

基于局部刚度识别和曲率模态的 梁结构状态预警方法

谈志成¹, 马中军^{2,3}, 张 钢¹

(1. 南阳理工学院建筑设计院, 河南 南阳 473004; 2. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070;
3. 南阳理工学院土木工程学院, 河南 南阳 473004)

摘 要: 为了对局部抗弯刚度具有不确定性的梁结构进行损伤识别和状态预警, 基于虚拟分割的概念, 对服役前的梁按简支工况进行静力加载, 按照一种新的加载制度和跨中挠度数据处理方法可通过求解线性方程组来得到各区间的真实局部抗弯刚度值, 利用得到的刚度数据可以建立有限元模型, 进而对服役中的梁进行模态识别, 采用曲率模态指标来进行损伤定位。研究表明: 新方法可以有效地区分损伤和初始不确定的局部抗弯刚度, 实现对真实损伤的识别, 而且可以不影响梁的正常使用。

关键词: 梁; 预警; 刚度; 局部; 曲率

中图分类号: TU 317

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2013)06-0847-06

为了保证各类梁结构能正常发挥作用、不出现事故, 需要对其工作状态进行预警, 一旦出现了损伤则发出警示, 提醒人们进行维护和处理。对于不同的梁来说, 损伤可能有不同的形式, 如钢材锈蚀、裂开, 混凝土开裂、崩落等。为了简化起见, 这些损伤在理论上可统一用局部抗弯刚度的变化来代表^[1]。目前可进行抗弯刚度识别的指标有多种, 如: 静力位移指标^[2]、静力曲率指标^[3]、频率和振型^[4-5]、频率响应函数指标^[6]、曲率模态^[7]、应变模态^[8-9]、柔度矩阵与刚度矩阵^[10]、模态应变能^[11]等。此外还有一些方法将这些指标结合起来, 如结合柔度矩阵和曲率指标^[12]、结合应变模态和频率指标^[13]、结合曲率模态和频率指标^[14]等。

但值得注意的是, 现有方法大多都假定结构在完好状态下的局部抗弯刚度是一致的。而实际上, 变截面梁的应用非常普遍, 即使是等截面梁, 由于加工误差的不可避免, 梁截面的几何参数也都是具有不定性的, 应当用随机变量表达。例如, 我国对各类建筑构件的几何参数进行了大量的实测统计工作, 得出了一个统计参数表^[15]。另外, 结构材料的弹性模量也可能具有一定的离散性。因此, 严格来说, 大多数梁的抗弯刚度取值都具有局部不确定性。这种不确定性的程度对于设计来说一般并不大, 可以忽略, 但在进行损伤识别、状态预警时, 由于损伤引起的刚度变化一般也很微小, 所以就不能忽略这种不确定性了, 否则会引起混淆: 即识别出的局部刚度变化是真实损伤造成的还是初始不确定性造成的。

目前有一些研究考虑了梁上局部刚度的不均匀性, 如文献^[16]针对抗弯刚度连续变化、边缘处有裂缝的复杂梁式结构, 采用分段应变能方法给出了一个基于振型模态测量的损伤识别指标 SSEM。但现有方法对于局部抗弯刚度完全随机分布的情况还不能很好地处理。

为此, 本文将提出一个新方法, 首先识别出梁上的真实局部抗弯刚度, 然后采用曲率模态指标来进行损伤定位, 对梁结构状态的退化发出警示。

1 基本步骤

新方法的基本步骤如下:

收稿日期: 2013-03-05 修改稿日期: 2013-11-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50978151); 河南省科技攻关项目(122102210165)

作者简介: 谈志成(1974-), 男, 河南信阳人, 高级工程师, 主要研究方向为结构损伤、复杂结构研究等。

- (1) 在梁安装就位之前,将其放置于一个加载装置内,实现两端简支的支撑情况;
- (2) 按特定的制度进行加载和数据测量、处理,得到局部抗弯刚度信息;
- (3) 根据真实的局部抗弯刚度值来建立梁的有限元模型,算出“初始”曲率模态;
- (4) 对服役中的梁,进行动力激励,测出实际的曲率模态,与初始值进行对比.如果有损伤,则能识别出损伤出现的位置,发出警示信号,提示管理方通过人工检测或检查来确认真实损伤情况,及时进行处理.

下面首先介绍一下如何识别梁的局部抗弯刚度.

2 局部抗弯刚度的识别

首先需要明确“局部”的概念.为简便起见,可采用“虚拟分割”的概念^[17]来描述局部性:将总长为 l 的梁沿纵向等分为若干个区间,以区间为单位来考察局部抗弯刚度.如果将梁分成 n 个区间,则每个区间的局部抗弯刚度可记为 $B_1, B_2, B_3, \dots, B_n$. 可见,有 n 个未知量.

对于 n 个未知量的情况,需要建立 n 个独立的方程才能求解.如何得到这 n 个求解方程? 基本思想是进行 n 次加载,对每次加载建立一个结构响应方程.为便于分析,梁在加载时的支撑状况选定为简支.在每个加载工况下要测量的是梁的跨中挠度 Δ . 下面以虚拟分割成四个区间的梁为例来进行详细说明:

四区间的局部抗弯刚度分别记为 B_1, B_2, B_3, B_4 .

如图1所示:

首先在三个等分点处分别施加一个集中荷载 F :

(1) 当 F 作用于第一个等分点时:加载示意和对应的弯矩图如图2所示:

此时的跨中挠度记为 Δ_1 , 计算式为:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= F \left[\int_0^{\frac{l}{4}} \frac{x^2}{B_1} dx + \int_{\frac{l}{4}}^{\frac{l}{2}} \frac{x(l-x)}{B_2} dx + \int_{\frac{l}{2}}^{\frac{3l}{4}} \frac{(l-x)^2}{B_3} dx + \int_{\frac{3l}{4}}^l \frac{(l-x)^2}{B_4} dx \right] \\ &= F \left[\frac{l^3}{512} \cdot \frac{1}{B_1} + \frac{11l^3}{1536} \cdot \frac{1}{B_2} + \frac{7l^3}{1536} \cdot \frac{1}{B_3} + \frac{l^3}{1536} \cdot \frac{1}{B_4} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

(2) 当 F 作用于第二个等分点时:加载示意和对应的弯矩图如图3所示:

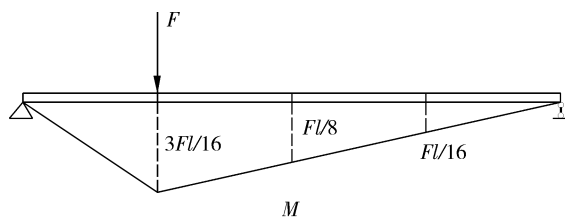


图2 第一次加载和对应的弯矩图

Fig. 2 Sketch of first load and corresponding moment figure

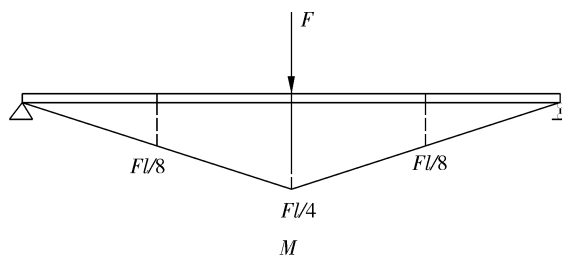


图3 第二次加载和对应的弯矩图

Fig. 3 Sketch of second load and corresponding moment figure

此时的跨中挠度记为 Δ_2 , 计算式为:

$$\begin{aligned} \Delta_2 &= F \left[\int_0^{\frac{l}{4}} \frac{x^2}{B_1} dx + \int_{\frac{l}{4}}^{\frac{l}{2}} \frac{x^2}{B_2} dx + \int_{\frac{l}{2}}^{\frac{3l}{4}} \frac{(l-x)^2}{B_3} dx + \int_{\frac{3l}{4}}^l \frac{(l-x)^2}{B_4} dx \right] \\ &= F \left[\frac{l^3}{768} \cdot \frac{1}{B_1} + \frac{7l^3}{768} \cdot \frac{1}{B_2} + \frac{7l^3}{768} \cdot \frac{1}{B_3} + \frac{l^3}{768} \cdot \frac{1}{B_4} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

(3) 当 F 作用于第三个等分点时:加载示意和对应的弯矩图如图4所示:

此时的跨中挠度记为 Δ_3 , 计算式为:

$$\begin{aligned}\Delta_3 &= F \left[\int_0^{\frac{l}{4}} \frac{x^2}{B_1} dx + \int_{\frac{l}{4}}^{\frac{l}{2}} \frac{x(l-x)}{B_2} dx + \int_{\frac{l}{2}}^{\frac{3l}{4}} \frac{(l-x)^2}{B_3} dx + \int_{\frac{3l}{4}}^l \frac{(l-x)^2}{B_4} dx \right] \\ &= F \left[\frac{l^3}{1536} \cdot \frac{1}{B_1} + \frac{7l^3}{1536} \cdot \frac{1}{B_2} + \frac{11l^3}{1536} \cdot \frac{1}{B_3} + \frac{l^3}{512} \cdot \frac{1}{B_4} \right]\end{aligned}\quad (3)$$

这样就建立起了3个方程,还需要再补充一个方程.为此,补充一种荷载工况:

(4)两个 F 同时作用于第一和第二个等分点:加载示意和对应的弯矩图如图5所示:

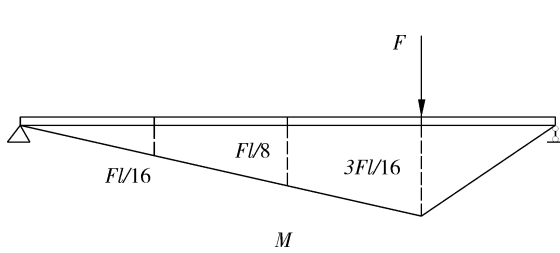


图4 第三次加载和对应的弯矩图

Fig. 4 Sketch of third load and corresponding moment figure

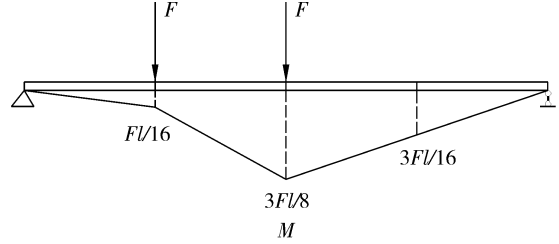


图5 第四次加载和对应的弯矩图

Fig. 5 Sketch of fourth load and corresponding moment figure

此时的跨中挠度记为 Δ_4 ,计算式为:

$$\begin{aligned}\Delta_4 &= F \left[\int_0^{\frac{l}{4}} \frac{x^2}{B_1} dx + \int_{\frac{l}{4}}^{\frac{l}{2}} \frac{x(5x-l)}{B_2} dx + \int_{\frac{l}{2}}^{\frac{3l}{4}} \frac{3(l-x)^2}{B_3} dx + \int_{\frac{3l}{4}}^l \frac{3(l-x)^2}{B_4} dx \right] \\ &= F \left[\frac{l^3}{512} \cdot \frac{1}{B_1} + \frac{17l^3}{1536} \cdot \frac{1}{B_2} + \frac{7l^3}{512} \cdot \frac{1}{B_3} + \frac{l^3}{512} \cdot \frac{1}{B_4} \right]\end{aligned}\quad (4)$$

将以上四式联立起来,即可得到一个线性方程组:

$$\begin{cases} \frac{l^3}{512} \cdot \frac{1}{B_1} + \frac{11l^3}{1536} \cdot \frac{1}{B_2} + \frac{7l^3}{1536} \cdot \frac{1}{B_3} + \frac{l^3}{1536} \cdot \frac{1}{B_4} = \frac{\Delta_1}{F} \\ \frac{l^3}{768} \cdot \frac{1}{B_1} + \frac{7l^3}{768} \cdot \frac{1}{B_2} + \frac{7l^3}{768} \cdot \frac{1}{B_3} + \frac{l^3}{768} \cdot \frac{1}{B_4} = \frac{\Delta_2}{F} \\ \frac{l^3}{1536} \cdot \frac{1}{B_1} + \frac{7l^3}{1536} \cdot \frac{1}{B_2} + \frac{11l^3}{1536} \cdot \frac{1}{B_3} + \frac{l^3}{512} \cdot \frac{1}{B_4} = \frac{\Delta_3}{F} \\ \frac{l^3}{512} \cdot \frac{1}{B_1} + \frac{17l^3}{1536} \cdot \frac{1}{B_2} + \frac{7l^3}{512} \cdot \frac{1}{B_3} + \frac{l^3}{512} \cdot \frac{1}{B_4} = \frac{\Delta_4}{F} \end{cases}\quad (5)$$

在加载过程中实测出 Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_3 、 Δ_4 的值之后,由式(5)可求解出未知量 $1/B_1$ 、 $1/B_2$ 、 $1/B_3$ 、 $1/B_4$,进而可得出 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 的值.

显然,以上过程可推广到任意数量区间的情况:对于 n 个区间的情况,可在其 $n-1$ 个等分点处进行加载,得到 $n-1$ 个方程,然后再补充一个两集中荷载同时作用的情况,即可得到 n 个求解方程,求出 n 个局部抗弯刚度参数 $B_1 \sim B_n$.

以上加载工况在普通加载机上不难实现:在加载端头下布置分配梁即可.分配梁与梁体接触的部分做成三角形或弧形以实现集中荷载的工况.

3 损伤的定位

从理论上来说,在梁损伤前后分别进行一次上述过程即可得到两组局部抗弯刚度数据,对比之后就可以发现损伤位置信息.但对于很多实际梁来说,服役期间不易拆卸下来进行专门的加载,而且对于刚度比较大的梁来说,挠度值比较微小,不容易测准确,受误差的影响较大.

为此,可考虑和结构动力学方法结合起来,在进行损伤定位时采用动力性能指标——曲率模态作为直接指标.具体来说,首先根据得到的真实局部抗弯刚度值来建立梁的有限元模型,每个“区间”对应模型中的每个“单元”,基于此模型算出“初始”曲率模态.然后,对服役中的梁进行动力测试,得到其当前的

曲率模态,通过对比这两组曲率模态数据来实现损伤定位.这样就不需移动梁的工作位置,也不需让其处于简支的支撑状态.

服役梁的曲率模态的获取方法:在梁的纵向沿一定间隔布置若干个加速度测点,对梁进行激励使其振动起来,然后通过测得的各加速度数值换算出梁的各阶振型(位移模态),对位移模态进行差分计算可得到各阶曲率模态.计算方法如下:

$$\varphi''_{i,j} = \frac{\varphi_{i-1,j} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i+1,j}}{l^2} \quad (6)$$

其中: i 为测点编号; $\varphi''_{i,j}$ 为第 i 个测点的第 j 阶曲率模态值; l 为相邻测点间距; $\varphi'_{i,j}$ 为第 i 个测点的第 j 阶位移模态值.

下面结合算例来进行具体说明:

算例:某简支梁,材料为Q235钢,长度为1.5 m,划分为15个区间,每个区间长0.1 m,设计截面高度为0.2 m,宽度为0.1 m.考虑由于加工误差等因素造成的离散性,假设区间2和6的实际截面高度为0.201 m,区间1和12的实际高度为0.199 m,区间3和14的实际高度为0.202 m.然后假设区间6内出现了损伤,造成区间内的实际高度减小了0.001 m,变为0.2 m.

可得到3组曲率模态数据:(1)状态1:不考虑离散性,认为梁所有截面的高度均为0.2 m、宽度均为0.1 m,建立有限元模型后算出的曲率模态数据;(2)状态2:按识别出的各区间实际刚度(这里即采用已知的实际截面尺寸)建立有限元模型后算出的曲率模态数据;(3)损伤后:基于实际刚度建立的有限元模型,考虑损伤引起的刚度变化进行改动(根据这里的损伤设定,改动 B_6),按改动后的模型计算出的曲率模态数据.显然,对比第2组和第3组数据是进行真正的损伤识别,可验证本文方法的效果.为了清楚起见,先得到曲率模态数据的图形后再进行曲线的对比.另外,为了说明实际局部抗弯刚度不确定性的影响,也将第1组数据纳入了对比分析.根据目前的方法,对实际结构进行模态识别时只对低阶模态的准确度比较高,因此这里只考虑前4阶模态.

(1)模态1

根据3种模型算出的振型数据,按式(6)计算得到3组曲率模态数据,得到3条曲线如图6所示:

横坐标为各区间节点的坐标值,单位为m.可见,对比状态1曲线和损伤后曲线的话,看不出和损伤位置有直接关系,而状态2曲线和损伤后的曲线整体比较接近,为此将二者的曲率模态数据差值作为纵坐标另作图形以更清楚地显示,得到图7:

可见,图7上图形发生突变的位置正好出现在区间6的位置,对应了损伤

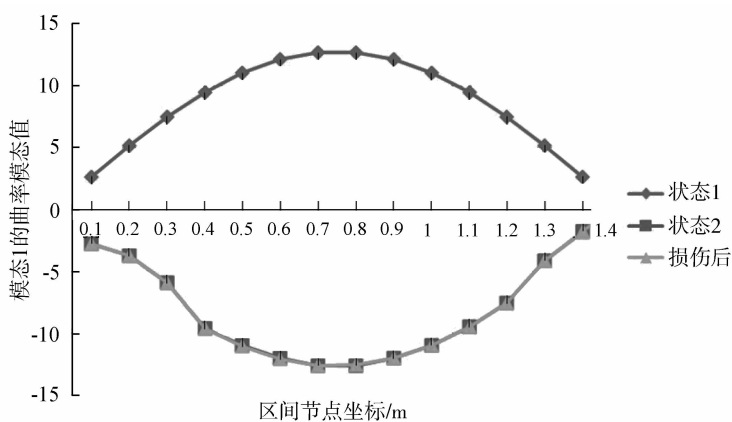


图6 第一阶曲率模态

Fig. 6 First curvature mode

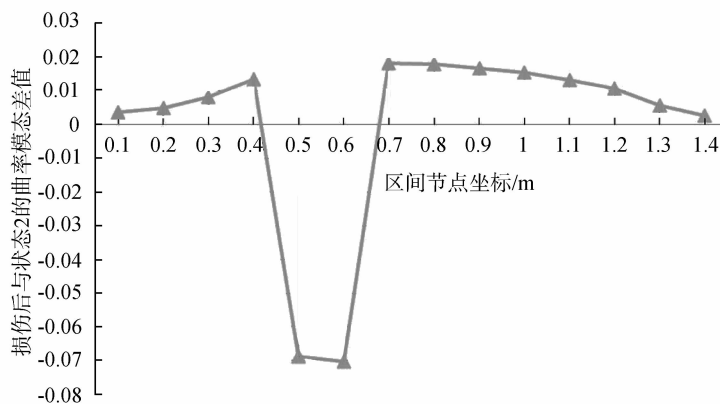


图7 第一阶曲率模态的数据差值图

Fig. 7 Data difference figure of the first curvature mode

的情况,说明了本文方法的有效性。

(2) 模态 2—4

对于模态 2,同样得到 3 组曲率模态的数据曲线如图 8 所示。可见,状态 1 曲线和损伤后曲线的对比看不出和损伤位置有直接关系,然后将状态 2 和损伤后的曲率模态数据差值作为纵坐标另作图 9。对于模态 3,同样得到 3 组曲率模态的数据曲线如图 10 所示。状态 1 曲线和损伤后曲线的对比也看不出和损伤位置有直接关系,然后将状态 2 和损伤后的曲率模态数据差值作为纵坐标另作图 11。对于模态 4,同样得到 3 组曲率模态的数据曲线如图 12 所示。状态 1 曲线和损伤后曲线的对比也看不出和损伤位置有直接关系,然后将状态 2 和损伤后的曲率模态数据差值作为纵坐标另作图 13。

可见,图 9、图 11、图 13 上图形发生突变的位置也都正好出现在区间 6 的位置,对应了损伤情况,同样说明了方法的有效性。

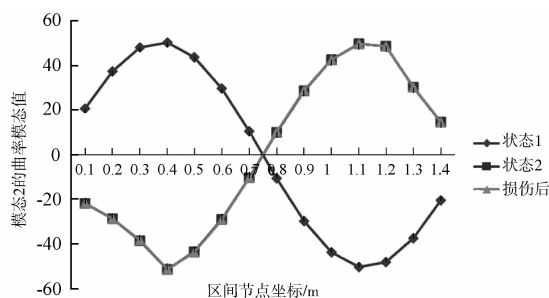


图 8 第二阶曲率模态

Fig. 8 Second curvature mode

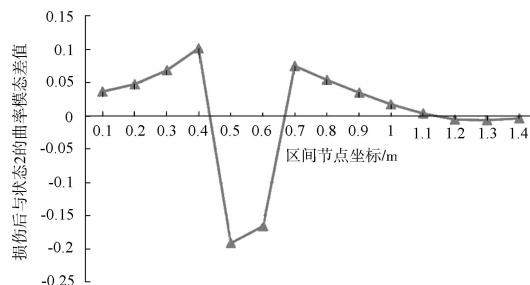


图 9 第二阶曲率模态的数据差值图

Fig. 9 Data difference figure of the second curvature mode

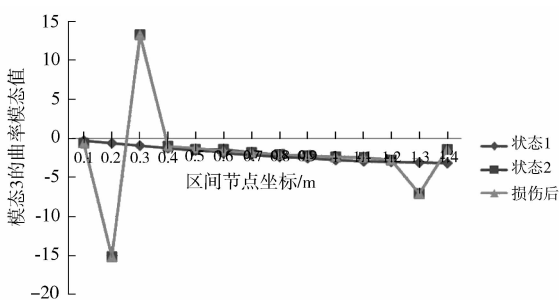


图 10 第三阶曲率模态

Fig. 10 Third curvature mode

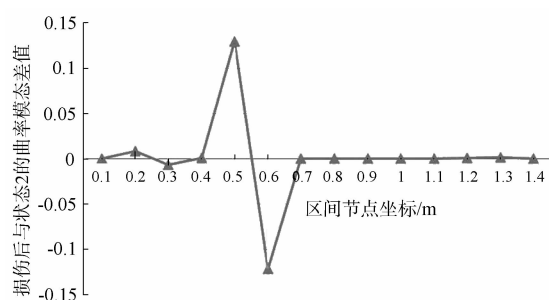


图 11 第三阶曲率模态的数据差值图

Fig. 11 Data difference figure of the third curvature mode

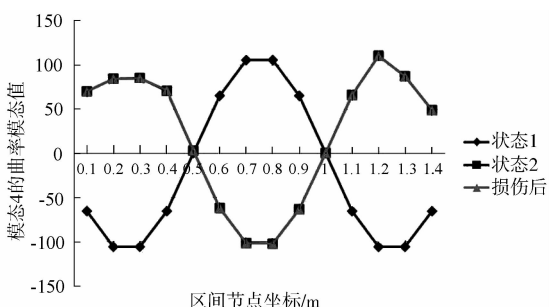


图 12 第四阶曲率模态

Fig. 12 Fourth curvature mode

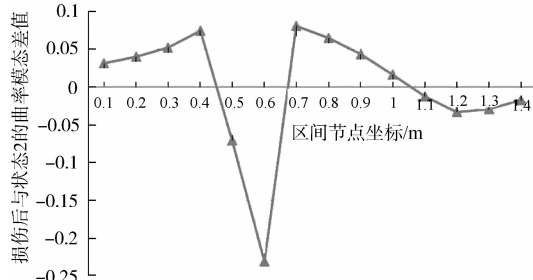


图 13 第四阶曲率模态的数据差值图

Fig. 13 Data difference figure of the fourth curvature mode

小结:通过对真实局部抗弯刚度的识别,可建立起符合实际情况的初始模型,以其作为基准状态可以利用曲率模态指标有效地实现损伤识别,算例表明四阶模态均能正确指示出损伤位置。而如果不考虑不确定性,以“理想”模型作为基准状态的话,则曲率模态指标不能识别出损伤位置。

4 结 语

本文方法的主要特点:(1)考虑了实际梁的局部抗弯刚度不确定性,为与真实损伤进行区分,先在区间等效的意义下进行真实局部刚度的识别;(2)分两阶段进行两种测试:对服役前的梁,在加载机上按简支工况进行静力性能测试;对服役中的梁,在实际位置进行动力性能测试.这样可以既不影响梁的正常使用,又能得到比较准确的结果,增强了方法的适用性;(3)分两阶段进行两种计算:对服役前的梁,根据测得的跨中挠度值建立求解方程组,得出各区间的抗弯刚度;对服役中的梁,根据测得的加速度数据计算得到各阶位移模态,进而得到曲率模态;(4)以图形的方式进行损伤前后各阶曲率模态的对比,通过曲线形状的变化可直观简便地确认损伤位置,便于实际应用;(5)适用于各类梁结构,包括土木工程中最常用的混凝土梁和钢梁.混凝土梁初始抗弯刚度的离散程度明显大于钢梁,但在应用本方法时没有区别.

参考文献 References

- [1] CURADELLI, R O, RIEA, J D, AMBROSINI D, et al. Damage detection by means of structural damping identification [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(12): 3497-3504.
- [2] GARCIA, O, VEHI J, MATOS J C. et al., Structural assessment under uncertain parameters via interval analysis [J]. *Journal of Computation and Applied Mathematics*, 2008, 218(1): 43-52.
- [3] 陈孝珍. 基于静态测量数据的桥梁结构损伤识别研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005
CHEN Xiao-zhen. Study on bridge damage detection based on static measurement data [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [4] GUO, H Y, LI, Z L., A two-stage method to identify structural damage sites and extents by using evidence theory and micro-search genetic algorithm [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, 23: 769-782.
- [5] ISMAIL Z, ONG A Z C., RAHMAN A. G A. Crack damage detection of reinforced concrete beams using local stiffness indicator [J]. *Scientific Research and Essays*, 2011, 6(34): 6798-6803.
- [6] PARK N G, PARK Y S. Detection of damage on a substructure with measured frequency response functions [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2005, 19 (10): 1891-1901.
- [7] TOMASZEWSKA A. Influence of statistical errors on damage detection based on structural flexibility and mode shape curvature [J]. *Computer and Structures*. 2010, 88(3/4): 154-164.
- [8] LI, Y Y, CHENG, L, YAM, L H, et al. Detection of damage locations for plate-like structures using damage sensitive indices: strain mode approach [J]. *Computer and structures*, 2002, 80: 1881-1894.
- [9] 顾培英, 陈厚群, 李同春等. 基于应变模态差分原理的直接定位损伤指标法 [J]. *振动与冲击*, 2006, 25(3): 13-18.
GU Pei-ying, CHEN Hou-qun, LI Tong-chun, et al. Direct index method of damage location detection based on difference theory of strain modal shapes [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2006, 25(3): 13-18.
- [10] AIMIN Y, JEAN-CLAUDE G. Structural damage localization by combining flexibility and stiffness methods [J]. *Engineering Structures*, 2005, 27: 1752-1761.
- [11] HU H W, WU C B. Development of scanning damage index for the damage detection of plate structures using mode strain energy method [J]. *Mechanical System and Signal Processing*, 2009, 23(2): 274-287.
- [12] 肖调生, 阳 勇. 结构损伤识别的柔度差值曲率法 [J]. *吉首大学学报: 自然科学版*. 2006, 27(2): 74-76.
XIAO Tiao-sheng, YANG Yong. Flexibility differential curvature method for structural damage identification [J]. *Journal of Jishou University: Natural Science Edition*, 2006, 27(2): 74-76.
- [13] 腾海文, 霍 达, 姜雪封, 等. 结构损伤位置识别的组合指标法 [J]. *北京工业大学学报*. 2007, 33(5): 493-497.
TENG Hai-wen, HUO Da, JIANG Xuefeng, et al. Combination index of damage locating detection for structures [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2007, 33(5): 493-497.
- [14] SAHIN M, SHENOI R A. Quantification and localization of damage in beam-like structures by using artificial neural networks with experimental validation [J]. *Engineering Structures*, 2003, 25: 1785-1802.
- [15] 柳炳康. 工程荷载与可靠度设计原理[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2011.
LIU Bing-kang. Engineering load and reliability design theory [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2011.

Equivalent stiffness of rib board based on the energy principle

DING Ting¹, DING Sheng-guo¹, JIANG Yu²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Guiyang Technical Safety Supervision Bureau, Guiyang 550081, China)

Abstract: The method to derive the thickness calculation expression of rib board by the principle of equivalent stiffness of the rib board is applicable to not only the board arranged in transverse and longitudinal beam, but also all kinds of support conditions at plate edges, including the supported plate on boundary points. In allusion to different types of boundary constraints status of rib board in engineering, various forms of buckling trial function are given. With only simple numerical integration involved in the calculation process, it is convenient for the application of engineering and technical personnel. Compared with finite element method, the computer program is not needed. The results of several typical examples show that the deflection distribution and reverse angle characteristics of the front and back plate are consistent with the calculation result of finite element method with the calculating error of 3%~6%.

Key words: Cast-in-situ rib board, equivalent stiffness, the energy method

Biography: DING Ting, Master, Guiyang 550025, P. R. China, Tel:0086-13985470702, E-mail:dthjy@163.com

(上接第 852 页)

- [16] FENG K, LI Z, GAO G Y, et al. Damage detection method in complicated beams with varying flexural stiffness [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2011, 32(4): 469-478
- [17] WANG Y L, LIU X L, FANG C Q. Damage Detection of Bridges by Using Displacement Data of Two Symmetrical Points [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2012, 26(3): 300-311.

Beam Early Warning Method based on local stiffness detection and mode shape curvature

TAN Zhi-cheng¹, MA Zhong-jun^{2,3}, ZHANG Yin¹

(1. Architecture Design Institute, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

3. School of Civil Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China)

Abstract: Highlighted in this paper is the damage detection and status early warning of beam structures with uncertain local flexural stiffness. Based on the concept of *Suppositional Partition*, static load is applied to the beam before serving and the beam should be simply supported. By using a novel loading system and mid-span deflection data processing method, actual local flexural stiffness value of each interval can be obtained by solving a set of linear equations. The obtained local stiffness data can be used to establish the finite element model of beams. Subsequently, mode identification is carried out for the beam in service and mode shape curvature index has been employed to detect the position of damage. Research results show that damage and original uncertainty of local flexural stiffness can be differentiated by this new method effectively and then the actual damage can be detected. Moreover, serviceability of the beam will not be affected.

Key words: beam; early warning; stiffness; local; curvature

Biography: TAN Zhi-cheng, Senior Engineer, Nanyang 473004, P. R. China, Tel:0086-15837773387, E-mail:Mzj0722@126.com