

基于二维离散小波变换的混凝土板 损伤识别数值模拟分析

齐宝欣^{1,2}, 贾家科¹, 孙彤¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168;

2. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要 目的 提出一种基于二维离散小波变换的混凝土板单点冲击损伤、裂缝损伤识别方法,用于混凝土板单点冲击损伤和裂缝损伤识定位。**方法** 采用有限元软件 ABAQUS 建立四边固定约束条件的混凝土板的三维实体有限元模型,考虑单点冲击损伤、水平带状裂缝和垂直带状裂缝的组合损伤模式,并基于刚度损失建立损伤因子,获取不同损伤模式的混凝土板的振动模态;分别考虑四种工况下混凝土板的位移模态,采用二维离散小波变换分析方法将位移模态进行变换。**结果** 二维离散小波变换能够识别出单点冲击损伤位置;当带状裂缝损伤处的损伤因子为 0.1 时,二维离散小波变换能够识别出健康板与损伤板交接位置;对于损伤中心处,则损伤识别能力有所降低,而对于带状裂缝损伤的损伤因子较大时就不会出现这种情况。**结论** 二维离散小波变换能对混凝土板进行单点冲击损伤、裂缝损伤识别与定位,且损伤识别敏感性较高。

关键词 混凝土板;二维离散小波变换;损伤识别;振动模态;数值模拟

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Numerical Simulation Analysis of Damage Identification of Concrete Slab Based on 2D Discrete Wavelet Transform

QI Baoxin^{1,2}, JIA Jiake¹, SUN Tong¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China, 116024)

Abstract: In this paper, a method based on two-dimensional discrete wavelet transform for single and multi-point damage identification of concrete slab is proposed. The finite element software

收稿日期:2020-07-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51808355);辽宁省自然科学基金项目(20181023);海岸和近海工程国家重点实验室开放基金项目(LP1817)

作者简介:齐宝欣(1982—),男,副教授,博士,主要从事结构健康监测方面研究。

ABAQUS is used to establish the three-dimensional solid finite element model of the concrete slab with four fixed constraints. The combined damage modes of single point, horizontal strip and vertical strip are considered. The damage factor is established based on the stiffness loss, and the vibration modes of concrete slab with different damage modes are obtained. Considering the displacement modes of concrete slab under four working conditions, the displacement modes are transformed by two-dimensional discrete wavelet transform. The two-dimensional discrete wavelet transform is easy to identify single point damage; when the damage factor is small, the two-dimensional discrete wavelet transform has good identification ability for the joint of healthy concrete slab and damaged. when the damage factor is large, this situation will not appear. The two-dimensional discrete wavelet transform can identify and locate the damage of concrete slab with high sensitivity.

Key words: concrete slab; 2D discrete wavelet transform; damage identification; vibration mode; numerical simulation

混凝土板在住宅、商场、酒店和办公楼等工程建设中作为承重楼板得到广泛应用。当冲击、爆炸和地震等偶然荷载作用时,混凝土板会发生单点冲击损伤、混凝土板中心受拉区产生竖向裂缝和水平裂缝,将会影响混凝土楼板的承载能力,甚至造成混凝土楼板坍塌事故的发生。混凝土板作为结构构件,主要承担楼面和屋面活荷载、恒荷载作用。混凝土板开裂后,将引起建筑结构的破损甚至楼板坍塌事故的发生。因此,利用无损方法检测混凝土板损伤识别已成为国内外专家关注的研究热点。

自20世纪80年代以来,结构损伤识别一直是国内外学者的研究热点,基于结构动力学的结构损伤识别方法广泛受到了学者们的关注,并且取得了一定的研究成果^[1-3]。J. Morlet提出了小波变换的概念,Y. Meyer构造出了一个真正的小波基,并与J. Mallat一起合作建立了构造小波多尺度分析^[4]。小波分析是一个时间与频率的局部变换,因而可以有效的从信号中提取有用信息,通过伸缩平移等运算功能对信号进行分析,从而解决了傅里叶变换不能解决的许多问题^[5]。FFT变换虽然能实现时域分析,但由于其窗口的大小和形状都是固定不变的,没有从根本上解决傅里叶变换的缺陷。小波变换实现了时域到空间域的映射,小波在时域与频域

上具有局部放大的性质,因此在实际应用中有着重要的作用。Z. Hou等^[6]提出基于离散小波变换系数的结构损伤识别方法,并验证了该方法的有效性。E. Douka等^[7]采用连续小波变换对一悬臂梁进行损伤识别,并提出了损伤指标。X. Q. Zhou等^[8-10]研究表明移动荷载作用在悬臂梁的损伤位置时,可以利用离散小波变换系数的突变进行损伤定位。J. C. Hong等^[11]采用连续小波系数的突变点来对悬臂梁进行损伤位置定位研究。马芸等^[12]提出一种基于二维复数离散小波变换针对桥面板裂缝检测的方法,该方法可以有效地对板面裂纹图案进行识别。信号处理专家认为,小波分析是时间尺度分析和多尺度分辨分析的一种新技术。小波变换被誉为“数学显微镜”,小波的出现处理信号的领域里起着里程碑式的作用^[13-18]。

基于上述分析,笔者提出了一种基于二维离散小波变换的混凝土板单点冲击损伤、裂缝损伤识别方法;采用有限元软件ABAQUS建立了四边固结约束的健康混凝土板和具有不同损伤工况的混凝土板的三维有限元模型,并获取位移模态振型;采用二维离散小波变换对比分析不同损伤工况下混凝土板损伤识别灵敏性及损伤定位分析;研究表明:笔者所提方法可以有效地对混凝土板

进行单点冲击损伤、裂缝损伤识别与定位,且损伤识别敏感性较高。

1 离散小波变换理论

在实际工程中,存在很多二维或三维结构,则其相应的物理信号也是二维的,比如混凝土板、墙面、薄壳等结构。对于一个混凝土板,其板上任意一点 (x,y) 处有一个图像 $f(x,y)$ 与之相对应,如果一个点的坐标是连续的,就可以确定一个连续的二维信号 $f(x,y)$,这样就可以将其应用与小波变换的损伤识别中^[20]。

对于信号 $f(x,y) \in L^2(R^2)$ 是二维的, x_1, x_2 分别代表其横坐标和纵坐标。 $\varphi(x_1, x_2)$ 表示任意的二维小波,则对二维连续小波的定义如下^[21]:

令 $\varphi_{a,b}(x_1, x_2)$ 表示 $\varphi(x_1, x_2)$ 的伸缩和位移,则

$$\varphi_{a_1,b_1}(x_1,x_2)=\frac{1}{a}\varphi\left(\frac{x_1-b_1}{a},\frac{x_2-b_2}{a}\right).$$
 (1)

$$WT_f=(a;b_1;b_2)=\langle f(x_1,x_2),\varphi_{a_1,b_1}(x_1,x_2)\rangle=\frac{1}{a}\iint f(x_1,x_2)\varphi\left(\frac{x_1-b_1}{a},\frac{x_2-b_2}{a}\right)dx_1dx_2.$$
 (2)

式中:归一因子 $\frac{1}{a}$ 是保证小波函数在伸缩前后的能量不变而引入的。由式(2)可知:

$$f(x_1,x_2)=\frac{1}{C_\varphi}\int_0^\infty\frac{da}{a^2}\iint WT_f(a;b_1;b_2)\cdot\varphi\left(\frac{x_1-b_1}{a},\frac{x_2-b_2}{a}\right)db_1db_2,$$
 (3)

$$C_\varphi=\frac{1}{4\pi^2}\iint\frac{|\varphi(w_1,w_2)|^2}{|w_1^2,w_2^2|}dw_1dw_2.$$
 (4)

通常二维小波变换要比一维小波变换复杂,主要体现在二维小波变换尺度伸缩变换的同时还可以进行坐标旋转,即二维小波变换的尺度因子 a 可以写成如下形式:

$$A=ar_{\theta}.$$
 (5)

$$WT_f=(A;\bar{b})=\langle f(\bar{x}),\varphi_{A;\bar{b}}(\bar{x})\rangle.$$
 (6)

将式(6)带入式(2)可得:

$$WT_f(a,\theta b_1,b_2)=\frac{1}{a}\iint f(x_1,x_2)\cdot\varphi\left[\frac{(x_1-b_1)\cos\theta-(x_2-b_2)\sin\theta}{a},\frac{(x_1-b_1)\sin\theta-(x_2-b_2)\cos\theta}{a}\right]dx_1dx_2.$$
 (7)

由式(7)可知,二维小波变换同时具有放大与旋转功能,另外还有极化的特性,因此在运用二维小波分析时,可以选择最佳的偏振方向进行小波变换。

2 混凝土板有限元模型

2.1 建立有限元模型

笔者采用有限元软件 ABAQUS 中的 SHELL63 单元进行数值建模^[19],建立四边固定约束的混凝土板三维实体模型。其中,混凝土板的长×宽为 $h\times b=6\text{ m}\times3.6\text{ m}$,厚度 $t=0.1\text{ m}$,混凝土板以 0.05 m 进行单元网格划分,如图1所示。混凝土板的强度等级为C30,密度 $\rho=2.4\times10^3\text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E=30\text{ GPa}$,泊松比 $\mu=0.2$ 。

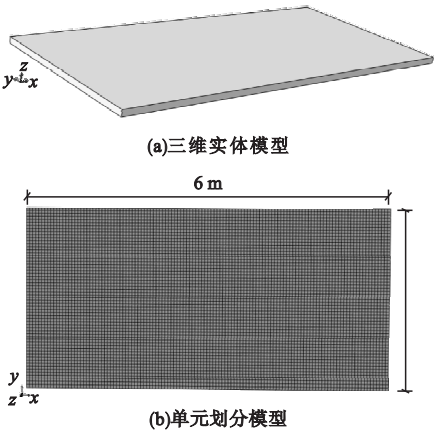


图1 混凝土板有限元模型

Fig.1 The FEM of concrete plate

2.2 数值模拟验证

笔者以文献[19]数值模拟建立的混凝土板为例进行对比验证。混凝土板长×宽×厚为 $6\text{ m}\times3.6\text{ m}\times0.1\text{ m}$,混凝土板的强度等级为C30,泊松比 $\mu=0.167$,密度 $\rho=2.5\times10^3\text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E=25.5\times10^3\text{ MPa}$,以

无损损伤混凝土板作为对比验证对象。利用有限元软件 ABAQUS 进行建模分析,获得混凝土板前六阶模态的固有频率如表 1 所示。

表 1 混凝土板的固有频率对比验证

Table 1 Comparative verification of natural frequency for the concrete plate

频率阶数	固有频率/Hz			变化率/%
	笔者模拟	文献[12]模拟	差值	
一阶	29.552	30.339	-0.787	-2.6
二阶	42.324	43.666	-1.342	-3.1
三阶	64.635	66.682	-2.047	-3.1
四阶	74.384	76.386	-2.002	-2.6
五阶	86.574	88.932	-2.358	-2.7
六阶	96.877	98.87	-1.993	-2.0

由表 1 可知,通过笔者数值模拟获得的前六阶频率数据与文献[12]的数据相差 2%~3%,满足误差可接受范围。因此,可以判断笔者采用数值模拟方法的正确性。

2.3 具有损伤的混凝土板有限元模型

笔者采用通过混凝土刚度下降来模拟混凝土板的损伤,即建模过程中仅以单元的弹性模量 E 下降来对损伤进行模拟,笔者采用有限元软件 ABAQUS 中的 SHELL63 单元进行数值建模^[20],并将该混凝土板以 0.05 m

的间距进行划分,网格划分如图 1 所示。

对四边固结约束的混凝土板通过损伤因子定义损伤大小,其损伤因子的物理意义为损伤处刚度下降数值和健康混凝土板刚度值的比值,损伤因子用 D 表示:

$$D = \frac{E_h I_h - E_d I_d}{E_h I_h}.$$

(8)

式中: $E_h I_h$ 为健康混凝土板的刚度; $E_d I_d$ 为损伤混凝土板的刚度; E_h 为健康混凝土板的弹性模量; E_d 为损伤混凝土板的弹性模量; $I_h = I_d$ 分别为健康混凝土板和损伤混凝土板的惯性矩。

因此,当损伤因子为 D 时,损伤处的弹性模量为 $E_d = (1 - D)E_h$ 。

混凝土板损伤工况设置如图 2 所示。其中,工况 1 为单点损伤;工况 2 为水平带状损伤;工况 3 为单点损伤和水平带状损伤;工况 4 为单点损伤和竖直带状损伤。单点损伤尺寸(长×宽)为 0.1 m×0.1 m,带状损伤尺寸(长×宽)为 0.1 m×1 m。工况 1 和工况 2 中,损伤因子 D 分别设置为 $D = 0.1, 0.5, 0.9$ 三种损伤程度;工况 3 和工况 4 中,损伤因子 D 分别设置为 $D = 0.1 + 0.1$,

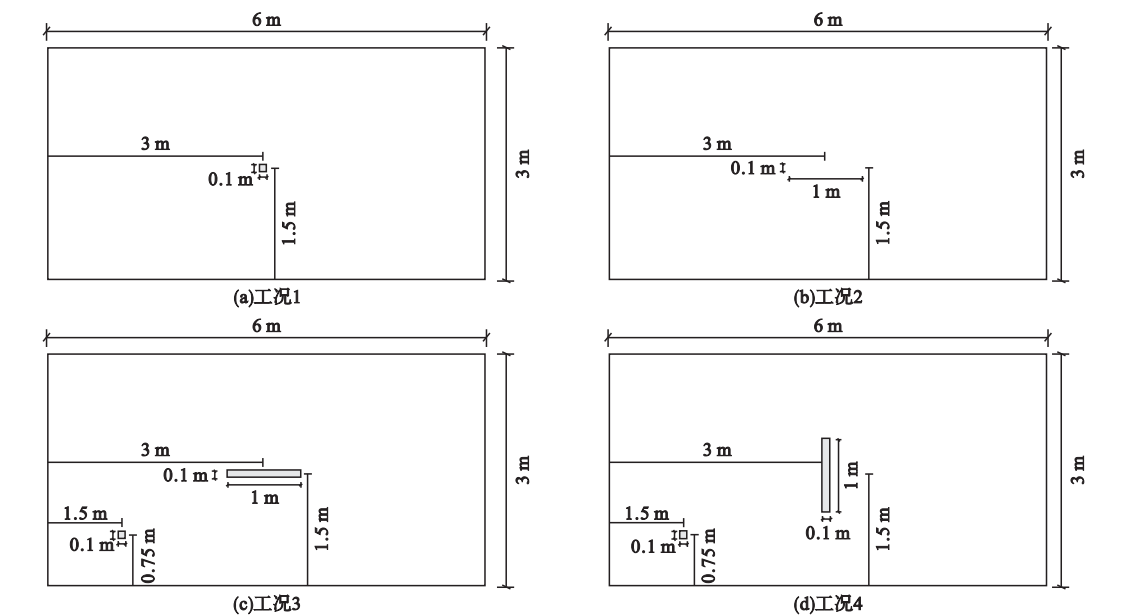


图 2 混凝土板损伤模型简图

Fig. 2 Damage model of the concrete plate

$D = 0.1 + 0.5$ 两种损伤程度。其中, $D = 0.1 + 0.1$ 表示带状损伤和点状损伤的损伤因子均为 0.1; $D = 0.1 + 0.5$ 表示带状损伤因子为 0.1, 点状损伤因子为 0.5。

3 数值模拟结果分析

3.1 位移模态损伤识别

以工况 3 和工况 4 为例, 不同工况下损

伤混凝土板的位移模态振型如图 3、图 4 所示。其中, S_x 为混凝土板长; S_y 为混凝土板宽; A 为位移模态幅值。比较不同损伤程度混凝土板的位移模态可以看出, 不同损伤状况下的混凝土板的各阶位移模态各阶位移模并没有明显的区别, 因此通过位移模态的比较并不够判断出混凝土板是否发生损伤, 更不能判别出混凝土板的损伤程度。

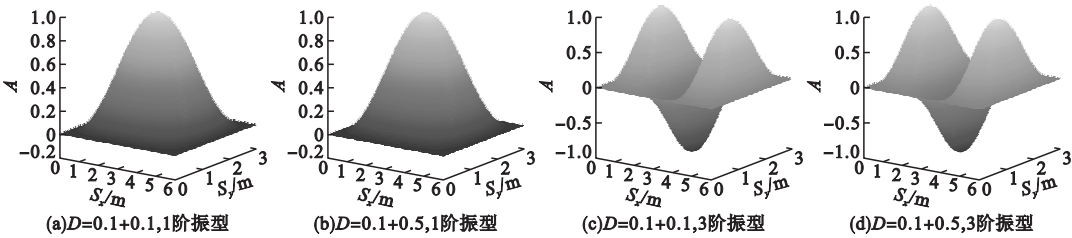


图 3 损伤混凝土板的位移模态振型(工况 3)

Fig. 3 Displacement mode shapes of damaged concrete slab (condition 3)

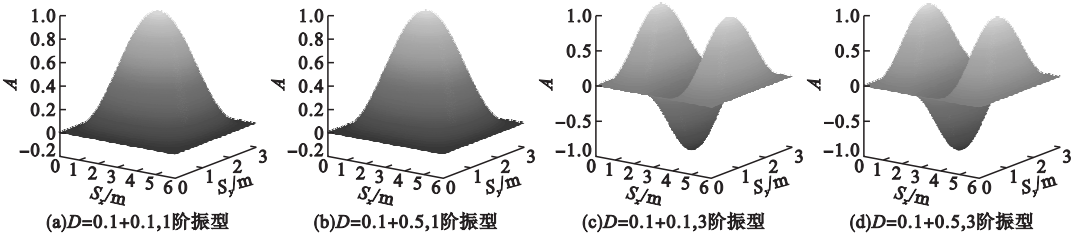


图 4 损伤混凝土板的位移模态振型(工况 4)

Fig. 4 Displacement mode shapes of damaged concrete slab (condition 4)

3.2 二维离散小波损伤识别

从位移模态中并不能够明显的对混凝土板损伤进行识别与分析, 因此, 笔者利用小波变换来对位移模态数据进行分解, 通过分解系数来对混凝土板的各种损伤进行识别。由于 sym4 小波对二维结构的奇异性具有很好的识别能力, 笔者选用 sym4 小波对位移模态进行二维离散小波变换^[21], 小波系数包括: 小波盖帽分量、水平细节分量、垂直细节分量和对角细节分量。其中, 对角细节分量即为二维小波高频系数对损伤的敏感性最高, 因此, 笔者利用对角细节分量对工况 1 ~ 工况 4 的混凝土板进行损伤识别。

小波变换可以对混凝土板的损伤进行准确识别, 且能够定位损伤的位置以及损伤大小的定性判断。基于二维小波变换的损伤识别, 从图中可以得出, 小波变换不受振型波峰波谷的影响, 另外, 二维离散小波变换对于点状损伤能够很好地识别, 而对于带状损伤而言, 当带状损伤区域的损伤因子较小时, 则小波变换对损伤与健康的交界处会很敏感, 而对于损伤中心即带状损伤内部则敏感度有所下降。当带状损伤区域处的损伤因子较大, 即损伤较大时, 则小波变换可很好地识别带状损伤。

工况 1 单点损伤, 对损伤因子 $D = 0.1, 0.5, 0.9$ 的第 1 阶与第 3 阶位移模态进行二

维离散小波变换分析。工况 1 的二维离散小波变换的损伤混凝土板振型如图 5 所示。由

图可知,小波变换对混凝土板的单点损伤具有良好的识别能力,不受模式阶数的影响。

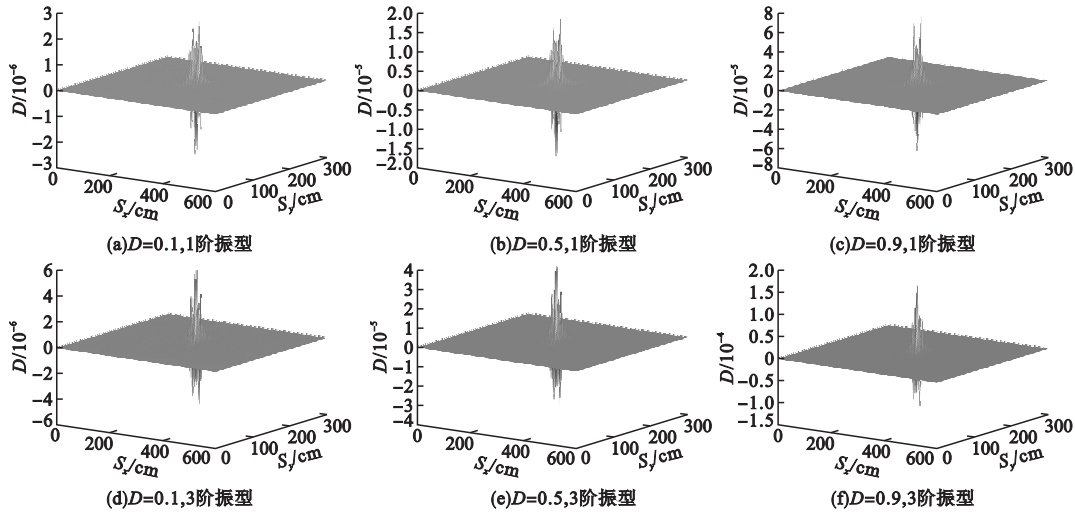


图 5 二维离散小波变换的损伤混凝土板振型(工况 1)

Fig. 5 Vibration mode of damaged concrete slab based on 2D discrete wavelet transform(condition 1)

工况 2 为水平带状损伤,将损伤因子 $D=0.1, 0.5, 0.9$ 的第 1 阶与第 3 阶位移模态进行二维离散小波变换分析。工况 2 的二维离散小波变换的损伤混凝土板振型如图 6

所示。由图可知,经过离散小波变换后明显看到损伤因子幅值的趋势和水平带状损伤的位置一致,由此说明二维离散小波变换对混凝土板水平带状损伤具有良好的识别能力。

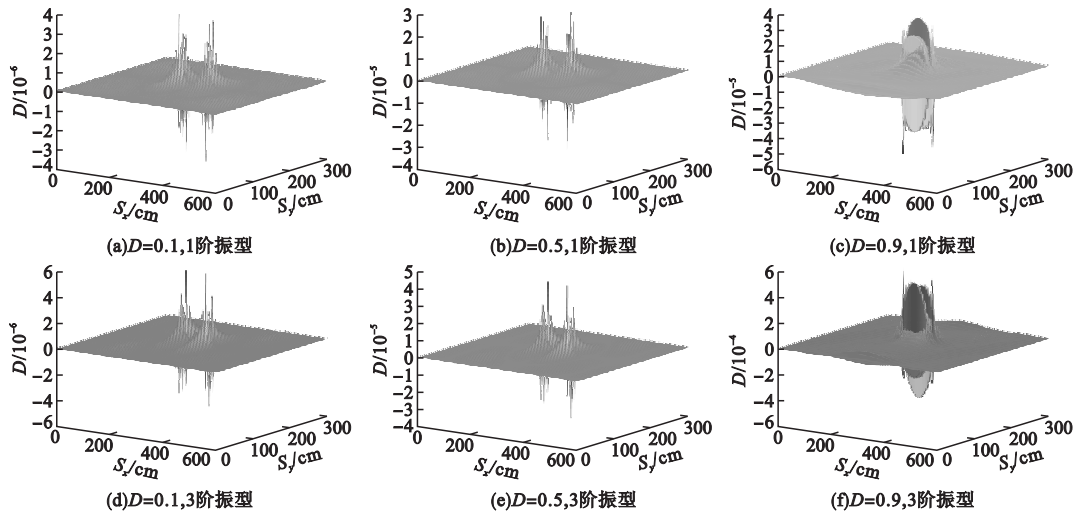


图 6 二维离散小波变换的损伤混凝土板振型(工况 2)

Fig. 6 Vibration mode of damaged concrete slab based on 2D discrete wavelet transform(condition 2)

工况 3 为单点与水平带状的组合损伤,其中,单点损伤因子 $D=0.1$,水平带状损伤因子 $D=0.1, 0.5$ 。将第 1 阶和第 3 阶位移模态进行二维离散小波变换分析。工况 3 的二维离散小波变换的损伤混凝土板振型如图

7 所示。由图可知,经过离散小波变换后明显看出,当损伤因子 $D=0.1+0.1$ 时,基于二维离散小波变换的单点与水平带状的组合损伤定位准确;当损伤因子 $D=0.1+0.5$ 时,二维离散小波变换的单点损伤位置定位

明显,水平带状损伤位置能够定位,但其损伤程度识别并不明显。损伤因子幅值的趋势和单点与水平带状组合损伤的位置一致,由此

说明二维离散小波变换对混凝土板单点与水平带状组合损伤具有的识别能力。

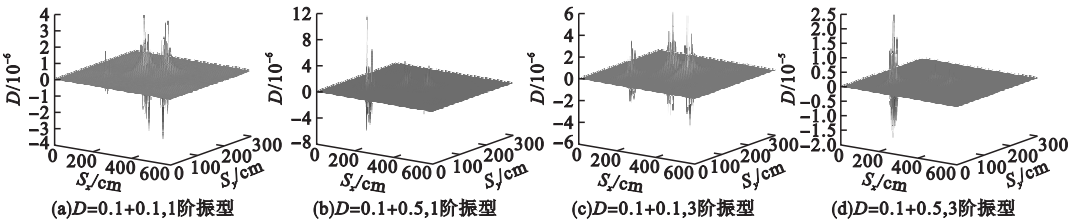


图7 二维离散小波变换的损伤混凝土板振型(工况3)

工况4为单点与垂直带状的组合损伤,其中,单点损伤因子 $D=0.1$,水平带状损伤因子 $D=0.1,0.5$ 。将第1阶和第3阶位移模态进行二维离散小波变换分析。工况4的二维离散小波变换的损伤混凝土板振型如图8所示。由图可知,经过离散小波变换后明显看出,当损伤因子 $D=0.1+0.1$ 时,基于二维离散小波变换的单点与垂直带状的组合

损伤因子幅值的趋势和单点与带垂直带状组合损伤的位置一致;当损伤因子 $D=0.1+0.5$ 时,二维离散小波变换的单点损伤位置识别突出,垂直带状损伤位置能够定位,但其损伤程度识别并不明显。二维离散小波变换对混凝土板单点与垂直带状组合损伤具有的识别能力。

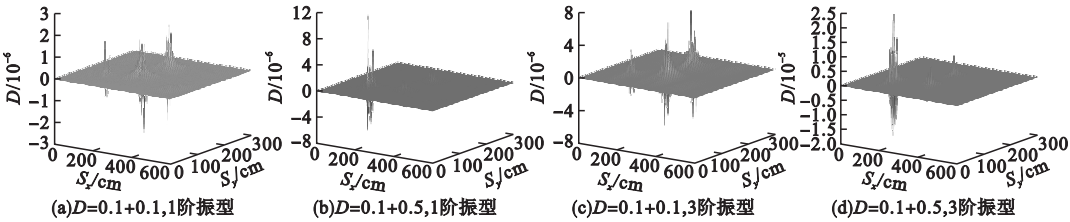


图8 二维离散小波变换的损伤混凝土板振型(工况4)

Fig. 8 Vibration mode of damaged concrete slab based on 2D discrete wavelet transform(condition 4)

4 结 论

(1)笔者了提出可基于二维离散小波变换四边固定约束的混凝土板损伤识别方法,该方法能够有效识别混凝土板的单点损伤、水平裂缝损伤竖向裂缝损伤、单点、水平裂缝损伤和单点、竖向裂缝损伤,并且能够准确判定损伤位置和形状。

(2)混凝土板出现带状损伤时,当带状损伤的损伤因子较小,则二维离散小波变换对健康混凝土板与损伤混凝土板交接处有很好的识别能力;对于损伤中心处,损伤识别能力有所降低。

参考文献

[1] 朱宏平,余璟,张俊兵. 结构损伤动力检测与健康监测研究现状与展望[J]. 工程力学学报,2011,28(2):1-11.
(ZHU Hongping, YU Jing, ZHANG Junbing. A summary review and advantages of vibration-based damage identification methods in structural health monitoring [J]. Engineering mechanics,2011,28(2):1-11.)

[2] 陈元鹏. 土木工程结构实时动态监测系统的设计与应用[D]. 兰州:兰州理工大学,2011.
(CHEN Yuanpeng. Real-time dynamic monitoring system design and application in civil engineering structure [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology,2011.)

[3] SAWYER J P, RAO S S. Structure damage detection and identification using fuzzy logic [J]. AIAA Journal, 2012, 38 (12): 2328 - 2335.

- [4] 李帅. 工程结构模态参数辨识与损伤识别方法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2013.
(LI Shuai. Studies on method for modal parameter identification and damage identification of engineering structure [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.)
- [5] HADJILEONTIADIS L J, DOUKA E. Crack detection in plates using fractal dimension [J]. Engineering structures, 2007, 29: 1612 – 1625.
- [6] HOU Z, NOORI M, AMAND R S. Wavelet-based approach for structural damage detection [J]. Journal of engineering mechanics, 2000, 126(7): 677 – 683.
- [7] DOUKA E, LOUTRIDIS S, TROCHIDIS A. Crack identification in beams using wavelet analysis [J]. International journal of solids and structures, 2003, 40(2): 3557 – 3569.
- [8] ZHU X Q, LAW S S. Wavelet-based crack identification of bridge beam from operational deflection time history [J]. International journal of solids and structures, 2006 (43): 2299 – 2317.
- [9] HESTER D, GONZALEZ A. A wavelet-based damaged detection algorithm based on bridge acceleration response to a vehicle [J]. Mechanical systems and signal processing, 2012 (28): 145 – 166.
- [10] KHORRAM F, BAKHTIARI N, REZAEIAN M. Comparison studies between two wavelet based crack detection methods of a beam subjected to a moving load [J]. International journal of engineering science, 2012 (51): 204 – 215.
- [11] HONG J C, KIM Y Y, LEE H C. Damage detection using the Lipschitz exponent estimated by the wavelet transform: applications to vibration modes of a beam [J]. International journal of solids and structures, 2002(39): 1803 – 1816.
- [12] 马芸, 王国军. 基于二维复数离散小波包变换的桥面裂缝检测[J]. 沈阳工业大学学报, 2018, 40(6): 659 – 663.
(MA Yun, WANG Guojun. Detection for bridge surface crack based on 2D complex discrete wavelet packet transform [J]. Journal of Shenyang university of technology, 2018, 40(6): 659 – 663.)
- [13] 孙姚姚. 小波分析再桥梁健康监测系统中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
(SUN Yaoyao. Application study of wavelet analysis used in bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.)
- [14] 曾珍. 小波分析在测井资料处理中的应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
(ZENG Zhen. Study on the application of wavelet transformation technique in well logging signals processing [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008.)
- [15] 周大华, 彤增湘, 陈建平. 基于小波分析的隧道监测数据处理[J]. 现代隧道技术, 2020, 47(4): 58 – 61.
(ZHOU Dahua, TONG Zengxiang, CHEN Jianping. Tunnel monitoring data processing based on wavelet analysis [J]. Modern tunneling technology, 2020, 47(4): 58 – 61.)
- [16] 李宗春, 邓勇, 张冠宇. 变形测量异常数据处理中小波变换最佳级数的确定[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(3): 285 – 288.
(LI Zongchun, DENG Yong, ZHANG Guanyu. Determination of best grading of wavelet transform in deformation measurement data filtering [J]. Geomatics and information science of Wuhan university, 2011, 36(3): 285 – 288.)
- [17] SINGH R, KHARE A. Fusion of multimodal medical images using Daubechies complex wavelet transform a multiresolution approach [J]. Information fusion, 2014, 19(3): 49 – 60.
- [18] YANG H, GUAN C, CHUA K S, et al. Detection of motor imagery of swallow EEG signals based on the dual-tree complex wavelet transform and adaptive model selection [J]. Journal of neural engineering, 2014, 11(3): 35 – 46.
- [19] 游春华. 基于模态技术的损伤识别[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
(YOU Chunhua. Damaged inspection based on modal technology [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005.)
- [20] 唐小兵. 结构损伤识别及数值模拟[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2004.
(TANG Xiaobing. Structural damage identification and numerical simulation [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2004.)
- [21] 张延伟, 周建兴, 岂兴明, 等. MATLAB 从入门到精通 [M]. 2 版. 北京: 人民邮电出版社, 2018.
(ZHANG Yanwei, ZHOU Jianxing, QI Xingming, et al. Matlab: from introduction to mastery [M]. 2nd ed. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2018.)
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)