

文章编号 :1671 - 6833(2002)03 - 0104 - 03

桥梁损伤检测的曲率模态方法探讨

禹丹江,陈 淮

(郑州大学土木工程学院 河南 郑州 450002)

摘 要 : 曲率模态是结构损伤识别的敏感标示量 , 采用数值仿真方法 , 把曲率模态用于桥梁损伤识别 , 在位移模态中引入噪声之前 , 曲率模态检测方法能准确判断出损伤的位置 , 此时 , 检测结果有很高的准确度和精度 , 可以检测出结构中出现的损伤 . 引入噪声后 , 当位移模态噪声小于 1% 时 , 噪声的影响不太明显 , 仍可以把损伤位置检测出来 , 但当位移模态噪声大于 1% 后 , 不能把损伤位置检测出来 .

关键词 桥梁损伤 ; 检测 ; 曲率模态 ; 数值仿真

中图分类号 : O 346.5 文献标识码 : A

随着我国交通运输事业的发展 , 各种大、中型桥梁不断涌现 . 如何保证已建和将要建设桥梁结构的安全性及使用耐久性越来越受到人们的关注 . 对于已建桥梁 , 随着使用年限的增加 , 其强度、刚度等性能必然下降 , 桥梁出现损伤 , 其承载能力是否满足要求 , 新建桥梁的施工质量是否达到设计标准 , 诸如此类的问题使得桥梁损伤检测变得更为重要 . 实践证明 , 很多桥梁灾难性事故常常是由微小损伤引起的 . 因此研究判别桥梁是否有损伤、损伤程度与损伤位置及其剩余寿命等问题具有重要的实用价值^[1].

根据结构动力学理论可知 , 结构损伤的存在 , 必然会影响到结构的动态特性 , 使得各种结构参数在不同程度上受到影响 , 一般会降低结构的刚度、增大阻尼、改变振动频率与振动模态、引起结构边界条件的变化等 , 使结构显示出与正常结构相区别的动态特性 , 所以可以利用结构系统各种模态参数的变化作为特征标识量来诊断结构的损伤 . 对这类方法的研究已成为世界范围内相关的科学工作者与工程师们关注的热点 .

1 结构损伤检测的曲率模态方法

进行结构损伤识别 , 首先需要解决损伤标识量的选择问题 . 用于损伤识别的物理量可以是全局量 , 但用于损伤定位的物理量最好是局域量 , 且需要满足两个基本条件 : 一是对局部损伤敏感 ; 二

是位置坐标的单调函数^[1]. 文献 [2] 指出 , 振型对于局部损伤的敏感性大于其它参数的敏感性 , 对应于相关的位移模态 , 曲率模态属于承弯振动结构动态特性的又一表现形式 , 但曲率模态对于结构局部几何尺寸的变化和内部损伤等更为敏感 . 下面说明曲率模态是满足这两个条件的标识量 .

材料力学给出了直梁弯曲变形的基本公式 :

1 / ρ = M / EI . (1)

式中 : M 是梁承受的弯矩 ; EI 是梁的抗弯刚度 ; ρ 是梁轴线变形后的曲率半径 , 1 / ρ 为曲率 .

由微分学可知 , 平面曲线上任一点曲率 1 / ρ 可近似写为

1 / ρ = d²w / dx² . (2)

式中 : w 为梁弯曲变形挠度 ; x 为沿梁长度坐标 .

文献 [2 ~ 4] 给出了曲率响应的表达式

{w''} = ∑_{r=1}^m {φ''_r} {X_r} {f} / {k_r - m_r ω² + j ω c_r} . (3)

曲率是位移的二阶导数 , 对应于每一阶弯曲位移模态 , 则必有其对应的曲率分布状态 , 这种与位移模态相对应的曲率分布状态称之为曲率模态 . 式 (3) 中 φ''(x) 即为曲率模态^[2]. 将式 (3) 写成矩阵形式

[w''] = [φ''_r] [Y_r] [φ_r]^T {f} . (4)

其中 [Y_r] = (- ω² [m_r] + [k_r] + j ω [c_r])⁻¹ .

[w''] 的一阶微分增量为

收稿日期 2002 - 03 - 26 ; 修订日期 2002 - 06 - 22

基金项目 河南省自然科学基金资助项目 (004040100)

作者简介 禹丹江 (1977 -) , 男 , 河南省郑州市人 , 郑州大学硕士研究生 , 主要从事结构工程方面的研究 .

$$[\Delta w''] = [\phi_r'' \mathbf{I} Y_r \mathbf{I} \phi_r]^\top + [\phi_r'' \mathbf{I} \Delta Y_r] [\phi_r]^\top + [\phi_r'' \mathbf{I} Y_r \mathbf{I} \Delta \phi_r]^\top \{f\}. \quad (5)$$

式(5)表明,由结构损伤而导致的结构曲率变化 $[\Delta w'']$ 主要由结构曲率模态的变化 $[\Delta \phi_r'']$ 、结构自振频率的变化 $[\Delta Y_r]$ 和结构位移模态的变化 $[\Delta \phi_r]$ 三者综合而成,且 $[\Delta w'']$ 和 $[\Delta \phi_r'']$ 的变化在位置坐标上存在一致的对应关系^[3].

曲率模态不能直接测量,它可由弯曲位移模态测量间接得到,即在位移模态测量的基础上,由差分计算可得到曲率模态^[5].令 $c_{i,j}$ 和 $z_{i,j}$ 分别表示梁的曲率模态和位移模态,其中 i 为梁节点号; j 为模态阶次; l_i 为第 i 个梁单元的长度.则曲率模态为

$$c_{i,j} = \frac{z_{(i-1),j} - 2z_{i,j} + z_{(i+1),j}}{l_{i-1}l_i}. \quad (6)$$

2 数值仿真

本文对某一简支梁桥中的T形梁进行数值仿真,探讨采用曲率模态方法检测桥梁损伤的情况.该简支梁是预应力钢筋混凝土T形梁,标准跨径 $L=30\text{ m}$,计算跨径 $l=29.16\text{ m}$;主梁采用40号混凝土,弹性模量 $E_h=3.3\times 10^4\text{ MPa}$,主梁纵横截面

布置及各部分尺寸如图1所示.

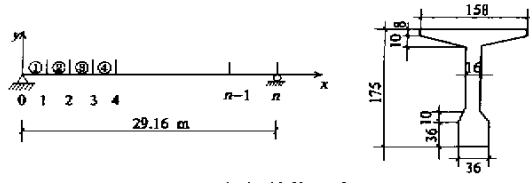


图1 桥梁结构示意图

Fig.1 Sketch map of bridge structure

为了模拟桥梁的损伤,令损伤后桥梁的第 k 个单元抗弯刚度 EI 下降30%(由于混凝土开裂等原因造成),单元质量不变.通过特征值求解程序求得桥梁有损伤时的固有圆频率 Ω_D 和位移模态矩阵 Z_D ;另外也求得无损桥梁的固有圆频率 Ω_0 和位移模态矩阵 Z_0 .计算时只考虑前5阶模态.

将T形梁平均划分为31个节点、30个梁单元,分2种工况计算桥梁损伤情况.工况1:损伤点位置位于单元 $k=8$ (一处损伤);工况2:损伤点位置位于单元 $K=8,20$ (两处损伤),损伤程度为平均抗弯刚度下降30%.特征值(自振频率)计算结果列于表1,计算所得模态如图2所示(图中符号 \square 表示1阶, \circ 表示2阶, \triangle 表示3阶, \diamond 表示4阶; \times 表示5阶).

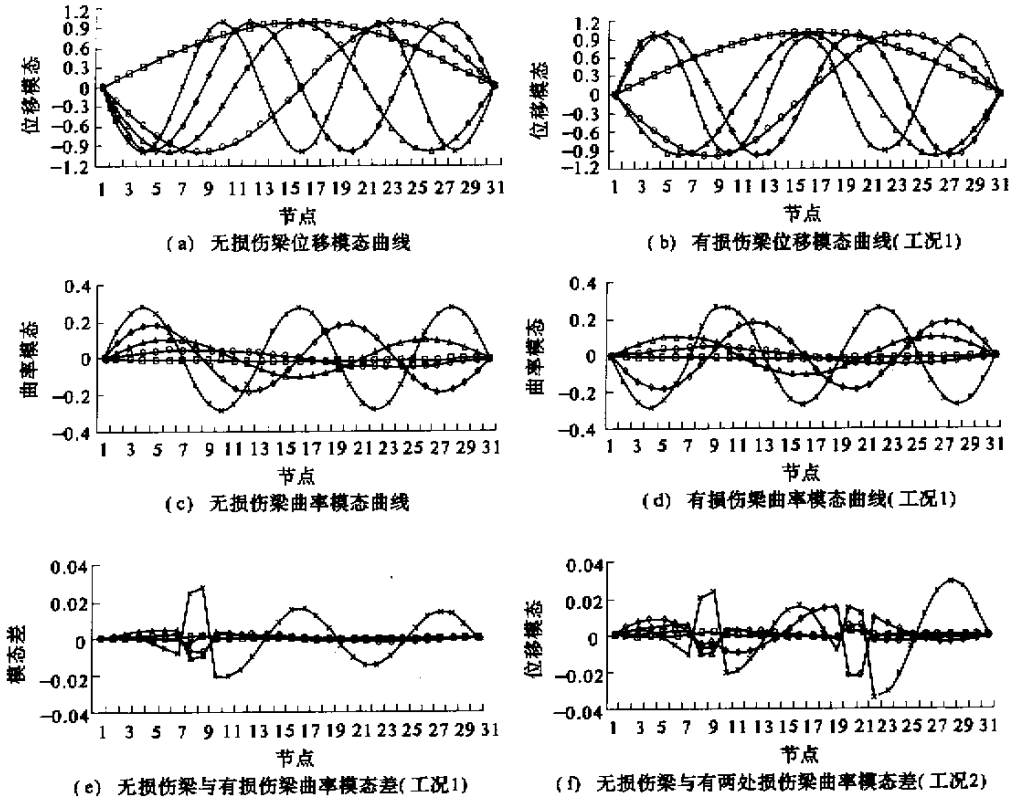


图2 桥梁模态图

Fig.2 Mode of bridge

表 1 桥梁自振频率

Tab.1	Frequency of bridge				Hz
频率阶次	1	2	3	4	5
无损伤	3.963	16.400	37.041	65.753	102.775
单元 8 损伤	3.881	16.133	36.770	65.728	101.985
单元 8 20 损伤	3.801	15.978	36.731	64.922	101.327

从表 1 可以看出 ,损伤对结构自振频率影响较小 ,结构自振频率改变不大 ,结构自振频率不是结构损伤检测的敏感标识量 .

从图 2 可以看出 ,当桥梁有损伤时 ,位移模态对损伤不敏感 ,曲率模态曲线在损伤单元处可以观察到损伤造成的尖峰 ,曲线变得不平滑 ;在曲率模态差曲线上 ,数值突变处即为损伤单元位置 ,曲线明显不平顺 ,而其它区域则受损伤影响很小 .当桥梁有两处损伤时 ,两处损伤对曲率模态曲线并不相互影响 ,两处损伤位置仍然可以清楚看到 .

根据曲率模态可以识别受弯结构的损伤 ,结构损伤前后曲率模态的改变可以指出损伤位置 ,其规律是 :曲率模态变化大的部分出现在损伤区域附近 ,而没有损伤的部位曲率模态变化平坦 .

在实际测量中 ,由于位移模态测量中的误差不可避免 ,为了讨论测量误差的影响 ,对计算所得的位移模态加上均值为零的白噪声 ,以便模拟实际测量误差 ,采用如下位移模态噪声模拟公式

$$\tilde{z} = z(1 + r) \tag{7}$$

式中 \tilde{z} 和 z 分别为加噪声后和加噪声前的位移模态值 ; r 是随机数(均值为零的白噪声 ,例如加 1% 的噪声 ,则 $r = 0.01$).

计算结果表明 ,位移模态中引入小于 1% 的噪声后 ,结构损伤位置还是能够被检测出来 ,但在位移模态中引入大于 1% 的噪声 ,由于噪声的影响 ,造成从差分得到的曲率模态曲线形状不稳定 ,结构损伤位置不能被检测出来 .

3 结束语

本文通过数值仿真 ,说明了曲率模态是结构损伤识别的敏感标示量 ,曲率模态是较频率和位移模态对损伤更敏感的量 ,可以用曲率模态检测梁式结构损伤的存在与位置 ,且曲率模态对多处损伤部位敏感 ,各处损伤部位之间不相互影响 ,符合实际检测需要 .

把曲率模态检测结构损伤方法用于桥梁损伤识别 ,在位移模态中引入噪声之前 ,该方法能准确判断出损伤的位置 ,此时 ,检测结果有很高的准确度和精度 ,可以检测到结构中出现的损伤 .引入噪声后 ,由于噪声的影响 ,使得位移模态产生波动 ,从而导致由位移模态通过 2 阶差分(求导)得到的曲率模态曲线发生变化 ,当噪声小于 1% 时 ,噪声的影响不太明显 ,可以把损伤位置定位出来 ,但当噪声大于 1% 后 ,不能把损伤位置检测出来 .

要将曲率模态检测结构损伤方法应用于实际工程损伤检测 ,首先需要解决测量方法问题 ,主要是模态测量的精度问题 ,需要提高检测位移模态的精度以减少误差对损伤的影响 ,若采用滤波等手段以减少噪音的影响 ,则可以增强检测效果 .

参考文献 :

[1] 陈长征 ,罗跃纲 ,白秉三 ,等 .结构损伤检测与智能诊断 [M].北京 :科学出版社 ,2001 .
[2] 李德葆 ,陆秋海 .实验模态分析及其应用 [M].北京 :科学出版社 ,2001 .
[3] 李德葆 ,诸葛鸿程 ,王 波 .实验应变模态分析原理和方法 [J].清华大学学报 (自然科学版) ,1990 ,30 (2) :105 - 112 .
[4] 邓 炎 ,严普强 .梁及桥梁应变模态与损伤测量的新方法 [J].清华大学学报 (自然科学版) ,2000 ,40 (11) :123 - 127 .
[5] 张德文 ,魏阜旋 .模型修正与破损诊断 [M].北京 :科学出版社 ,1999 .

Discussion on Damage Detection of Bridges Using Curvature Mode Method

YU Dan - jiang , CHEN Huai

(College of Civil Engineering ,Zhengzhou University ,Zhengzhou 450002 ,China)

Abstract : Based on numerical simulation , the curvature modal method used in damage detection of bridges is discussed . The curvature mode is very sensitive . When curvature mode is used in the damage detection of bridges , it can locate the damage accurately before adding noise to displacement mode . Here the result has high precision and can identify the damage . When the noise added to displacement mode is lower than 1% , its influence is indistinct , but the damage can still be detected . When the noise is higher than 1% , the damage cannot be located .

Key words : 力学数据 ; detection ; curvature mode ; numerical simulation