

损伤钢筋混凝土 U 形梁的非线性动力特性识别研究

周奎, 陈思宇, 陈妮娜, 林杰
(上海理工大学 土木工程系, 上海 200093)

摘要: 为研究钢筋混凝土 U 形梁非线性动力特性与其损伤程度之间的关系, 本文对一根 1: 10 缩尺比例的简支钢筋混凝土 U 形梁进行了静动测试。通过静力加载对梁造成不同程度的损伤, 在各级损伤加载条件下, 对 U 形梁进行动测试, 采集加速度 - 时间信号, 通过滤波和 EMD 分解出各状态下的一阶、三阶频率信号, 用 Hilbert 变换识别出各状态下的一阶和三阶振幅 - 时间曲线和频率 - 时间曲线, 最终得到频率 - 振幅图和归一化频率 - 振幅对比图。通过分析得到钢筋混凝土 U 形梁的非线性动力特性与其损伤程度之间的关系, 以及对于完整性要求很高的结构可以利用其非线性振动特性来进行损伤检测, 而对于一般的 U 形梁或其他结构单独使用非线性振动特性来进行损伤识别是不可靠的, 可将其作为一种手段预警结构损伤并与其他检测方法结合使用的结论。

关键词: 钢筋混凝土 U 形梁; 非线性动力特性; 时频分析; Hilbert - Huang 变换; 损伤检测

中图分类号: TV332.12; TV32⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2017)02-0197-07

Nonlinear dynamic characteristics identification of damaged reinforced concrete U - shaped beam

ZHOU Kui, CHEN Siyu, CHEN Nina, LIN Jie

(Department of Civil Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to study the relationship between the nonlinear dynamic characteristics and the impairing degree of reinforced concrete U - shaped beam, a static and dynamic testing on a simply supported reinforced concrete U - shaped beam with a scale ratio of 1: 10 was conducted in this paper. The static loads on the beam caused different degrees of damage. At all levels of damage load conditions, dynamic test on the U - shaped beam were conducted and the acceleration - time signal were collected. Finally, the filter and the EMD were applied to decompose the first and the third order frequency signal of each state. Then the Hilbert transform was used to identify the first and the third order amplitude - time curve and frequency - time curve of each state, and the frequency - amplitude chart and normalized frequency - amplitude comparison charts were obtained. By analyzing the curves, the relationship between nonlinear dynamic characteristics of the reinforced concrete U - shaped beam and its damage levels were obtained. The structural nonlinear dynamic characteristics can be used to detect damage for those structures which needed high integrity. But for the common U - shaped beam or other structures, only using the nonlinear dynamic characteristics to detect damage was unreliable, the structural nonlinear dynamic characteristics can be regarded as a means to warning damage or to be used with others detection method.

Key words: reinforced concrete U - shaped beam; nonlinear vibration characteristics; time - frequency analysis; Hilbert - Huang transformation; damage detection

1 研究背景

基于动力测试的结构或构件全局损伤检测方法

是现阶段常用的检测方法, 这种方法也是目前众多学者深入探索研究的检测方法之一。从研究方法上可以分为基于线弹性理论和基于非线性理论的两类

收稿日期: 2016-10-08; 修回日期: 2016-11-21

作者简介: 周奎(1970-), 男, 安徽铜陵人, 博士, 副教授, 研究方向: 结构健康监测与损伤识别研究。

通讯作者: 陈思宇(1991-), 女, 四川攀枝花人, 硕士研究生, 研究方向: 结构健康监测与损伤识别研究。

方法^[1]。已有研究大部分都是基于线性理论对结构进行损伤检测,但用非线性力学理论对结构损伤进行检测的研究并不多见^[2]。而研究表明,当混凝土构件出现裂缝后,会产生呼吸裂缝效应,所谓呼吸裂缝,即裂缝随着结构或构件的振动而时张时合。振幅小的时候,裂缝闭合,此时结构刚度较大;振幅大的时候,裂缝张开,此时结构刚度变小。随着裂缝在振动过程中的张合,结构刚度随振幅的变化而变化,导致结构频率也随振幅而改变,随即呈现出非线性振动特性。而实际结构或构件的动力特征通常都表现出或强或弱的非线性^[3]。目前大部分基于非线性振动的损伤检测研究集中在金属的疲劳裂缝方面^[4]。应用时频分析法研究损伤钢筋混凝土梁非线性振动特性的研究很少。Neild 等^[5-6]采用锤击激振加速度信号,用短时傅里叶变换研究了钢筋混凝土在各级损伤加载后自振频率随振幅变化的关系,同时对在低振幅周期荷载作用下钢筋混凝土梁的非线性振动特征进行了研究;Abeele 等^[7]用受迫振动试验来识别结构的损伤,其试验结果证明即使梁未发生任何损伤,其振动也表现出非线性特征。而当梁发生损伤时,用四分点加载测得的结果可以更加明显反映出梁振动的非线性特征;曹晖等^[8]和郑星^[9]对后张有黏结预应力混凝土简支梁进行单调和二级等幅值疲劳加载试验,并在各级荷载加载后对试验梁进行动测,分析处理得到各损伤状态下梁的频率-振幅曲线簇。结合挠度和裂缝的变化,探索梁的非线性振动特性的变化与其损伤之间的关系;任宜春等^[10-11]通过 Duffing 方程进行数值仿真分析得到信号的瞬时振幅与瞬时频率的关系曲线簇,分析该曲线簇得出结构的非线性动力特征,并且对钢筋混凝土简支梁做了锤击振动测试试验,证实钢筋混凝土梁的微幅弯曲自由振动存在弱的非线性,且近似为三次非线性。王利恒等^[2,12]对钢筋混凝土梁的非线性动力特性及其损伤程度之间的关系做了试验研究,通过对冲击振动位移反应信号的时频分析和共振试验获得混凝土梁的非线性动力特性。

近年来提出的希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform,简称 HHT)方法是一种全新的数据处理方法,对于处理非线性、非平稳信号有清晰的物理意义,能够得到信号的振幅-时间-频率分布特征,且具有自适应性^[13]。HHT 由经验模态分解(Empirical Mode Decomposition,简称 EMD)方法及希尔伯特变换两部分组成,其核心是 EMD 分解。

众多研究者对钢筋混凝土矩形梁、箱型梁做了试验研究,他们中的大多数在试验过程中都只是简单地人为制造出一个狭小的凹槽,然后通过测不同尺寸的凹槽下,即不同损伤程度下,结构构件自由振动的信号,再对信号进行时频分析,这是不符合物理事实的,因其只专注于张开裂缝的研究而忽视了裂缝“呼吸”效应对结构非线性振动的影响。鉴于此本文选择对钢筋混凝土 U 形梁进行静载试验,使梁产生裂缝,即产生不同程度的损伤,然后再在各级损伤程度下做动力测试,采集多个通道的振动信号,再用 HHT 方法分析非线性、非平稳信号的优势,将该方法应用到 U 形梁的损伤检测中,分析动力测试获得 U 形梁振动加速度信号后得到 U 形梁的瞬时参数特征,总结出钢筋混凝土简支 U 形梁的非线性动力特性,进而研究用钢筋混凝土简支 U 形梁的非线性动力特性做损伤检测的可行性。

2 Hilbert-Huang 变换理论

美籍华人黄锬(Norden E. Huang)于 1998 年提出了一种全新的信号时频分析技术——希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform,简称 HHT)。该时频分析技术主要包含经验模态分解(Empirical Mode Decomposition,简称 EMD)及 Hilbert 谱分析(Hilbert Spectrum Analysis,简称 HAS)两部分内容。其中,经验模态分解可以根据采集信号本身的特性将信号自适应地分解成若干个固有模态函数(Intrinsic Mode Function,简称 IMF,也称作本征模态函数),这些 IMF 都有某种特定的属性,满足某种特定的条件;Hilbert 谱分析也就是对分解出来的 IMF 进行 Hilbert 变换,得到瞬时频率、振幅等信息。可以说,经验模态分解法的出现,大大促进了 Hilbert 变换的工程应用。

从本质上来看,HHT 就是将非平稳信号中不同尺度的振动趋势逐条分解出来,生成多组不同尺度的信号数据,然后通过对这些数据进行 Hilbert 变换,得到有真正物理意义的结果,即振幅-时间分布规律,频率-时间分布规律。

任何一个原始数据为 $x(t)$ 的信号经过 EMD 分解后可表示成 n 阶固有模态函数($c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$)和一残差 r_n 之和:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (1)$$

其中每一阶分量都是具有不同振幅和频率的振动模态,第一阶模态函数的频率最高,并且随着模态阶数

的增加其所含的周期变长,直到逼近一条线性的时间函数。

HHT 的另外一部分则是 Hilbert 变换,通过 Hilbert 变换来得到信号的解析信号,从而得出瞬时频率。对 EMD 分解得到的各阶模态函数 $c_i(t)$ 作 Hilbert 变换得到:

$$H[c_i(t)] = \frac{1}{\pi} \times c_i(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{c_i(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (2)$$

于是构造 $c_i(t)$ 的解析信号:

$$z_i(t) = c_i(t) + jH[c_i(t)] \quad (3)$$

根据解析信号, $c_i(t)$ 可以表示成:

$$c_i(t) = a_i(t) \cos\phi_i(t) \quad (4)$$

其中幅值函数 $a_i(t)$ 和相位函数 $\phi_i(t)$ 分别为:

$$a_i(t) = \sqrt{c_i^2(t) + H^2[c_i(t)]} \quad (5)$$

$$\phi_i(t) = \arctan\left(\frac{H[c_i(t)]}{c_i(t)}\right) \quad (6)$$

由相位函数即可求出 $c_i(t)$ 的瞬时频率:

$$\omega_i(t) = \frac{d\phi_i(t)}{dt} \quad (7)$$

$$f_i(t) = \frac{\omega_i(t)}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi_i(t)}{dt} \quad (8)$$

式中: $\omega_i(t)$ 为瞬时角频率; $f_i(t)$ 为瞬时频率。

为了使瞬时频率的定义有意义, Hilbert 变换只能用于单一成分的信号。对于频率成分复杂的信号,应将其分解成一系列单分量信号,再进行 Hilbert 变换,这样得到的瞬时频率才有意义,如上所述, EMD 分解正好能满足这种要求。并且相比于小

波变换在计算前需要选择合适的小波基函数来说, HHT 更适用于非线性非平稳信号的处理。正是基于此,十几年来 Hilbert - Huang 变换在各个领域得到了广泛的应用。

3 钢筋混凝土 U 形梁试验概况

3.1 试验目的

本试验采用一根带有预应力筋的钢筋混凝土 U 形梁,通过液压千斤顶对梁进行静力加载使其产生不同程度的损伤,然后再在损伤加载前和各级损伤加载条件下对梁做动力测试,即采用力锤做锤击试验,并通过加速度传感器和采集仪收集加速度信号。对获得的加速度信号进行 EMD 分解,再结合 Hilbert 变换,得到完整梁和各损伤程度下梁的频率 - 振幅曲线。通过对 U 形梁的这一系列频率 - 振幅曲线族进行分析总结,探索利用钢筋混凝土 U 形梁的非线性振动特性进行损伤识别的可行性。

3.2 试件设计与制作

本试验对象为一根 1: 10 缩尺比例简支预应力钢筋混凝土 U 形梁(因前期制作时,预应力筋上贴的应变片预留导线有质量问题,提前老化,故本试验不考虑预应力筋在试验中的应力变化及预应力损失,以下只称钢筋混凝土 U 形梁),如图 1 所示。梁长度为 3 000 mm,计算跨径为 2 820 mm。

试件设计要求参照《混凝土结构设计规范》(GB 50010 - 2010)。梁尺寸及截面配筋情况如图 2 (a)、2 (b)。

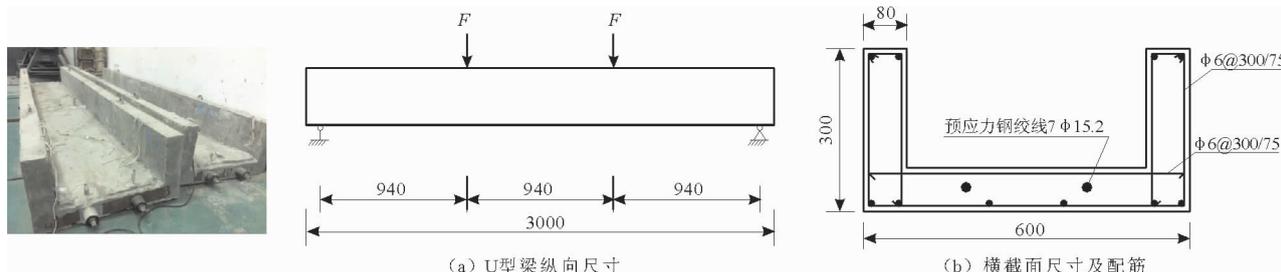


图 1 预应力钢筋混凝土 U 形梁

图 2 试验梁尺寸及截面配筋图(单位: mm)

图 2 中纵向钢筋直径为 8 mm,钢筋保护层厚度为 10 mm,钢绞线中心距离上表面 40 mm,箍筋在梁端支座处 300 mm 范围内为加密区。

混凝土强度等级为 C40,在浇捣梁的同时,预留浇捣了 3 块 150 mm × 150 mm × 150 mm 立方体试块,及 6 块 150 mm × 150 mm × 300 mm 棱柱体试块。试块与梁在相同条件下养护 28 d。

试验时,先利用万能试验机做材性试验,3 块立

方体试块的抗压强度算数平均值作为试验梁的混凝土抗压强度,6 块棱柱体试块其中 3 块用于测混凝土轴心抗压强度,另外 3 块用于测混凝土的弹性模量。

纵向受力钢筋和箍筋均采用 HPB300 级钢筋,纵向受力钢筋直径为 8 mm,箍筋直径为 6 mm,各预留 6 根 600 mm 长的钢筋供材性试验使用。各材料材性试验结果如表 1 所示。

表1 试验梁材料参数实测值表

材料	参数	测定值
混凝土	$f_{cu,k} / (N \cdot mm^{-2})$	45.2
	$E_c / 10^4 \text{ MPa}$	3.29
纵向受力钢筋	$f_y / (N \cdot mm^{-2})$	313
	A_s / mm^2	302
	A'_s / mm^2	201
箍筋	$f_{sv} / (N \cdot mm^{-2})$	324

3.3 试验加载方式

根据试验条件,采用液压千斤顶施加静载,纵向加载方式采用梁体中部分配梁施加三分点等效集中力来模拟U形梁的纵向受力特征,正式加载前,先对试验梁进行3次预加载,预压荷载值取为极限荷载值的20%(约30 kN),目的是用来考察各仪表是否正常工作、荷载施加是否偏心并压牢试件、消除分配梁和试验U形梁与支座处的接触不良。加载装置图如图3所示。

正式加载时,荷载分为7个等级加载(接近开裂荷载时人为增加两级荷载,增加的两级荷载未进行动测试验,不列出),三分点处荷载为 F ,具体荷载等级见表2。

表2 静载荷载等级

荷载等级	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
F 值/kN	0	60	65	70	75	80	85

4 试验过程与结果

4.1 试验过程

试验过程中,在静力加载前,首先对完整健康梁



图3 千斤顶加载装置图

当荷载增加到84 kN时,道床板三分点加载处由于支座应力集中而破坏,道床板底部裂缝已近5 mm,至此试验梁被破坏,整个试验结束,静载未加到荷载等级为85 kN的状态。腹板最终裂缝情况如图

进行3次动测,之后静载试验和动测试验交替进行。每一级荷载静载试验完成后,接着做动测试验,然后进行下一级荷载的静动试验,直到U形梁破坏。静力加载时不对梁产生振动冲击,每一级静力加载持荷30 min后,卸载,然后进行动力测试试验,即锤击试验。

激励木锤敲击点选在跨中腹板上翼缘,进行垂直敲击,避免试验梁体在弯曲振动中产生扭转振动。木锤击中试验梁体后快速提起,以使试验梁与加速度传感器一起做自由振动。激振锤有效击打次数为3次,每两次激振之间的时间间隔应保证采集数据的有效性,即待上一次激振振动完全衰减完毕后再进行下一次激振。同时,为了保证采集信号的信噪比,动力测试试验于晚上试验室周围较安静的环境下进行。

4.2 试验结果

4.2.1 静载试验结果 试验U形梁在静力加载到60 kN,持荷到第4 min时,跨中和三分点加载处编号为6、8、10的应变片溢出,U形梁产生竖向裂缝,应变片被破坏(由于先前涂刷的环氧树脂和固化剂的混合物遮挡,跨中和三分点处的裂缝肉眼观察不到);持荷到第16 min时,编号为5、9的应变片溢出;在跨中和三分点之间出现高约4.5 cm微裂缝。则此试验U形梁的开裂荷载为60 kN。持荷30 min后卸载,裂缝闭合,肉眼观察不出裂缝来。此时,U形梁跨中产生8 mm塑性变形无法恢复。

此后,随着荷载等级的增加,腹板裂缝条数不断增加。当荷载增加到75 kN并持荷20 min时,道床板跨中和三分点以外的部分出现裂缝(如图4,图中标记)。之后随着荷载水平的不断增加,裂缝的长度和宽度也不断增加。

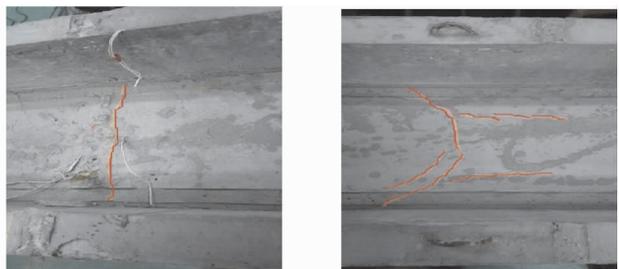


图4 75 kN时梁裂缝分布图

5所示。

4.2.2 动测试验结果 动测试验中,采样频率为1 024 Hz。试验测得的各测点的部分加速度时程曲线如图6所示。



图 5 试验结束时腹板最终裂缝情况

5 试验结果分析

5.1 分析思路

为了对钢筋混凝土 U 形梁的不同损伤状态下的非线性振动特性进行比较,需要借助于 U 形梁的频率-振幅曲线,而动测试验中获得的信号数据是加速度时程曲线,因此这两者之间需要一些技术手段进行转换。具体步骤如下:

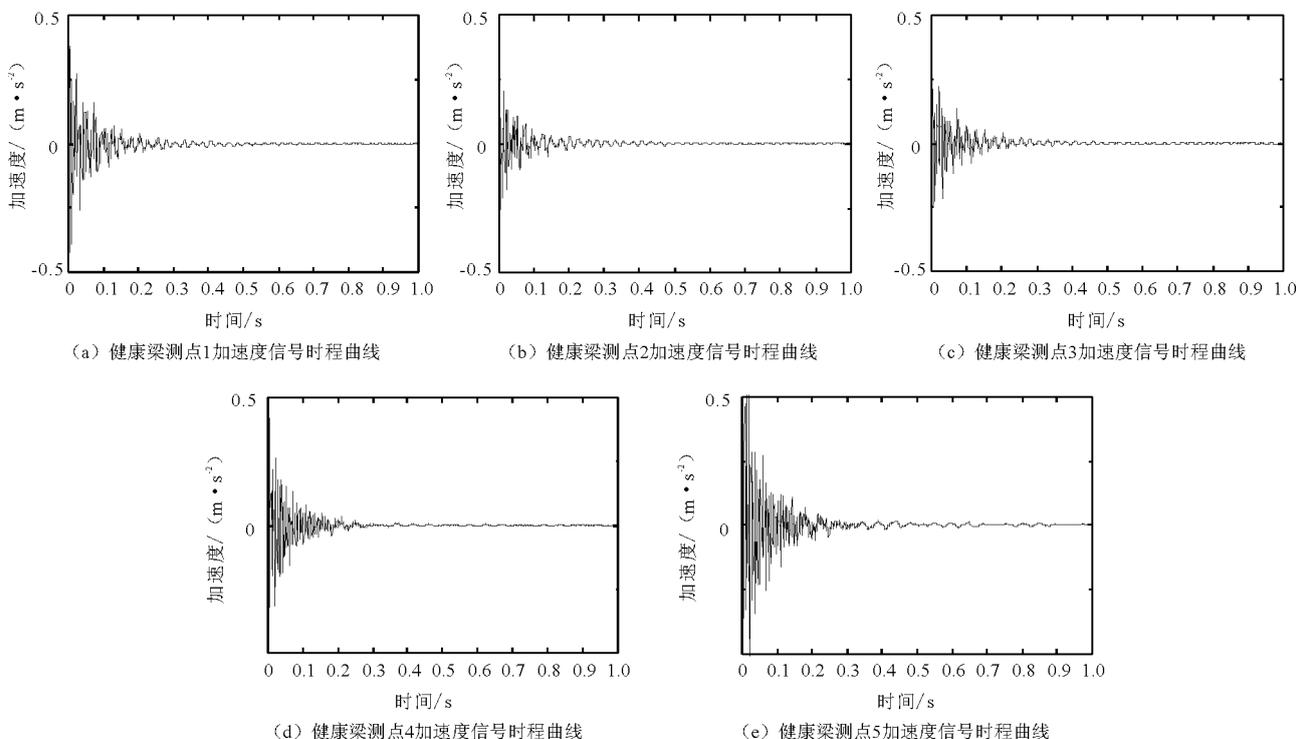


图 6 健康梁各测点加速度信号时程曲线

(1) 任选两个荷载等级下各测点的振动信号,对其进行 FFT 自谱分析,根据各测点信号数据识别出的频率的有效性和显著性,选择有代表性的测点信号进行分析。

(2) 试验采集的信号数据曲线比较毛躁,说明带有噪声干扰,要分离出需要频率的信号数据就要识别出信号的各阶频率,利用 FFT 自谱分析将时域信号转换为频域信号,以识别出 U 形梁的所需各阶频率。

(3) 对选出的有代表性的测点信号数据进行 EMD 分解,分解出所需阶数频率,由于 EMD(经验模态分解法)具有很高的信噪比,所以分离出的各阶 IMF 是只含有各阶频率信息的信号数据。

(4) 对分离出的各阶 IMF 进行 Hilbert 变换,得到振幅-时间关系和频率-时间关系,最终得到振幅-频率的关系曲线。在得到准确的频率-时间关系时,需要明确两点:第一,自由振动的振幅是随时间衰减

的,自振频率又是随着振幅的衰减而增长,所以自振频率应该是随着时间的增加而增长的。根据已有的成果显示,随着时间的增加,自振频率的增长幅度先快后慢,在振动的后期,频率几近常数;第二,本文动测试验的激励方式为人工木锤敲击,可认为此激励强度不会增加 U 形梁的损伤或者使其产生二次损伤,所以可理解为振动始末裂缝的宽度不改变。

5.2 时频分析

根据 Hilbert 变换时频分析识别出的振幅-时间图和频率-时间图中曲线的光滑程度,去掉动测信号中动荡较大的部分,并选定一个各振幅都能衰减到的有效振幅起始点,将剩余的数据绘制成分析需要的以该值为起始点的频率-振幅曲线图。

一阶频率-振幅图的起点选定为 0.015 mm。三阶频率-振幅图的起点选定为 0.01 mm。将各状态的一阶频率-振幅曲线画在一个图中,各状态的

三阶频率 - 振幅曲线画在一个图中,以便比较,如图

7~8所示。

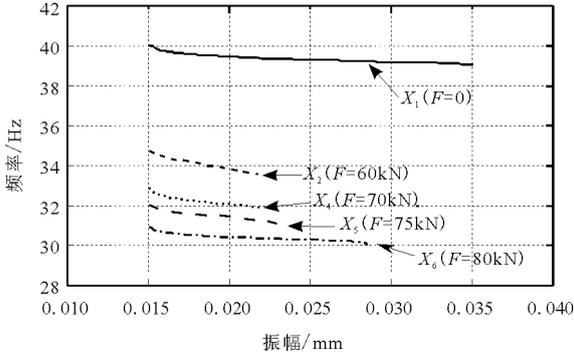


图7 U形梁各状态一阶频率 - 振幅图

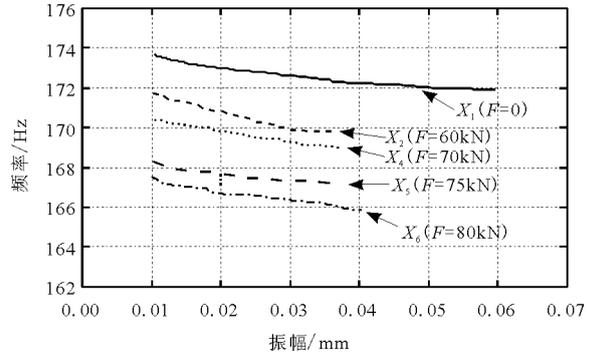


图8 U形梁各状态三阶频率 - 振幅图

由图7和图8频率 - 振幅图可以看出:

- (1) 随着荷载等级的增加, U形梁损伤不断加重, 频率不断减小;
- (2) 随着振幅的增大, 频率值逐渐减小, 且从频率的下降剧烈程度可以看出, 在振幅较小处, 频率变化快, 在振幅较大处, 频率变化较缓慢;
- (3) 每一荷载等级状态的三阶频率变化范围比一阶频率变化范围要大, 且三阶频率比一阶频率更

凸显了前两点描述的规律。

由于各状态频率 - 振幅曲线起点存在频率差, 要对非线性振动程度的比较就比较困难, 为了更好地分析认识频率和振幅的关系及非线性振动特性与梁损伤程度的关系, 现将各状态的曲线起点归零, 消除起点频率差, 即把各状态的一阶频率和三阶频率均减去各自的起始频率值, 然后重新绘制 U形梁的归一化频率 - 振幅图。如图9~10所示。

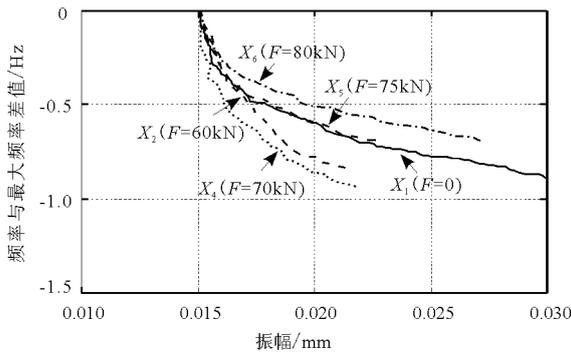


图9 U形梁归一化一阶频率 - 振幅对比图

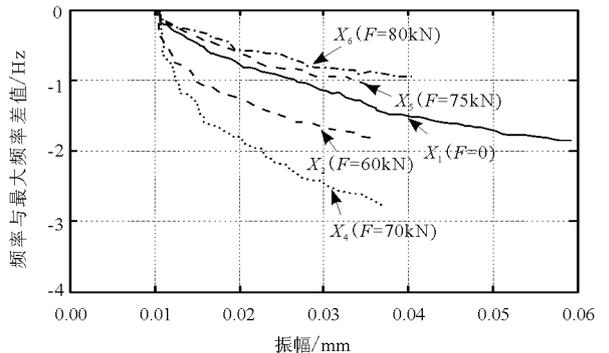


图10 U形梁归一化三阶频率 - 振幅对比图

由图9和图10U形梁归一化频率 - 振幅对比图可以看出:

- (1) 每一状态的减去最大频率后的频率 - 振幅曲线的弯曲程度都是先大后小, 最终趋于平稳, 即频率值减小的幅度呈现出先增大后减小的趋势, 最终频率值趋于常数;
- (2) X_4 状态的归一化频率 - 振幅曲线处在最下面的位置, 其弯曲程度在所有曲线中是最大的, 说明非线性最强; X_6 状态的归一化频率 - 振幅曲线处在最上面的位置, 其弯曲程度最小, 说明非线性最弱;
- (3) X_1, X_2, X_4 状态的曲线弯曲程度呈逐级增大

的趋势, 即非线性程度逐渐增强; 而 X_5, X_6 状态的曲线弯曲程度却呈逐渐减小的趋势, 即非线性程度逐级减弱;

(4) 归一化三阶频率 - 振幅对比图中各条曲线间距比归一化一阶频率 - 振幅对比图中的各条曲线间距大很多, X_1 到 X_4 的过程非线性非常明显, 由此可以看出, 结构的高阶频率对非线性更为敏感。

综上所述: 随着荷载等级的增加, U形梁的损伤程度逐渐加大, 其非线性程度也会发生相应变化: 从未损伤到损伤的过程中, 梁的归一化频率 - 振幅曲线的弯曲程度逐渐增大, 即梁振动的非线性程度逐渐增强, 而当荷载增加到一定程度(本试验是 X_4 状

态荷载等级)之后,梁的归一化频率-振幅曲线的弯曲程度逐级减小,即梁振动的非线性程度逐渐减弱,且高阶频率对非线性更敏感。

6 结 论

本文通过一根 1:10 缩尺比例的钢筋混凝土 U 形梁的静动测试验,对其非线性振动特性展开研究。通过静载试验使 U 形梁产生不同程度的损伤,在各级损伤程度下进行动测试验,对测得的加速度-时间信号进行分析处理,得到各状态下的一阶和三阶频率-振幅图和归一化频率-振幅对比图,分析得到以下结论:

(1)在同级损伤荷载条件下的同次动测试验中,瞬时频率随振幅减小而增大,且频率的变化剧烈程度随振幅的增大而减小,这种规律与 U 形梁本身是否损伤及损伤程度无关。

(2)U 形梁振动的非线性程度随梁体损伤的加重呈现先增大后减小的趋势。且高阶频率对非线性更为敏感。

(3)U 形梁的损伤程度随荷载等级的增加而增加,其非线性程度大体呈现先增大后减小的趋势,临近破坏时非线性特征显著减弱。且随损伤程度的增加,频率并不是单调降低,而是出现了频率往复的现象。此时如果通过基于线性振动的频率变化来判断损伤程度的改变,则会出现误判,而非线性振动分析则给出了更准确的结果。

(4)对于一般的 U 形梁或其他结构,非线性振动特性与损伤程度之间是先增加后减小的关系,单独使用非线性振动特性来进行结构损伤识别是不可靠的,但是可以将其作为一种手段预警结构损伤并与其他检测方法结合使用。对于对完整性要求很高的结构,因其对损伤很敏感,在损伤程度很小的范围内,非线性随损伤程度呈单调增强的趋势,则可以利用非线性振动特性来进行结构损伤检测。

参考文献:

[1] 易伟建,段素萍. 带裂缝钢筋混凝土梁的非线性振动特

征识别[J]. 振动与冲击, 2008, 27(3): 26-29+41.

[2] 王利恒,周锡元,阎维明,等. 钢筋混凝土梁非线性动力特性试验研究[J]. 地震研究, 2006, 29(1): 65-71.

[3] 曹晖,郑晓宇. 基于盲源分离的钢筋混凝土梁非线性振动特性分析[J]. 工程力学, 2012, 29(12): 121-126.

[4] Tsyfansky S L, Beresnevich V I. Non-linear vibration method for detection of fatigue cracks in aircraft wings[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 236(1): 49-60.

[5] Neild S A, Williams M S, McFadden P D. Nonlinear vibration characteristics of damaged concrete beams [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(2): 260-268.

[6] Neild S A, Williams M S, McFadden P D. Non-linear behaviour of reinforced concrete beams under low-amplitude cyclic and vibration loads [J]. Engineering Structures, 2002, 24(6): 707-718.

[7] Abeele K V D, Visscher J D. Damage assessment in reinforced concrete using spectral and temporal nonlinear vibration techniques [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(9): 1453-1464.

[8] 曹晖,郑星,华建民,等. 基于非线性振动特性的预应力混凝土梁损伤识别[J]. 工程力学, 2014, 31(2): 190-194.

[9] 郑星. 基于非线性振动技术的预应力混凝土梁损伤检测[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.

[10] 任宜春,易伟建. 钢筋混凝土梁的非线性振动识别研究[J]. 工程力学, 2006, 23(8): 90-95.

[11] 任宜春,易伟建,谢献忠. 基于 Hilbert-Huang 变换的钢筋混凝土框架结构识别[J]. 振动与冲击, 2007, 26(2): 56-60.

[12] 王利恒,周锡元,阎维明. 用锤击试验反应最大值监测钢筋混凝土简支桥梁结构损伤程度的试验研究[J]. 振动与冲击, 2006, 25(1): 90-94.

[13] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [C]// Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, The Royal Society, 1998, 454(1971): 903-995.