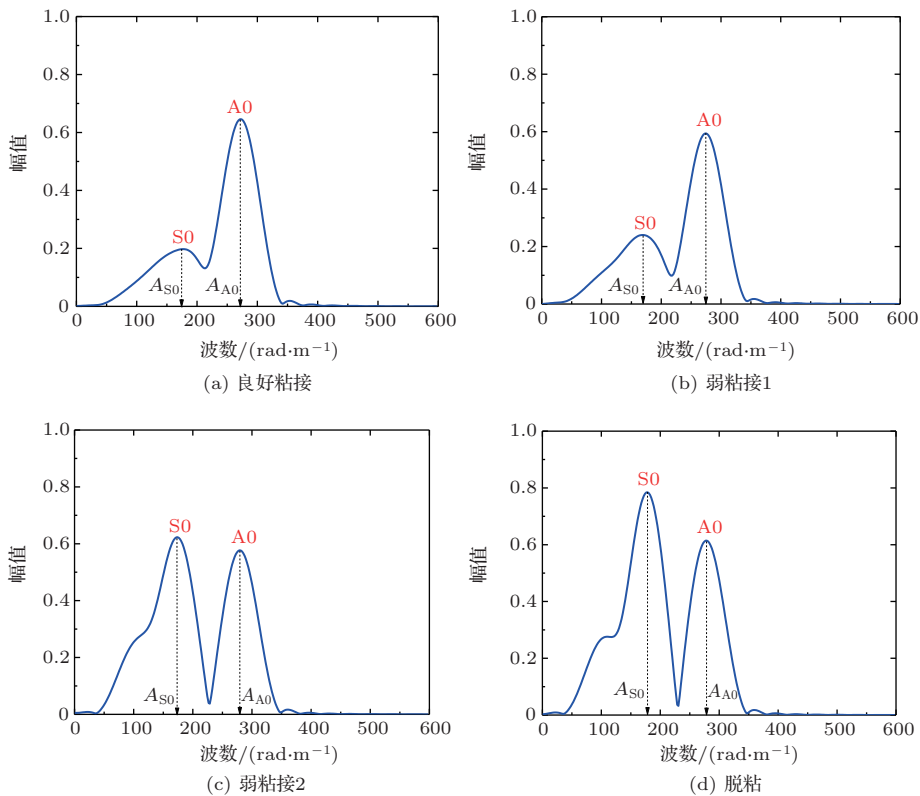


图 6 不同粘接条件的波数谱

Fig. 6 Wavenumber spectrum of different bonding conditions

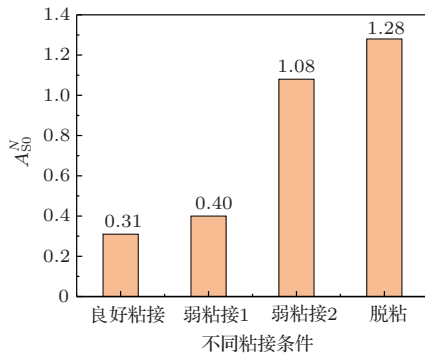


图 7 归一化 S0 幅值

Fig. 7 Normalized S0 amplitude

2.3 厚度为 1 mm 界面层的数据分析

上述所用界面层厚度为 2 mm，为研究界面层厚度对导波传播的影响，改变界面层厚度为 1 mm，得到的二维傅里叶变换结果如图 8 所示；不同粘接条件下的波数谱，如图 9 所示； A_{S0}^N 结果提取得到图 10。结果表明，随着界面粘接条件变差，A0 模态基本不受影响，而 S0 模态变化明显，这一结果与 2 mm 时保持一致。然而在同一粘接条件下，界面层厚度为 1 mm 的归一化幅值结果低于界面层厚度为 2 mm 时的情况。

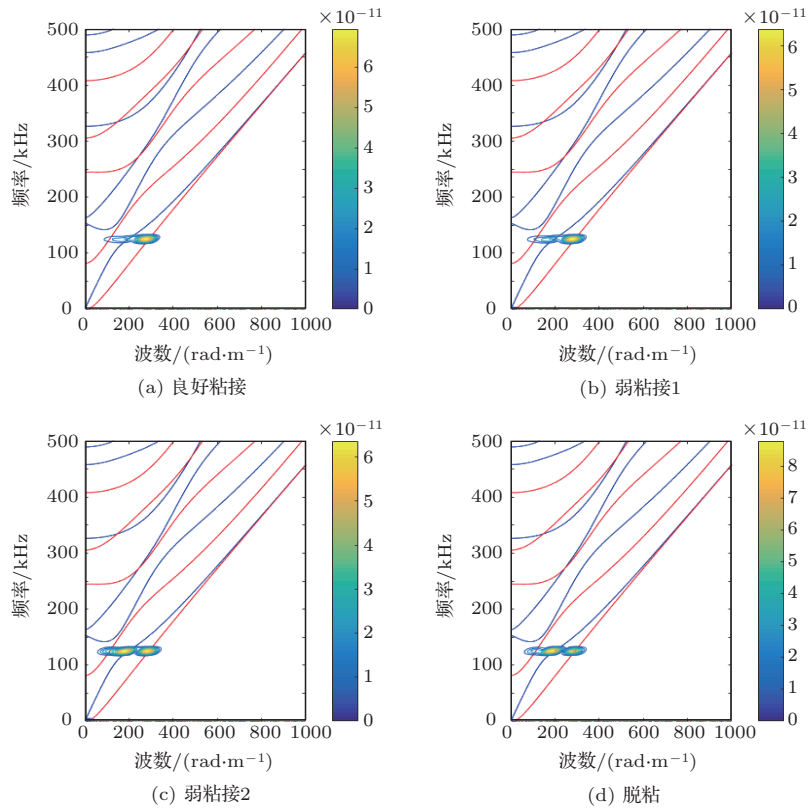


图8 不同粘接条件下傅里叶变换结果

Fig. 8 Fourier transform results under different bonding conditions

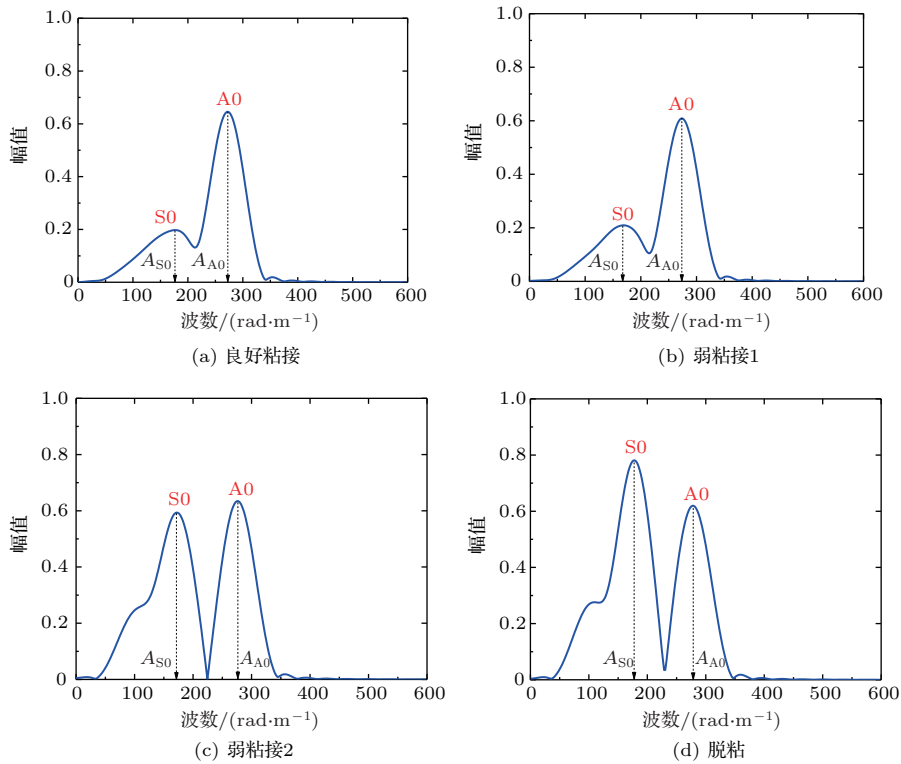


图9 不同粘接条件的波数谱

Fig. 9 Wavenumber spectrum of different bonding conditions

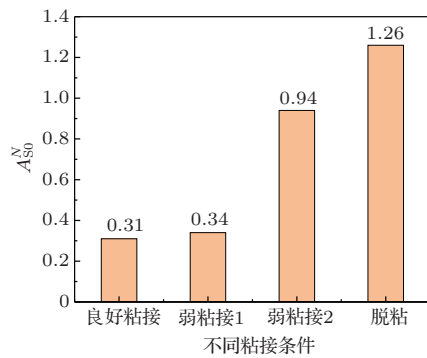


图10 归一化 S0 幅值

Fig. 10 Normalized S0 amplitude

3 结论

本文针对钢-混凝土结构在使用期间钢层与混凝土层之间易发生脱粘等现象,提出一种利用空气耦合超声导波衰减的方法检测与评估界面粘接质量,并研究不同厚度对导波衰减的影响。主要结论如下:

- (1) 在频率为 125 kHz、界面层厚度为 2 mm 时,随着粘接质量变弱,S0 模态的归一化幅值不断增大,A0 模态的归一化幅值无明显变化;
- (2) 在频率为 125 kHz、界面层厚度为 1 mm 时,随着粘接质量变弱,S0 模态与 A0 模态的归一化幅值与 2 mm 的情况一致;
- (3) 在频率为 125 kHz、同一界面粘接条件下,界面层厚度为 2 mm 的 A_{S0}^N 值高于 1 mm 的。

结果表明,利用 S0 模态的衰减可以检测到钢层与下层混凝土层之间隐藏的弱粘接及脱粘;同时发现较厚的界面层导致较低的衰减值。这为以后相似结构的检测提供了一种检测方法。

参 考 文 献

- [1] 田长彬,王静,张峰,等.用于桥梁钢管混凝土裂缝监测的 FBG 传感器研究[J].仪表技术与传感器,2017(9):20-23.
- [2] Tian Changbin, Wang Jing, Zhang Feng, et al. Study of fiber Bragg grating sensor for monitoring of concrete cracks in bridge steel tube[J]. Instrument Technique and Sensor, 2017(9): 20-23.
- [3] Renshaw J B, Lhota J R, Muthu N. Thermographic inspection of pipes, tanks, and containment liners[C]. AIP Conference Proceedings, 2015: 290-297.
- [4] Pan S S, Zhao X F, Zhang Z. Auto excitation-Based accelerometer array for interface separation detection of concrete-filled steel tubular arch bridge[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 578-579: 995-999.
- [5] Zhu J, Popovics J S. Non-contact imaging for surface-opening cracks in concrete with air-coupled sensors[J]. Materials & Structures, 2005, 38(9): 801-806.
- [6] Zhu J, Popovics J S. Application of air-coupled sensors to surface wave NDT in concrete[C]. AIP Conference Proceedings, 2006: 1500-1506.
- [7] 郑善朴,陆铭慧,王俊东,等.多层结构中脱粘缺陷的超声检测方法[J].应用声学,2019,38(1):134-141.
- [8] Zheng Shanpu, Lu Minghui, Wang Jundong, et al. Ultrasonic testing method for debonding defects in multilayer structures[J]. Journal of Applied Acoustics, 2019, 38(1): 134-141.
- [9] Lowe M J S. Matrix techniques for model in ultrasonic waves in multilayered media[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1995, 42(4): 525-542.
- [10] 张海燕,刘镇清,吕东辉.全局矩阵法及其在层状各向异性复合板中 Lamb 波传播特性研究中的应用[J].复合材料学报,2004,21(2):111-116.
- [11] Zhang Haiyan, Liu Zhenqing, Lyu Donghui. Global MATRIX and its application to study on Lamb wave propagation in layered anisotropic composite plates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(2): 111-116.
- [12] 张海燕,他得安,刘镇清.层状各向异性复合板中的兰姆波[M].北京:科学出版社,2008.
- [13] Ham S, Song H, Oelze M L, et al. A contactless ultrasonic surface wave approach to characterize distributed cracking damage in concrete[J]. Ultrasonics, 2017, 75: 46-57.
- [14] Alleyne D, Cawley P D. A two-dimensional Fourier transform method for the measurement of propagating multimode signals[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1990, 89(3): 1159-1168.