

# 基于 MASW 的钢-混凝土组合板界面 剥离损伤识别

阎石,于水旺,王鲁,崔赛杰

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 提出一种基于多通道面波分析技术(MASW)的钢-混凝土组合板界面剥离损伤识别方法。方法 从 Rayleigh 波的波动方程出发,结合 MASW 技术建立钢-混凝土组合板有限元模型,通过激励正弦信号产生 Rayleigh 波,研究其波速衰减特征,并提出基于波速衰减的 MASW 损伤识别算法;搭建 MASW 试验平台,建立多通道超声面波检测系统,并进行多道信号采集和数据处理,验证所提出算法的有效性。结果 数值模拟中,组合板的界面剥离损伤使表面波产生“分流”现象并造成表面波速度衰减,其衰减幅度与剥离长度密切相关;MASW 试验中,表面波在损伤区域发生了较大程度的波速衰减,其波速衰减的起始道间与剥离损伤的起点和终点相对应。结论 波速衰减幅度与剥离长度近似呈正相关的线性关系,所提出的损伤识别方法能够确定剥离损伤的具体范围,识别精度达到厘米级。

**关键词** 钢-混凝土组合板;多通道面波分析技术(MASW);界面剥离损伤;Rayleigh 波;表面波波速衰减;损伤识别算法

中图分类号 TU391

文献标志码 A

## MASW-Based Interfacial Debonding Damage Identification of Steel Concrete Composite Plates

YAN Shi, YU Shuiwang, WANG Lu, CUI Saijie

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** A method for identifying debonding damage at the interface of steel-concrete composite slabs based on multi-channel analysis of surface wave technology (MASW) is proposed in the paper. Starting from the Rayleigh wave equations, combined with MASW technology, a finite element model of the steel-concrete composite slab is established. The Rayleigh wave is generated by exciting a sinusoidal signal, its wave velocity attenuation characteristics are studied, and a MASW damage identification method based on wave velocity attenuation is proposed. Build a

收稿日期:2021-05-06

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0705602)

作者简介:阎石(1962—),男,教授,博士研究生导师,主要从事结构健康监测技术等方面研究。

MASW test platform, establish a multi-channel ultrasonic surface wave detection system, and perform multi-channel signal acquisition and data processing to verify the effectiveness of the proposed method. In the numerical simulation, the interfacial debonding damage of the composite plate resulted in both the “shunting” phenomenon and the velocity attenuation of the surface wave, and the attenuation amplitude is closely related to the debonding length. In the MASW test, the surface wave velocity is observed to a greater extent in the damaged area, and the initial track of the wave velocity attenuation corresponds to the start and end points of the debonding damage. The attenuation amplitude of wave velocity is approximately positively correlated with the debonding length. The proposed damage identification method can be used to determine the specific range of debonding damage, and the recognition accuracy reaches the centimeter level.

**Key words:** steel-concrete composite plates (SCCP); multi-channel analysis of surface wave (MASW) technique; interfacial debonding damage; Rayleigh wave; surface wave velocity attenuation; damage identification algorithm

钢 - 混凝土组合结构 (Steel-Concrete Composite Structures, SCCS) 能够发挥钢和混凝土各自的优点, 增加结构强度和变形能力, 表现出优越的力学性能<sup>[1-2]</sup>, 常作为重要承重构件广泛应用于结构体系之中<sup>[3-5]</sup>。然而, 由于混凝土浇筑不均匀、收缩、徐变等原因导致 SCCS 界面产生剥离损伤, 将削弱其组合效果, 从而降低其承载能力和刚度<sup>[6]</sup>, 严重时会导致结构构件破坏。因此, 采用有效便捷的方法对其界面损伤进行识别, 具有重要意义。

对于 SCCS 界面剥离损伤的识别问题, 国内外学者进行了大量研究并取得了丰硕成果<sup>[7-10]</sup>。近年来, SCCS 界面损伤识别技术取得了较大发展。目前, 常用方法主要有超声检测法、振动测量法、压电阻抗法、嵌入式压电波动法以及表面压电波动法等。杨乐<sup>[11]</sup>提出一种避免超声波沿钢板发生绕射的超声检测方法, 并开展了 1:1 型钢混凝土巨型梁柱节点损伤识别试验, 验证了该方法的可行性。侯忠明<sup>[12]</sup>应用曲率模态分析方法, 对钢 - 混凝土组合梁的抗剪连接件进行了损伤识别。艾德米<sup>[13]</sup>利用压电阻抗法诊断结构损伤, 提出了基于电导信号特征的 PZT 损伤诊断方法, 并进行了试验研究。黄廷剑<sup>[14]</sup>进行了钢筋混凝土框架边节点构件的拟静力试验, 利用嵌入式压电功能元件对

构件的损伤发展情况进行了监测。杨映泉等<sup>[15]</sup>提出一种基于表面波动测量的界面剥离缺陷识别方法, 初步检测了钢管的界面剥离缺陷。虽然这些方法能够初步判别剥离损伤的程度, 在工程应用中较为广泛, 但是这些方法仍然存在对损伤敏感度不高、识别精度低、易受环境干扰和工程应用不方便等问题, 不能判断剥离损伤的具体位置, 无法实现真正意义上的界面损伤识别。

传统的多通道面波分析 (Multi-channel Analysis of Surface Wave, MASW) 技术, 是在分析水平传播 Rayleigh 波 (R 波) 的基础上, 确定近地表剪切波波速剖面的地震勘探方法, 多用于地质勘察、结构抗震分析、海堤结构质量检测等工程领域<sup>[16-17]</sup>。但随着无损检测技术不断发展, 国内外的学者逐渐尝试将 MASW 技术应用到组合结构的损伤识别的研究中。2019 年, A. P. Jaganathan<sup>[18]</sup>利用点撞击产生的纵波和周波对钢筋混凝土管片进行多通道面波分析, 初步验证了 MASW 方法对钢管混凝土构件损伤识别的有效性。笔者结合 MASW 技术研究现状, 提出一种基于 MASW 的 SCCS 界面剥离损伤识别方法, 通过数值模拟分析, 建立基于波速衰减的 MASW 界面损伤识别算法, 并进行试验验证。研究表明, MASW 法有效地解决了“一发一收”波动法不能进行界面损伤定位的问



在对信号数据进行分析时,分流前后的信号具有同相位滞后的特征。

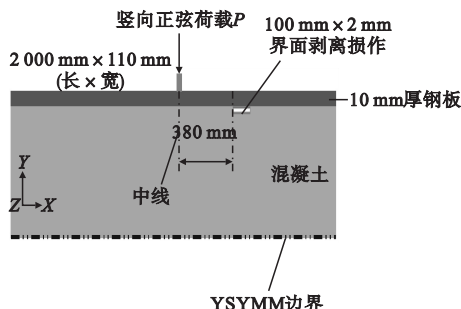


图2 具有一处界面剥离损伤的钢-混凝土组合板有限元模型示意图

**Fig. 2** The schematic of SCCP finite element model with an interfacial debonding damage

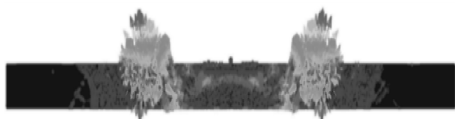
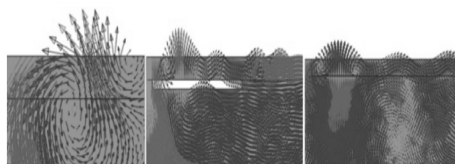


图3 钢-混凝土组合板波场快照

**Fig. 3** A wave field snapshot for the SCCP



剥离前                      剥离中                      剥离后

(a)表面波波场

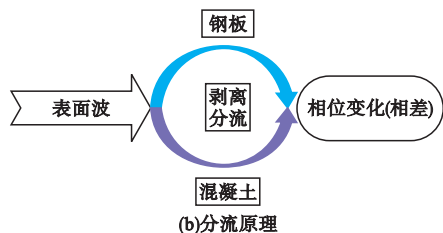


图4 不同传播状态表面波波场快照与分流原理简图

**Fig. 4** Interfacial wave field snapshots for different wave propagation stages and shunt schematic

### 2.3 界面剥离损伤指标

为了进一步研究信号相位差变化与损伤尺寸的对应关系,通过改变剥离损伤的长度和厚度,25 mm × 2 mm 表示剥离长度为 25 mm,剥离厚度为 2 mm,采用控制单一变量的方式,绘制不同损伤尺寸的同测点时程

信号曲线(见图5)。分析曲线特征可知,整体上具有损伤的信号曲线均具有同相位滞后的特征,即表面波发生了不同程度的波速衰减;相同剥离长度下,剥离厚度的改变对相位差的影响并不明显;相同剥离厚度下,剥离的长度越长,信号曲线同相位滞后的程度就越高,即波速衰减幅度越大。

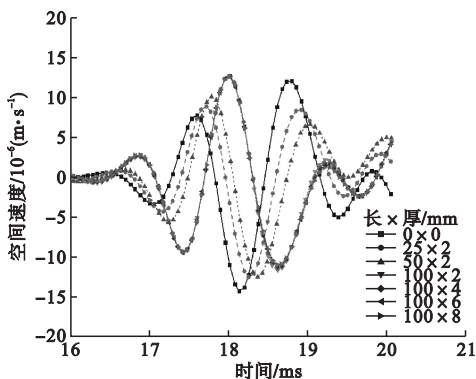


图5 不同损伤尺寸的同测点信号时程曲线

**Fig. 5** Sensing signal time history curves at the

same measuring point for different damage dimensions

为此,采用表面波波速作为损伤识别主要参数,从而间接地定量描述界面损伤程度,定义界面剥离损伤指标为

$$D_i = \left(1 - \frac{V_{Di}}{V_H}\right) \times 100\%. \quad (3)$$

式中:  $i$  为不同的损伤工况;  $D_i$  为损伤指标;  $V_{Di}$  为  $i$  损伤工况下的表面波波速;  $V_H$  为健康工况下的表面波波速。不同工况下结构的界面剥离损伤指标如图 6 所示。

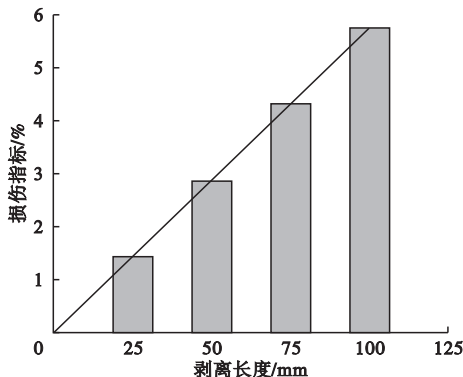


图6 界面剥离损伤指标与剥离长度关系

**Fig. 6** The relationship between interfacial damage index and damage lengths

定义  $l$  为剥离损伤长度,  $k$  为曲线斜率, 损伤指标与剥离长度的线性表达式为

$$D_i = k \cdot l. \tag{4}$$

由图 6 可知, SCCP 界面剥离区域越大, 损伤指标越大。其中,  $D_i = 0$  表示组合界面处于健康状态,  $D_i > 0$  表示组合界面发生剥离。对于本组合板, 经计算可知, 斜率  $k$  约为  $0.575 \text{ m}^{-1}$ 。建立的界面损伤指标与剥离长度的正相关线性关系, 为 SCCP 界面损伤识别提供了依据。

2.4 界面剥离损伤识别算法

采用六通道 MASW 方法, 激励点两侧均为一点激发, 六点接收的形式, 将健康与损伤区域信号进行对比分析。设定道间距  $D = 200 \text{ mm}$ , 偏移距  $d = 100 \text{ mm}$ 。剥离损伤的长  $\times$  厚为  $100 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ , 损伤位置为第二道间内右侧  $20 \text{ mm}$ , 第三道间内左侧  $80 \text{ mm}$ , 损伤区域六通道 MASW 参数布置如图 7 所示。

在定位损伤时, 首先要根据波速衰减规律确定波速衰减的起始道间, 此范围称为有效道间。在此范围内, 计算各个道间的波速衰减比例; 每个道间波速衰减占比称为损伤比率, 用  $\varphi_i$  表示

$$\varphi_i = \frac{\frac{V_H - V_{Di}}{V_H}}{\sum_{j=1}^{n-1} \frac{V_H - V_{Dj}}{V_H}} \times 100\% = \frac{D_i}{\sum_{j=1}^{n-1} D_j} \times 100\%; j = 1, 2, \cdots, n - 1. \tag{5}$$

式中:  $n$  为通道数;  $V_H$  为健康区域平均波速;  $V_{Di}$  为损伤区域第  $i$  道间平均波速;  $\varphi_i$  为第  $i$  道间的损伤比率。上述波速计算均位于有效道间范围内。

根据损伤比率, 再结合 MASW 的布置参数, 确定剥离损伤的起点和终点的方法就相对简单。最终提取的六通道 MASW 波速数据及损伤位置判定方法如表 1 所示。结果表明, SCCP 界面剥离损伤位于第二和第三道间, 识别精度达到厘米级。

2.5 MASW 损伤识别算法的试验验证

MASW 试验中, 采用聚弗乙烯板内嵌的方法模拟界面剥离损伤, 利用铅钛酸铅压电陶瓷 (PZT)、函数发生器、功率放大器和数字示波器等设备, 建立基于 MASW 的六通道压电超声面波损伤检测系统, PZT 布置及设备连接方式如图 8 所示, MASW 试验平台如图 9 所示。

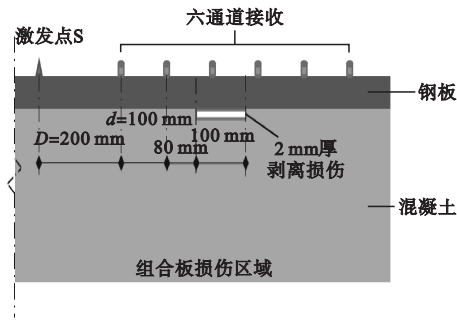


图 7 损伤区域及六通道 MASW 布置示意图

Fig. 7 The schematic of damage zone and 6 MASW layout

表 1 六通道 MASW 法损伤位置判定模拟结果

Table 1 Simulative results of damage location determination by six-channel MASW method

道间	健康区波速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	损伤区波速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	波速衰减 比率/%	损伤比 率/%	损伤定位	实际损伤位置
第一道间	2 800	2 800	0	0	无	无
第二道间	2 800	2 769	1.1	16	右侧 16 mm	右侧 20 mm
第三道间	2 800	2 639	5.75	83	左侧 83 mm	左侧 80 mm
第四道间	2 800	2 639	5.75	0	无	无
第五道间	2 800	2 639	5.75	0	无	无



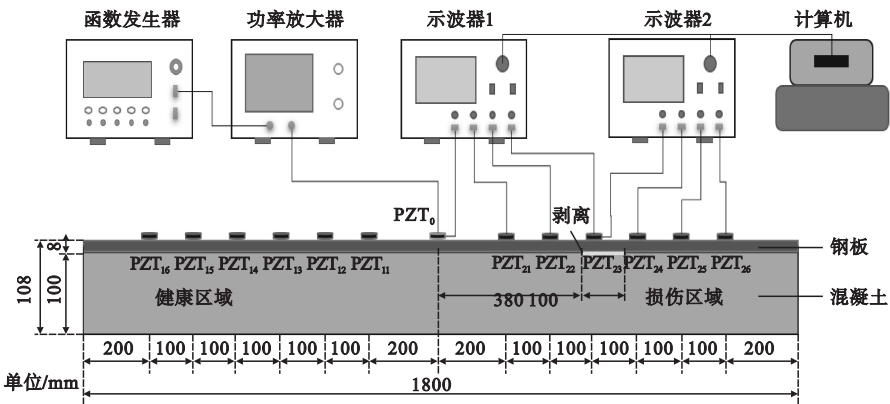


图 8 PZT 布置及设备连接方式

Fig. 8 PZT layout and equipment connection

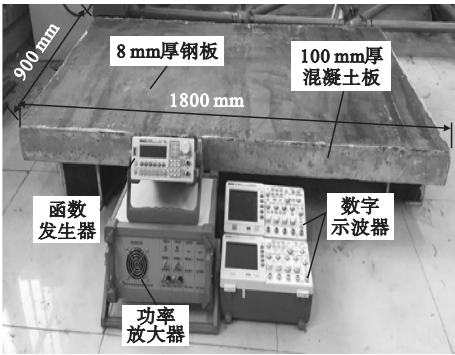


图 9 MASW 试验平台

Fig. 9 MASW test platform

通过 PZT 驱动器激励正弦信号(频率为 100 kHz,幅值为 10 V),对组合板健康区域和损伤区域的信号进行多道数据采集,典型的传感信号如图 10 所示。

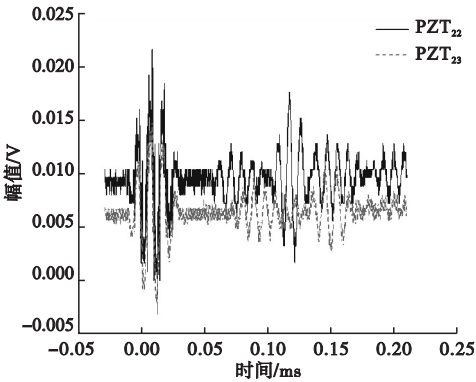


图 10 典型的传感信号

Fig. 10 A typical sensing signal

计算各个道间的平均波速,得到试验组合板的表面波道间波速曲线,试验测得数据见表 2。

表 2 六通道 MASW 法损伤位置判定试验结果

Table 2 Damage location evaluation for 6 MASW method

道间	健康区波速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	损伤区波速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	波速衰减比率/%	损伤比率/%	损伤定位	实际损伤位置
第一道间	2 482	2 350	5.3	0	无	无
第二道间	2 482	1 535	38.2	50.5	右侧 50 mm	右侧 20 mm
第三道间	2 482	1 554	37.4	49.5	左侧 50 mm	左侧 80 mm
第四道间	2 482	1 527	36.7	0	无	无
第五道间	2 482	1 489	40	0	无	无

根据表 2 可以判定,试验组合板的界面剥离损伤位于第二和第三道间,损伤位置与实际位置的最大误差为 30 mm,可能是受到试验设备的精度限制、钢板材料的初始缺陷等因素的影响,采集到的数据以及数据处理时会产生一定的误差,但通过多次的试验数

据提取和分析,表面波波速衰减的起始道间与剥离损伤的起点和终点是对应的,由于道间距设置为 100 mm,所以该方法的损伤识别精度能达到厘米级,验证了数值模拟所提出方法的有效性。

### 3 结 论

(1) 基于二维平面波动理论, 表面波在 SCCP 组合界面传播时, 遇到界面剥离损伤, 会产生表面波“分流”现象。

(2) 表面波的波速衰减程度与界面剥离长度密切相关, 波速衰减幅度越高, 损伤程度越大。

(3) 基于波速衰减的 MASW 界面剥离损伤定位算法能有效确定 SCCP 界面损伤的范围, 损伤识别精度达到了厘米级。

### 参考文献

- [1] 胡红松, 聂建国. 双钢板-混凝土组合剪力墙变形能力分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(5): 52-62.
- [2] 马晓伟, 聂建国, 陶慕轩. 钢板-混凝土组合剪力墙正常使用阶段有效刚度[J]. 土木工程学报, 2014, 47(7): 18-26.
- [3] 王晓强, 陶慕轩. 新型海上超大型钢-混凝土组合箱式浮体平台结构设计与分析[J]. 工程力学, 2019(11): 147-157.
- [4] LEPOURRY C, HENG P. An innovative concrete-steel structural system for long-span structure allowing a fast and simple erection[J]. Structures, 2019, 21: 55-74.
- [5] PAPAVASILEIOU G C, CHARMPI D C. Earthquake-resistant buildings with steel or composite columns: comparative assessment using structural optimization[J]. Journal of building engineering, 2020(27): 1-3.
- [6] 刘建国. 考虑滑移损伤效应的大尺度钢护筒-钢筋混凝土组合构件工作性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [7] 许开成. 基于界面损伤的钢管混凝土粘结滑移性能研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2013.
- [8] 伍凯, 陈峰. 型钢与钢纤维混凝土界面黏结性能及损伤耗能试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(3): 1-11.
- [9] 李赢, 阎石, 尉中华. 基于能量密度法的超声导波层状管道结构损伤检测[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(3): 505-511.
- [10] CHING-TAI N, HASAN M, HEUNG-FAI L. Debonding detection in CFRP-retrofitted reinforced concrete structures using nonlinear Rayleigh wave[J]. Mechanical systems and signal processing, 2019, 125: 245-256.
- [11] 杨乐. 超声法在大体积复杂钢-高强度混凝土组合结构中的应用[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- [12] 侯忠明. 钢-混凝土结合梁桥动力性能及损伤识别的理论分析与模型试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [13] 艾德米. 基于压电传感机械阻抗的结构损伤识别方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [14] 黄廷剑. 基于嵌入式压电陶瓷的钢筋混凝土框架边节点损伤监测研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [15] 杨映泉, 许斌, 栾乐乐, 等. 基于表面压电波动的钢管砼剥离检测试验[J]. 压电与声光, 2018, 40(3): 438-441.
- [16] 卢建旗. 多道面波分析方法及其应用研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2013.
- [17] CHEN H B. Interfacial debonding detection for rectangular CFST Using the MASW method and its physical mechanism analysis at the meso-level[J]. Sensors, 2019, 19: 27-78.
- [18] JAGANATHAN A P. Multichannel surface wave analysis of reinforced concrete pipe segments using longitudinal and circumferential waves induced by a point impact[J]. Journal of applied geophysics, 2019, 163: 40-54.

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)