

基于振动声调制法的钢-混凝土界面损伤识别*

霍林生, 张涛, 赵楠, 杨卓栋

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室 大连, 116024)

摘要 针对传统的线性超声理论在钢-混凝土界面损伤检测中存在准确性低的问题,提出一种基于非线性超声调制理论的钢-混凝土界面损伤识别方法。首先,在钢管混凝土内部嵌入智能骨料以激发高频超声信号,同时利用外部电磁激振器施加低频振动,从而调制出在频域上具有非线性特征的超声信号;其次,在钢管外壁的3个不同位置粘贴传感器,用于接收并记录经过界面调制的响应信号;然后,利用万能试验机开展加载试验,诱导钢-混凝土界面产生不同程度的黏结失效,并定量分析界面裂缝扩展与损伤指标之间的变化规律;最后,通过对比分析验证该方法的有效性。结果表明:所提出的损伤指标随着裂缝的扩展呈现单调递增趋势,能够比传统的线性超声方法更准确地反映界面的损伤状况,为钢-混凝土组合结构的界面损伤检测提供了新的思路。

关键词 非线性超声;振动声调制;调制边频;钢-混凝土界面;压电陶瓷

中图分类号 TU398.9; TH707

引言

由于钢-混凝土组合结构可以充分发挥钢材和混凝土这两种材料的性能优势,因此在桥梁、超高层建筑及高耸结构等工程中应用广泛。然而,受设计、材料、施工及环境等因素影响,钢管内壁与核心混凝土的黏结界面易出现裂缝、黏结失效等损伤,导致界面黏结力失效,削弱了构件整体力学性能^[1]。因此,对钢-混凝土界面进行高效、准确的损伤检测具有重要的工程与经济价值。

目前,常见的界面损伤检测方法包括压电陶瓷传感技术^[2-4]、光纤光栅传感技术^[5]、声发射^[6]、红外热成像^[7-8]及敲击法^[9]等。其中,压电陶瓷(piezoelectric ceramics,简称PZT)因兼具驱动与传感功能,并具有成本低、灵敏度高优点,成为最常用的方法之一。该类方法多基于线性超声理论,对声阻抗差异明显的损伤敏感,但钢-混凝土界面本身具有不均匀、非线性及各向异性特征,使得线性超声检测在该应用中存在一定的局限。

当超声波通过具有黏结界面、裂缝等缺陷的区域时,接收信号会呈现非线性特征,如高次谐波、亚谐波、谐振频率偏移及振动声调制(vibration acoustic modulation,简称VAM)现象^[10]。这些特征蕴含损伤信息,可用于损伤识别与评估。在各类非线性

方法中,振动声调制法因抗干扰能力强、对微小损伤敏感,已被用于界面黏结质量^[11]、早期疲劳^[12]、裂纹^[13]及锈蚀^[14]等损伤的检测。Xu等^[15]提出了基于非线性超声调制的边带峰计数法,用于识别混凝土微裂纹扩展。文献[16-17]利用VAM技术有效识别了混凝土梁的微裂缝发展与界面开合状态。尽管线性超声方法对明显分层、黏结失效损伤检测有效,但难以识别微小缺陷^[18],VAM法虽然在微小损伤检测方面表现出优势,但在钢-混凝土界面损伤检测中还未见应用。

笔者基于振动声调制方法,开展了钢-混凝土界面损伤检测与识别研究。首先,通过设计加载试验使界面产生黏结失效,对未加载试件进行参数选取,并结合数码显微镜观测裂缝扩展;其次,提取VAM接收信号的频域特征,计算不同荷载工况下的非线性指标,从而建立非线性指标与界面损伤之间的映射关系。

1 检测方法及理论基础

1.1 界面损伤的检测方法

应用VAM进行损伤检测,需要同时发送低频和高频的超声信号。通常使用电磁激振器激励低频信号 f_1 作为振动模态,使裂缝产生周期性的开合,使

* 国家自然科学基金资助项目(5217082572)

收稿日期:2023-09-06;修回日期:2024-01-03

用智能骨料激励高频信号 f_2 作为损伤的探测信号^[16]。PZT 粘贴在钢管外壁用于接收信号。当结构处于健康状态或仅存在线性损伤时,接收信号频域中仅显示初始激励信号。当结构中存在非线性损伤时,这类损伤在微观接触面上存在许多以点接触或线接触为主的粗糙峰^[18-19]。当应力波穿过损伤界面时,会引起粗糙峰的振动、滑移,超声信号与损伤界面相互作用后产生畸变^[13]。在频域中可观察到明显的非线性超声特征,高频基频周围出现频率间隔为 $f_1 \pm f_2$ 的调制边频,同时也会出现低频基频和高频基频的高次谐波。图1为振动声调制技术原理图。调制边频的幅值与阶数随界面损伤程度变化而改变,由此判断界面的损伤程度^[17]。

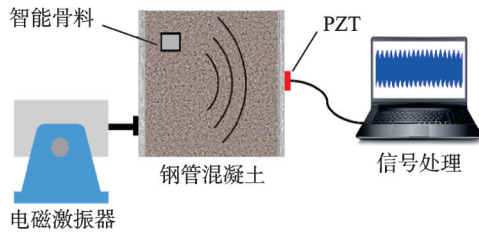


图1 振动声调制技术原理图

Fig.1 Steel-concrete interface damage detection principle

1.2 界面损伤的非线性超声调制原理

当结构中存在微小损伤时,可以将其视为非线性系统,界面接触刚度为随着裂缝宽度 ξ 变化的函数 $K(\xi)$ 。根据泰勒展开式^[15]可以写为

$$K(\xi) = K_0 + K_1\xi + K_2\xi^2 + K_3\xi^3 + \dots + K_n\xi^n \quad (1)$$

其中: K_0 为界面线性刚度; $K_1, K_2, \dots, K_n$ 为系统各阶界面接触非线性刚度,是反应材料损伤程度的重要指标。

由于式(1)中高阶项数值很小,因此实际应用中通常将 K_2 以上的高阶项忽略掉^[15]。

如果只考虑线性界面接触刚度 K_0 和一阶界面接触非线性刚度 K_1 ,则式(1)简化为

$$K(\xi) = K_0 + K_1\xi \quad (2)$$

裂缝上的应力可表示为

$$\Delta\sigma = K(\xi)\xi = K_0\xi + K_1\xi^2 \quad (3)$$

笔者将研究对象简化为界面裂缝的一维模型,含界面裂缝的试件如图2所示。假定裂缝的位置为 x_0 ,初始裂缝宽度为 H_0 ,且裂缝的2个等效接触面在损伤扩展过程中始终是平面且互相平行。沿试件激励2列频率为 ω_1 和 ω_2 的2列纵波,在杆件中激发的位移场为

$$u_1(x, t) = U_1(x) \cos \omega_1 t \quad (4)$$

$$u_2(x, t) = U_2(x) \cos \omega_2 t \quad (5)$$

其中: $U_1(x)$ 和 $U_2(x)$ 为声波信号引起不同位置的质点位移。

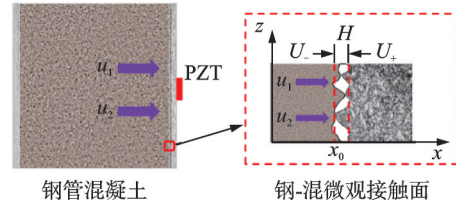


图2 含界面裂缝的试件

Fig.2 Specimens with interface cracks

实际裂缝尺寸相较激励信号波长小很多。应力波使裂缝的宽度发生变化,即

$$\xi = H \frac{\partial(u_1 + u_2)}{\partial x} = H \frac{dU_1}{dx} \Big|_{x=x_0} \cos \omega_1 t + H \frac{dU_2}{dx} \Big|_{x=x_0} \cos \omega_2 t \quad (6)$$

其中: H 为裂缝宽度相对变化量, $H = U_+ - U_-$, U_+ 和 U_- 为声波引起裂缝两侧的形变量。

将式(6)代入式(3),根据裂缝上应力与应变关系,得到声波信号引起的应力表达式为

$$\begin{aligned} \Delta\sigma = K_0 H \left(\frac{dU_1}{dx} \cos \omega_1 t + \frac{dU_2}{dx} \cos \omega_2 t \right) \Big|_{x=x_0} + \\ \frac{K_1 H^2}{2} \left(\frac{dU_1}{dx} \right)^2 \Big|_{x=x_0} \cos 2\omega_1 t + \\ \frac{K_1 H^2}{2} \left(\frac{dU_2}{dx} \right)^2 \Big|_{x=x_0} \cos 2\omega_2 t + K_1 H^2 \\ \frac{dU_1}{dx} \frac{dU_2}{dx} [\cos(\omega_1 + \omega_2)t + \cos(\omega_1 - \omega_2)t] \Big|_{x=x_0} + \\ \frac{K_1 H^2}{2} \left[\left(\frac{dU_1}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dU_2}{dx} \right)^2 \right] \Big|_{x=x_0} \end{aligned} \quad (7)$$

其中: $K_0 H$ 为低、高频的基频信号; $\frac{K_1 H^2}{2}$ 为低频和高频的二次谐波信号; $K_1 H^2$ 为右调制边频与左调制边频信号。

假设裂缝接触面积为 S ,裂缝各部分内力为

$$F_i = S \Delta\sigma_i \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5) \quad (8)$$

其中: $\Delta\sigma_1$ 为基频信号产生的应力; $\Delta\sigma_2$ 为高频基频二次谐波信号产生的应力; $\Delta\sigma_3$ 为低频基频二次谐波信号产生的应力; $\Delta\sigma_4$ 为调制边频信号产生的应力; $\Delta\sigma_5$ 为直流分量产生的应力。

这些内力又将产生新的应力波,这也是将裂缝

作为非线性声源的原因。胡海峰^[19]假定在裂缝处位移连续且应力发生突变,得到当 $x \geq x_0$ 时,透射波中高阶谐波分量及非线性调制边频分量 A_s 的最大振幅为

$$A_s \propto \frac{1-\nu^2}{E} K_1 \left(\frac{SH^2}{A_c} \right) A_1 A_2 \quad (9)$$

其中: E 为弹性模量; ν 为泊松比; A_c 为试件横截面积; A_1 为低频的基频幅值; A_2 为高频的基频幅值。

根据理论推导结果可知,非线性调制边频幅值与界面裂缝面积 S 呈一次线性关系,与界面裂缝宽度 H 呈二次方关系。增大激励高频和低频信号幅值,调制边频幅值也会相应增加。对式(9)分析可得,在试件损伤程度(S 、 H 、 E 、 ν)固定的情况下,一阶调制边频幅值可以简化为

$$\frac{A_s}{A_1 A_2} \propto \left[\frac{1-\nu^2}{E} \left(\frac{SH^2}{A_c} \right) \right] K_1 \quad (10)$$

式(10)表明,当界面损伤程度增加,其非线性接触刚度会增大,此时认为非线性接触刚度可以映射界面的损伤程度。为了更清晰地表征边频幅值的变化,选取对数坐标系进行数据处理。综合考虑多阶调制指数(modulation index, 简称 MI)确定损伤指标^[20-21]为

$$MI_q = \frac{\sum_{i=1}^q (A_{m+in} + A_{m-in})}{q} - A_m - A_n \quad (11)$$

其中: A_m 为低频基频幅值; A_n 为高频基频幅值; $A_{m \pm ni}$ 为调制边频幅值; q 为调制边带阶数。

图3为损伤指标组成部分的频域分布图。

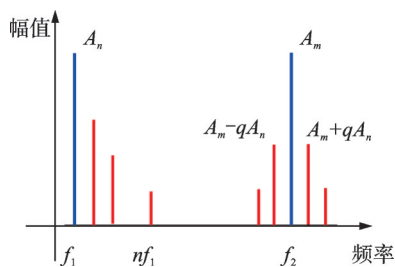


图3 损伤指标组成部分的频域分布图

Fig.3 The frequency domain distribution map of the damage index components

2 非线性振动声调制试验

2.1 试件和装置

钢管混凝土试件的长×宽×高为200 mm×200 mm×250 mm,核心混凝土浇筑高度为200 mm,预留的滑移距离为50 mm。核心混凝土设

计强度为C40,混凝土由42.5普通硅酸盐水泥、碎石、砂和水组成,配合比为463:1276:521:190。钢材型号为Q235方钢管,壁厚为3 mm。

钢管混凝土试件与电磁激振器固定在试验机底板,试件顶面放置钢垫块,用铁架台固定数码显微镜于钢管混凝土加载端顶面,以观察钢管和混凝土界面之间加载端裂缝损伤的变化情况。试验装置如图4所示。

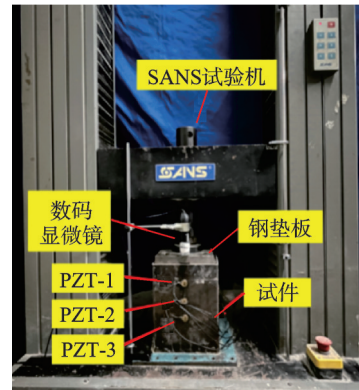


图4 试验装置

Fig.4 Experimental setup

图5为试验装置示意图。试验仪器包括笔记本电脑、AFG1022波形发生器、HF-2100高频功率放大器、YE5872A型功率放大器、JZK-20型电磁激振器、数据采集卡(NI-USB 6366)、万能试验机(量程为10 t)和USB数码显微镜。钢管混凝土内部预埋压电智能骨料,钢管外壁粘贴3个PZT-5H型压电陶瓷片。智能骨料是由混凝土包裹的PZT-5H型压电陶瓷片,压电陶瓷传感器分别命名为PZT-1、PZT-2和PZT-3。

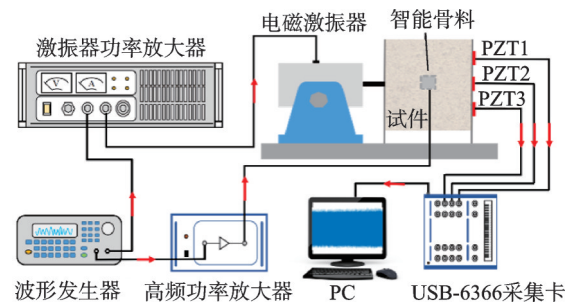


图5 试验装置示意图

Fig.5 Connection diagram of test device

2.2 试验步骤

非线性振动声调制试验主要步骤如下。

1) 确定电磁激振器与压电智能骨料激励参数,建立试验基准,依次确定高频激励频率、低频激励频

率、低频激励电流和高频激励电压,并设置 3 个低频激振力作为变量。

2) 开展逐级加载试验,通过界面黏结滑移试验制造不同程度的界面损伤。采取力控加载方式,加载步长为 2 kN。加载速度为 2 kN/min,每级荷载保载 600 s。荷载保持稳定时使用振动声调制法进行检测,智能骨料激发高频信号,电磁激振器激发低频信号,采用外贴压电陶瓷传感器 PZT-1、PZT-2 和 PZT-3 接收信号。经数据采集卡采集传输到笔记本电脑的信号采集程序中,采样率设为 500 kHz,采样间隔为 1 s。

3) 直至界面发生非线性滑移,停止加载。

4) 对接收信号进行处理与分析,得到试验结果。

2.3 激励参数选取

为了确定最优激励参数,在试件无损状态下进行振动声调制扫频测试。扫频信号由智能骨料发射,频率范围为 20 kHz~40 kHz,幅值为 7 V,持续时间为 1 s。图 6 为智能骨料扫频时 PZT-1 接收信号频域图。可以看出,在 37 010 Hz 处出现最大响应峰值。经综合比较,最终选取 37 kHz 作为高频激励频率。

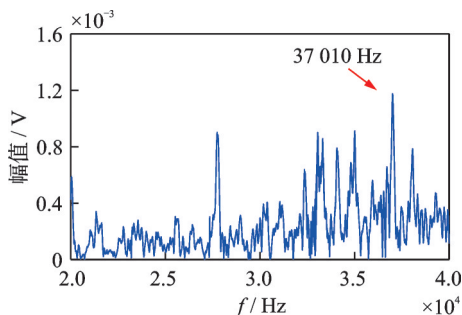


图 6 智能骨料扫频时 PZT-1 接收信号频域图

Fig.6 Frequency domain diagram of low frequency sweep signals of receiving sensors at different positions

低频激励频率的选取同样通过扫频测试完成。扫频信号由电磁激振器激发,其参数设置如下:频率范围为 10 Hz~4 kHz,激励电流为 2 A(对应的激振力为 28.6 N),信号持续时间为 1 s。电磁激振器扫频时 PZT-1 接收信号频域图如图 7 所示。可以看出,在 813 Hz 和 1 845 Hz 处出现了显著的响应峰值。

为探究低频激励频率对损伤指标的影响,在幅值较大的 700~2500 Hz 频带内,以 100 Hz 为间隔进行逐点激励测试。试验参数设定为:低频激励电流为 2 A,高频激励频率为 37 kHz、幅值为 8 V。不同低频对损伤指标的影响如图 8 所示。总体而言,损伤指标随着低频激励频率的升高呈下降趋势。值得

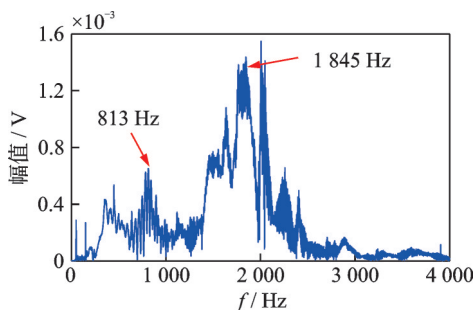


图 7 电磁激振器扫频时 PZT-1 接收信号频域图

Fig.7 Frequency domain diagram of PZT-1 received signal during sweep of electromagnetic exciter

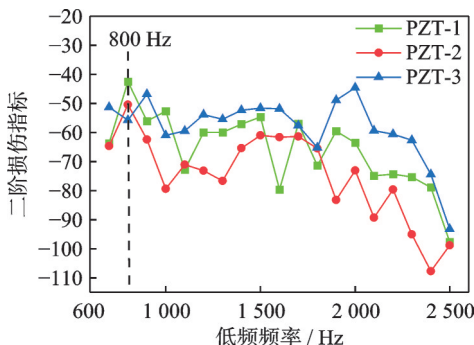


图 8 不同低频对损伤指标的影响

Fig.8 The influence of low frequency on damage index

注意的是,3 条曲线均在 800 Hz 附近出现一个明显的局部峰值,表明该频率成分对界面非线性响应有较强的激发效果。尽管 PZT-3 传感器的数据变化规律与其他二者存在一定差异,但考虑到所有传感器接收的是同一激励源信号,且 800 Hz 处的峰值响应在整体趋势中最为显著,因此本研究最终选定 800 Hz 作为低频激励频率。

为确定最优低频激励电流,控制电磁激振器的输出电流来调节激振力(电流每增加 1 A,激振力相应增加 14.3 N)。在固定低频激励频率为 800 Hz、高频激励为 37 kHz/8 V 的条件下,将激励电流从 0.5 A 以 0.5 A 为步长逐步增加至 6 A。不同低频激励电流对调制边频幅值的影响如图 9 所示,各曲线均呈现先快速上升、后趋于平缓的趋势。这表明,边频幅值最初随着激振力的增大而增大,但当激振力超过一定阈值后,界面裂缝的开合位移达到饱和,导致边频幅值不再显著增加,曲线因而进入平台区。基于上述规律,选取上升段与平台区之间的转折点所对应的电流值 3.5 A 作为最终的低频激励电流。

为确定高频激励电压,在固定低频激励(800 Hz, 3.5 A)与高频激励频率(37 kHz)的条件下,将激励电压从 1 V_{pp} 以 1 V_{pp} 为步长逐步增加至 10 V_{pp}。不同高频电压对调制边频幅值的影响如图

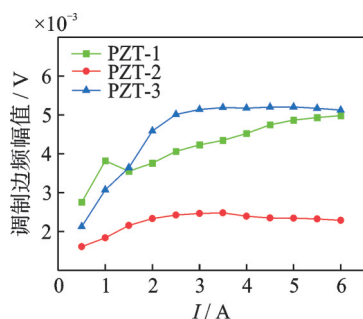


图9 不同低频激励电流对调制边频幅值的影响

Fig.9 The influence of different low frequency excitation current on the amplitude of modulation side frequency

10所示。曲线整体呈现先线性增长、后逐渐饱和的趋势。较高电压有助于增强非线性调制效应,使边频在频谱中更易于识别;但当电压超过一定值后,边频幅值增长趋于平缓,表明激励效率达到稳定。基于该饱和趋势的起始拐点,最终选取8 V_{pp}作为高频激励电压。

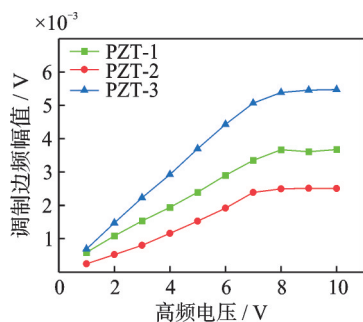


图10 不同高频电压对调制边频幅值的影响

Fig.10 The influence of different high frequency voltage on the modulation side frequency amplitude

为建立试验的内部对照,进一步观察损伤指标随激振力的变化规律,增设了1、2和3.5 A这3个水平的低频激励电流,其对应的激振力分别为14.3、28.6和50.05 N。

3 试验结果与分析

3.1 裂缝面积

使用USB数码显微镜对不同荷载下钢-混凝土界面在加载端的裂缝扩展情况进行观测。结合荷载-位移曲线可知,试件在荷载达到19 kN时界面黏结力完全失效并迅速发生滑移。为量化裂缝宽度,在每个荷载工况下选取3处扩展较为显著的位置进行测量,并以其平均值作为该工况下裂缝宽度的代表值。

裂缝扩展具有不均匀性,仅凭显微镜直接测量

难以准确反映其整体尺寸。为了更精确地量化钢-混凝土界面裂缝的扩展情况,本研究采用基于图像处理的二值化分析方法。首先,依据裂缝区域与完整材料在图像中的像素灰度差异设定合适阈值,将原始图像转换为二值图像;其次,统计二值图中代表裂缝的黑色像素数量,将其作为该荷载工况下裂缝扩展程度的量化指标。图11为不同荷载工况下的裂缝图,展示了在不同荷载工况下的典型图像处理结果。其中:图11(a)~(d)为原始显微图像;图中的数值表示裂缝宽度;图11(e)~(h)为对应的二值化图像,图中的黑色区域即为钢-混凝土界面裂缝,图中的数值为黑色像素点的数量。

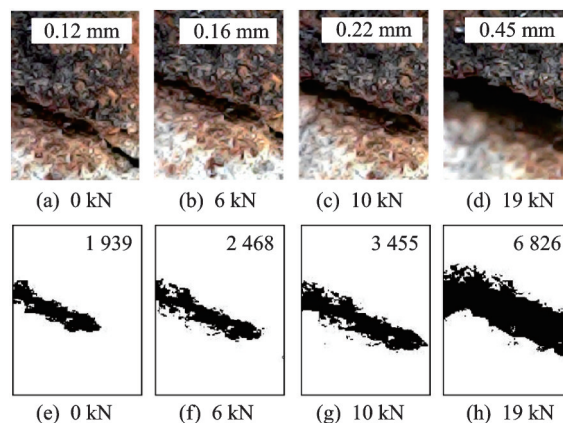


图11 不同荷载工况下的裂缝图

Fig.11 The crack diagram under different load conditions

从图11可以看出,在未加载状态下钢-混凝土界面就存在初始裂缝。将黑色像素点数量转换为裂缝真实损伤面积,得到界面损伤程度如表1所示。不同工况下荷载与裂缝面积关系如图12所示。可见,裂缝面积随着荷载的增大而增大。加载端裂缝面积变化也间接表征了钢-混凝土界面之间的损伤情况。

表1 界面损伤程度

Tab.1 The degree of interface damage

荷载/kN	裂缝宽度/mm	黑色像素点数量	真实裂缝面积/ mm^2
0	0.12	1 939	0.086 2
2	0.12	1 961	0.087 2
4	0.13	2 005	0.089 1
6	0.16	2 486	0.110 5
8	0.17	2 994	0.133 0
10	0.22	3 455	0.153 5
12	0.23	3 780	0.168 0
14	0.24	4 360	0.193 7
16	0.27	5 051	0.224 4
18	0.38	5 457	0.242 5
19	0.45	6 826	0.303 3

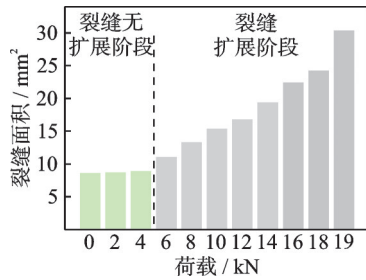


图12 荷载与裂缝面积关系

Fig.12 Relationship between load and crack area

3.2 接收信号

选取传感器 PZT-1 在低频激励电流为 3.5 A 条件下采集的 VAM 信号进行分析,识别其时域与频域特征。图 13 为不同荷载工况下 VAM 接收时域信号。随着荷载增加,接收信号的时域幅值呈现明显衰减。图 14 为不同荷载工况下 VAM 接收频域信号,可观察到显著的非线性调制效应。鉴于一阶及

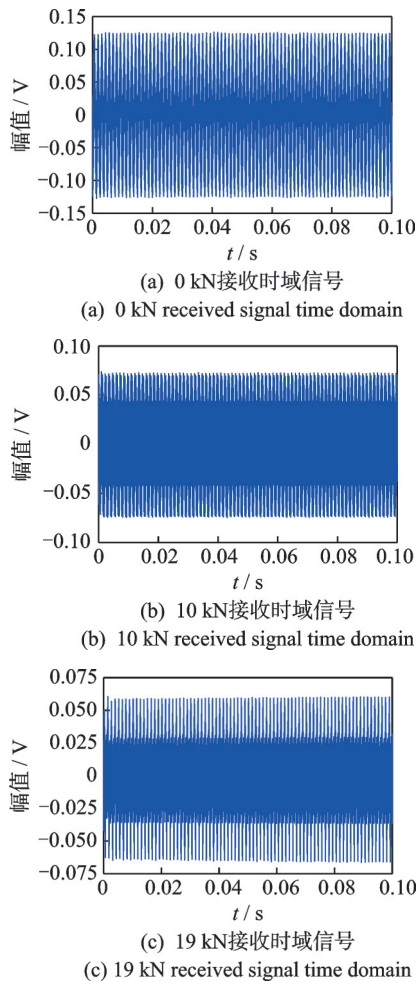


图13 不同荷载工况下 VAM 接收时域信号

Fig.13 VAM receive time domain signals under different load conditions

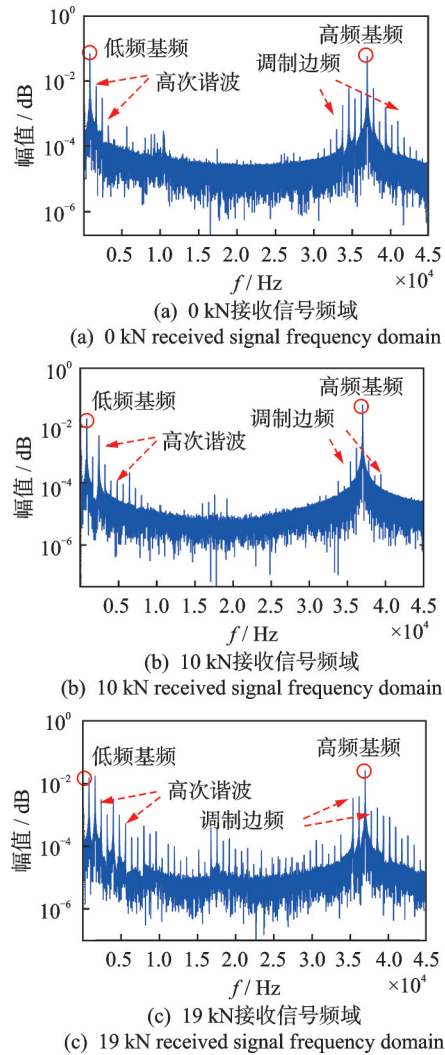


图14 不同荷载工况下 VAM 接收频域信号

Fig.14 VAM receives frequency domain signals under different load conditions

二阶调制边频的幅值对损伤演化响应灵敏,本研究基于式(11),采用同时包含一阶与二阶调制边带信息的损伤指标进行量化分析。

3.3 损伤识别结果

基于 VAM 法对不同荷载工况下的钢-混凝土界面损伤状态进行检测,并绘制了各传感器损伤指标随荷载变化曲线,如图 15 所示。

根据式(9)的分析结果可知,损伤指标在加载过程中呈现3个阶段的变化规律:第1阶段,荷载突增使更多激励信号透射到接收 PZT,损伤指标上升;第2阶段,随着轴向荷载继续增加,钢管约束反力增大,界面压力增强使原有张开或半闭合裂缝趋于完全闭合,非线性效应减弱,损伤指标下降,此阶段界面黏结力尚未失效;第3阶段,界面黏结力开始失效,随着荷载进一步增大与界面损伤持续发展,损伤

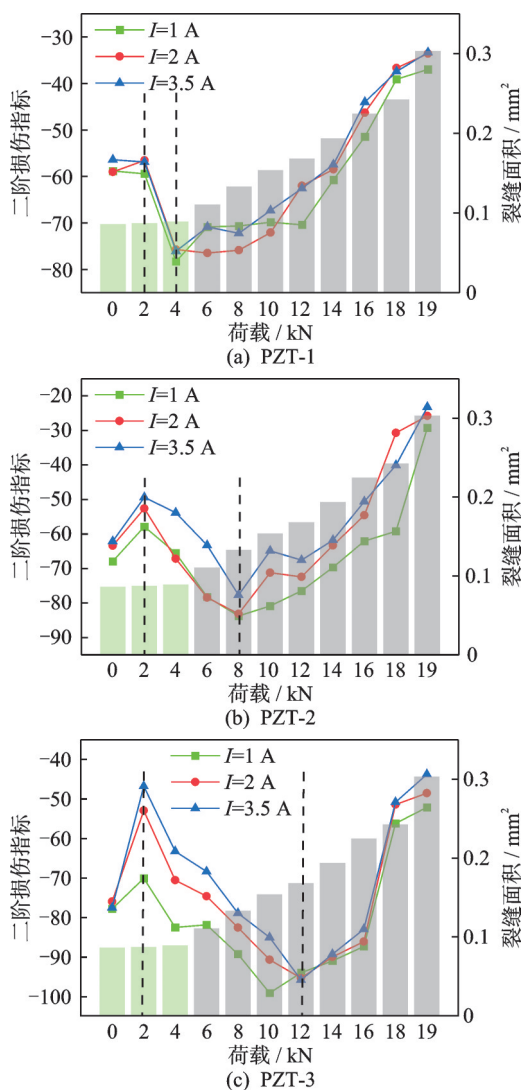


图15 各传感器损伤指标随荷载变化曲线

Fig.15 The damage index curves of different sensors under different load conditions

指标再度上升并持续增长。根据试验结果可知,对应于PZT-1、PZT-2和PZT-3位置的界面黏结力起始失效荷载分别为4 kN、8 kN和12 kN。

3.4 拟合结果

根据试验结果可知,3个传感器在界面黏结力失效后,其非线性损伤指标均随着裂缝面积的增大而单调递增。基于此规律,选取各曲线第3阶段的数据进行线性拟合,得到界面裂缝面积与损伤指标之间的线性关系。图16为裂缝面积与损伤指标的线性拟合结果。在不同低频激振电流下,3个传感器对应的拟合曲线均表现出良好的线性回归效果。将该拟合关系用于钢-混凝土界面损伤评估时,即使存在一定计算偏差,在裂缝面积较大时也多表现为对损伤程度的高估,从而使评估结果偏于安全,具有

一定的工程实用性与参考价值。

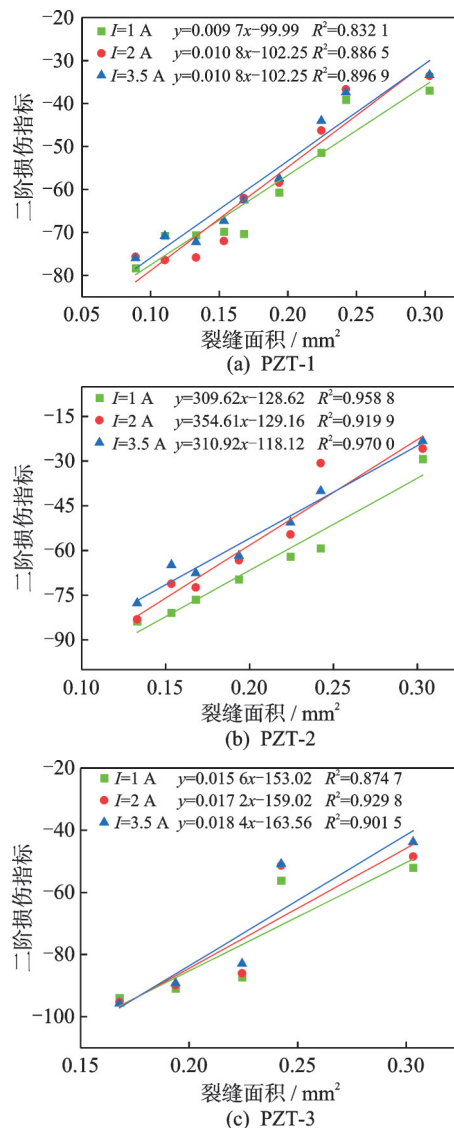


图16 裂缝面积与损伤指标的线性拟合结果

Fig.16 Linear fitting results of crack area and damage index

3.5 线性检测结果对比

在正式试验加载中,除非线性振动声调制法之外,同时也采用线性小波包能量法进行检测。

对接收信号进行5层小波包分解,提取能量特征,得到不同荷载下小波包能量比的变化曲线如图17所示。结果表明,3个传感器的能量比均呈现先上升后下降的趋势。当荷载由0增加至10 kN时,能量比随之上升;荷载从10 kN继续增至19 kN时,能量比逐渐下降,这主要是由于裂缝界面处空气声阻抗较大,导致信号能量衰减造成;在16 kN~19 kN荷载区间内,能量比的衰减幅度趋于平缓。

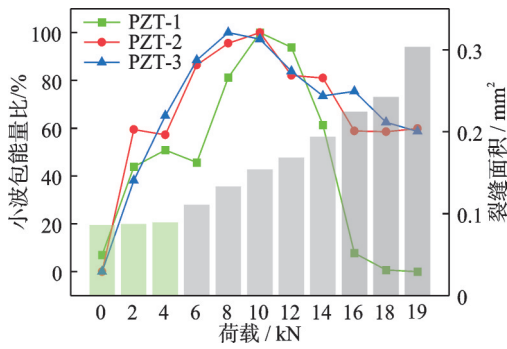


图 17 不同荷载工况下接收信号小波包能量比变化曲线
Fig.17 The wavelet packet energy ratio change curve of the received signal under different load conditions

4 结 论

1) 调制边频幅值与裂缝宽度的平方 H^2 和裂缝面积 S 呈正比,调制边频对钢-混凝土界面损伤改变很敏感,可作为表征界面损伤程度的特征参数,且裂缝面积与损伤指标具有良好的线性拟合关系。

2) 振动声调制技术可以有效区分不同程度的黏结失效界面。

3) 基于非线性超声特征的振动声调制法对钢-混凝土界面损伤改变十分敏感,可以准确反映传感器所处位置黏结失效时对应荷载。

参 考 文 献

[1] ZHANG K, LIU Y, WU X, et al. Development on disengaging mechanism and testing technology of the interface of concrete filled steel tube[J]. Concrete, 2013, 7(6):154.

[2] 许颖,曹宇萌,刘欢.宽频非线性超声法在混凝土扩展微裂纹的应用[J].振动、测试与诊断, 2024, 44(3): 523-529.

XU Ying, CAO Yumeng, LIU Huan. Application of broadband nonlinear ultrasonic method in expanding microcracks in concrete[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2024, 44(3): 523-529. (in Chinese)

[3] 张柳煜,申超强,何江波.采用压电陶瓷检测预应力管道灌浆质量方法[J].振动、测试与诊断, 2025, 45(4): 690-697.

ZHANG Liuyu, SHEN Chaoqiang, HE Jiangbo. Method for detecting grouting quality of prestressed pipe using piezoelectric ceramics[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2025, 45(4): 690-697. (in Chinese)

[4] 章栩苓,周正东,毛玲,等.基于CFRP-DDRCNN的CFRP缺陷检测方法[J].振动、测试与诊断, 2025,

45(3):589-593.

ZHANG Xuling, ZHOU Zhengdong, MAO Ling, et al. CFRP defect detection method based on CFRP-DDRCNN [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2025, 45(3): 589-593. (in Chinese)

[5] 张小栋,谢思莹,牛杭,等.光纤动态检测技术的研究与进展[J].振动、测试与诊断, 2015, 35(3):409-416.

ZHANG Xiaodong, XIE Siying, NIU Hang, et al. Research and progress of optical fiber dynamic detection technology [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(3): 409-416. (in Chinese)

[6] 汪家送,顾建祖,骆英,等.螺旋肋钢丝与混凝土粘结滑移的声发射检测[J].无损检测, 2009, 31(10): 806-809.

WANG Jiasong, GU Jianzu, LUO Ying, et al. Acoustic emission detection of bond slip between spiral ribbed steel wire and concrete[J]. Nondestructive Testing, 2009, 31(10):806-809. (in Chinese)

[7] 许颖,王青原,罗聪聪,等.基于激光热激励红外热成像纤维增强聚合物复合材料加固混凝土结构界面损伤无损检测[J].复合材料学报, 2020, 37(2):472-481.

XU Ying, WANG Qingyuan, LUO Congcong, et al. Non destructive testing of interface damage in reinforced concrete structures using laser thermal excitation infrared thermal imaging fiber reinforced polymer composite materials [J]. Journal of Composite Materials, 2020, 37(2): 472-481. (in Chinese)

[8] 曹彦鹏,张圆圆,杨将新.非制冷红外热成像测温关键技术研究[J].振动、测试与诊断, 2024, 44(2):209-216.

CAO Yanpeng, ZHANG Yuanyuan, YANG Jiangxin. Key technologies research for temperature measurement of uncooled infrared thermal imaging[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2024, 44(2): 209-216. (in Chinese)

[9] 周云,裴熠麟,刘蒙.基于非接触式麦克风冲击共振测试的钢-混组合结构界面脱空损伤识别方法研究[J].地震工程与工程振动, 2020, 40(1):67-79.

ZHOU Yun, PEI Yilin, LIU Meng. Research on the identification method of interface void damage in steel-concrete composite structures based on non-contact microphone impact resonance testing[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2020, 40(1): 67-79. (in Chinese)

[10] JHANG K Y. Nonlinear ultrasonic techniques for nondestructive assessment of micro damage in material: a review[J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2009, 10(1): 123-135.

[11] YAN D, DRINKWATER B W, NEILD S A. Measurement of the ultrasonic nonlinearity of kissing

- bonds in adhesive joints [J]. *Ndt & E International*, 2009, 42(5):459-466.
- [12] 焦敬品, 李立, 高翔, 等. 金属板疲劳损伤非线性兰姆波混频检测[J]. *声学学报*, 2022, 47(2):256-265.
- JIAO Jingpin, LI Li, GAO Xiang, et al. Nonlinear Lamb wave mixing detection of fatigue damage in metal plates [J]. *Acta Acustica*, 2022, 47(2):256-265. (in Chinese)
- [13] 屈文忠, 李拯, 王芝, 等. 基于非线性超声调制方法的损伤识别与定位[J]. *振动、测试与诊断*, 2016, 36(5):852-857.
- QU Wenzhong, LI Zheng, WANG Zhi, et al. Damage identification and localization based on nonlinear ultrasonic modulation method [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2016, 36(5):852-857. (in Chinese)
- [14] 徐略勤, 陈叙先, 周建庭, 等. 钢筋锈蚀对RC固端梁振动特性的影响[J]. *振动、测试与诊断*, 2023, 43(5):967-973.
- XU Lueqin, CHEN Xuxian, ZHOU Jianting, et al. The effect of steel corrosion on the vibration characteristics of RC fixed end beams [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2023, 43(5):967-973. (in Chinese)
- [15] XU Y, WANG Q, JIANG X, et al. Nondestructive assessment of microcracks detection in cementitious materials based on nonlinear ultrasonic modulation technique [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 267:121653.
- [16] 阎石, 崔赛杰, 王鲁, 等. 非线性振动声调制的混凝土梁微裂缝损伤检测试验[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2022, 38(3):385-392.
- YAN Shi, CUI Saijie, WANG Lu, et al. Experimental study on micro crack damage detection in concrete beams using nonlinear vibration sound modulation [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science Edition)*, 2022, 38(3):385-392. (in Chinese)
- [17] 陈小佳, 金京文. 基于振动超声调制的混凝土裂缝行为表征试验研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2023, 47(3):510-514.
- CHEN Xiaojia, JIN Jingwen. Experimental study on concrete crack behavior characterization based on vibro-acoustic modulation method [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)*, 2023, 47(3):510-514. (in Chinese)
- [18] 安志武, 王小民, 毛捷, 等. 粘接界面的非线性弹簧模型及试验验证[J]. *声学学报*, 2010, 35(5):481-487.
- AN Zhiwu, WANG Xiaomin, MAO Jie, et al. Nonlinear spring model and experimental verification of adhesive interface [J]. *Acta Acustica*, 2010, 35(5):481-487. (in Chinese)
- [19] 胡海峰. 板状金属结构健康监测的非线性超声理论与关键技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2011.
- [20] DONSKOY D, SUTIN A, EKIMOV A. Nonlinear acoustic interaction on contact interfaces and its use for nondestructive testing [J]. *NDT & E International*, 2001, 34(4):231-238.
- [21] PIECZONKA L, KLEPKA A, MARTOWICZ A, et al. Nonlinear vibroacoustic wave modulations for structural damage detection: an overview [J]. *Optical Engineering*, 2015, 55(1):011005.



第一作者简介:霍林生,男,1975年5月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为结构振动控制与健康监测。曾发表《Vibration acoustic modulation for bolt looseness monitoring based on frequency-swept excitation and bispectrum》(《Smart Materials and Structures》2023, Vol.23, No.3)等论文。

E-mail: lshuo@dlut.edu.cn