

文章编号:1673-2049(2006)04-0024-04

基于曲率模态的钢筋混凝土梁多点损伤位置识别

常 军^{1,2}

(1. 苏州科技学院 管理科学与工程系, 江苏 苏州 215011;

2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:采用曲率模态对钢筋混凝土梁的多点损伤位置进行了识别研究。首先用有限元程序建立结构模型,并计算出位移模态振型,然后用差分法计算出曲率模态;同时对实际结构进行检测,得到结构的振型并计算出曲率模态。通过有限元模型和实际结构的曲率模态计算得到结构损伤因子,通过分析该损伤因子,可以判断实际结构的损伤位置。数值模拟算例分析表明,曲率模态对结构的损伤较敏感,用该方法识别结构的多点损伤位置是行之有效的。

关键词:钢筋混凝土梁;损伤识别;曲率模态;动力特性;有限元方法

中图分类号:TU375.1

文献标志码:A

Curvature Model Based Many Damage Locations Identification of Reinforced Concrete Beam

CHANG Jun^{1,2}

(1. Department of Management Science and Engineering, University of Science and Technology of Suzhou,

Suzhou 215011, Jiangsu, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in

Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: An approach of structural many damage locations of reinforced concrete beam identification by curvature model was studied. Firstly, the finite element software of structure was built; the structural displacement models vibration shape was computed. By using the central difference approximation, the curvature models were then gained from the displacement mode shapes. At the same time, the real structure was inspected; the structural displacement models were gained and the curvature modes were calculated. Through comparing the curvature modes of real structure with finite element model, a damage factor was gained. Based on analyzing the damage factor, damage location can be identified. Numerical simulation analysis shows that the curvature model has a little sensitivity to damage of structures; it is an effective method to evaluate many damage locations identification of structure.

Key words: reinforced concrete beam; damage identification; curvature model; dynamic characteristic; finite element method

0 引言

结构在使用过程中由于各种原因会产生不同程

度的损伤,这些损伤可能导致结构失稳或强度损伤,影响结构的正常运行和效益的发挥^[1-3]。为此,有必要对结构的健康状况作出判断,对结构运行的可靠

收稿日期:2006-10-12

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2002CB412709)

作者简介:常 军(1973-),男,江苏丰县人,苏州科技学院讲师,工学博士,E-mail:changjun21@126.com。

性进行评估,其中的关键问题是寻找有效的检测手段,以便快速、准确地发现结构中存在的损伤,为结构的安全评价提供可靠的方法,并为处理病险工程提供科学依据。

结构损伤会导致结构的动力特性发生变化,如固有频率、固有振型和模态阻尼的变化。通过研究结构动力特性的变化进行结构损伤的检测是目前研究的一个重要方面^[4]。传统的基于结构动力特性的损伤检测有许多比较成熟的方法^[5-6],但在结构局部受损且受损程度较低时,结构模态参数的改变并不明显,这无论是根据结构固有频率的改变或模态阻尼的改变,还是由模态置信度判据(MAC)值,都不能有效地显示出结构是否产生了损伤。由文献[7]可知,当工形梁横截面断裂 1/2 时,固有频率、模态阻尼和模态置信判据值与完好结构有明显的差异,但对于在某些振型节线处采集到的数据,当结构损伤严重时,此参数值与完好结构的没有发生明显的变化。传统的基于结构动力特性的损伤检测对损伤的定位则是比较困难的。笔者对曲率模态进行改进,并用其对简支梁和桁架结构进行了结构单点损伤位置识别研究^[8-10]。Pandey 等^[11]采用曲率模态分析的方法对简支梁和悬臂梁的损伤进行了研究,结果表明,曲率模态对局部参数变化较传统的模态分析方法更为敏感,在结构的损伤检测及损伤定位中具有优越性;Wahab 等^[12]采用曲率模态分析的方法对实桥的损伤进行了检测;邓焱等^[13]采用曲率模态分析的方法对梁及桥梁的结构损伤进行了研究;Lu 等^[14]采用曲率模态对梁结构的多位置损伤进行了研究。目前,曲率模态的研究都是针对梁结构进行的,而针对工程中常用的刚架结构的研究还未见报道^[15-16]。

笔者采用数值模拟的方法研究曲率模态在钢筋混凝土梁多点损伤识别中的应用。

1 结构损伤原理

结构损伤主要体现在两个方面:结构刚度的降低和质量的变化,一般可表示为

$$\mathbf{K}_d = \mathbf{K}_0 + \Delta\mathbf{K} \quad (1)$$

$$\mathbf{M}_d = \mathbf{M}_0 + \Delta\mathbf{M} \quad (2)$$

式中: \mathbf{K}_0 、 \mathbf{M}_0 分别为结构破损前的刚度矩阵、质量矩阵; \mathbf{K}_d 、 \mathbf{M}_d 分别为结构破损后的刚度矩阵、质量矩阵; $\Delta\mathbf{K}$ 、 $\Delta\mathbf{M}$ 分别为由于损伤引起的结构刚度矩阵、质量矩阵的变化量。实际检测中发现,结构损伤时一般不引起结构的质量变化,或者说质量变化很

小,可以忽略,因此,结构损伤检测的重点是研究结构刚度的降低,在建立模型时可以用刚度降低来模拟损伤。

2 应变模态与曲率模态

对于一个具有阻尼的多自由度体系,其运动方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{F}(t) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{x} = \Phi e^{j\omega t}$, Φ 为特征向量 Φ 的分量,对应于式(3)系统的无阻尼自由振动规律可表示为

$$-\omega^2 \mathbf{M}\Phi + \mathbf{K}\Phi = 0 \quad (4)$$

$$\mathbf{A}\Phi = \omega^2 \Phi \quad (5)$$

式中: $\mathbf{A} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}$ 。

由式(3)可知式(4)的特征方程为

$$\det(\mathbf{A} - \omega^2 \mathbf{I}) = 0 \quad (6)$$

式(6)展开为

$$\det(\mathbf{A} - \omega^2 \mathbf{I}) = \prod_{r=1}^N (\Omega_r^2 - \omega^2) = 0 \quad (7)$$

由式(7)可得 Ω_r , 将 Ω_r 代入式(3), 便能得到相应的特征向量 Φ 。

应变是位移的一阶导数,对于每一阶位移模态(振型)必有与其对应的固有应变分布状态,这种与位移模态相对应的固有应变分布状态称为应变模态。和位移模态一样,应变模态反映了结构的固有特性,曲率模态测量是一种用位移测量间接检测应力应变,避免应变片测量局限性的方法。由材料力学得直梁弯曲静力关系为

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{M_m}{E_m I_m} \quad (8)$$

式中: m 为截面位置; M_m 为截面处的弯矩; $E_m I_m$ 为 m 截面处梁的抗弯刚度; ρ_m 为截面处梁的曲率半径, $1/\rho_m$ 为曲率。由直梁弯曲变形近似方程得

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (9)$$

式中: x 为沿直梁长度方向坐标; y 为梁弯曲挠度。将在截面 m 处的式(9)写成差分方程,代入式(8),对沿梁的 3 个等距测点连续测得有

$$\frac{y_{m+1} - 2y_m + y_{m-1}}{\Delta^2} = \frac{M_m}{E_m I_m} \quad (10)$$

式中: y_m 为截面处梁的弯曲挠度; y_{m+1} 和 y_{m-1} 分别为与 m 截面相邻的左右两个测点的弯曲挠度; Δ 为梁上测点离中性线的距离。此外,梁的弯曲变形和应变相对应,应变可表示为

$$\epsilon = -\frac{h}{\rho} = -h \frac{y_{m+1} - 2y_m + y_{m-1}}{\Delta^2} \quad (11)$$

式中: h 为梁高。式(9)表明梁的曲率模态直接和应变模态相关联。

显然,在位移模态测量的基础上,由差分计算可得到曲率模态,继而评估梁的截面抗弯刚度的变化,即可确定损伤。

3 损伤定位过程

- 损伤定位的过程可分为 6 步。
- (1)根据设计资料建立梁的有限元模型,称为原模型或未损模型。
- (2)通过在现场布置拾振设备,采集试验数据,利用模态分析技术,获得实际结构的自振特性。
- (3)将原模型进行分段,假设各段发生损坏的情况,计算出它们的自振特性。
- (4)比较各段损伤的自振特性与实际结构的自振特性,找出最接近病态的假设情况,则损伤位置为这些比较接近情况的综合。比较自振特性时采用上面提出的曲率模态,对于第 j 阶模态,第 i 段曲率模态的偏离指标为

$$k_{ij} = \frac{\int_a^b [\Phi_j'(x)]^2 dx / \int_0^l [\Phi_j'(x)]^2 dx}{\int_a^b [\Phi_j''(x)]^2 dx / \int_0^l [\Phi_j''(x)]^2 dx}$$

(12)

式中: Φ_j' 和 Φ_j'' 分别为假设损伤结构的曲率与实际

结构的曲率。 Φ_j 为第 j 阶模态的 x 点曲率,可按式(13)近似计算

$$\Phi_j = \frac{y_{m+1} - 2y_m + y_{m-1}}{2\Delta^2}$$

(13)

(5)式(12)中平方是为了消除掉正负号的影响。为包含更多的信息,应多取几阶振型的 Φ ,求平均值,一般取 6 阶左右,则

$$k_i = (\sum_{j=1}^n k_{ij}) / n$$

(14)

式中: n 为所取的振型阶数; i 为所分段落号; j 为振型的阶。

(6)计算损伤因子

$$\alpha_i = \sqrt{(k_i - 1)^2}$$

(15)

找出损伤因子 α_i 最接近 0 的梁段,则损伤位置与该梁段一致。

4 算 例

对一跨度为 8 m 的钢筋混凝土简支梁,采用 ANSYS 程序建立两个相同的模型,将其分为 8 个相等段,其中一个模型第 2、4、7 段的部分单元用刚度折减模拟损伤,刚度为原来的 50%,另一个模型分别假设各段损伤,取前 5 阶振型,计算结果见表 1。

表 1 钢筋混凝土梁各段损伤因子

Tab. 1 Damage Factor of Every Segment of Reinforced Concrete Beam

损伤因子	假设损伤							
	1 段	2 段	3 段	4 段	5 段	6 段	7 段	8 段
1 段 α_1	2.343 701	0.168 562	0.153 198	0.057 576	0.009 245	0.038 519	0.028 913	0.050 849
2 段 α_2	0.124 562	0.633 028	0.206 249	0.331 636	0.303 791	0.322 608	0.317 286	0.312 848
3 段 α_3	0.010 949	0.181 892	1.791 820	0.209 835	0.035 909	0.013 960	0.000 205	0.004 901
4 段 α_4	0.367 048	0.371 945	0.252 581	0.541 348	0.206 716	0.304 879	0.333 542	0.367 225
5 段 α_5	0.177 064	0.199 755	0.204 695	0.357 955	20.306 700	0.374 204	0.132 737	0.214 698
6 段 α_6	0.041 380	0.036 882	0.165 170	0.050 727	0.143 977	1.388 350	0.117 728	0.073 558
7 段 α_7	0.386 276	0.382 856	0.418 895	0.389 451	0.376 565	0.256 920	0.598 586	0.239 979
8 段 α_8	0.301 356	0.244 851	0.242 798	0.250 751	0.257 626	0.211 442	0.645 248	4.405 192

从表 1 中对角线上的元素可以看出,最接近 0 的梁段在第 2、4、7 段,其他各段对角线上的元素都大于 1,即损伤在第 2、4、7 段与假设相符,表明损伤识别成功。

5 结 语

笔者根据曲率与应变、振型的关系,给出了曲率模态识别结构多点损伤位置的方法。研究结果表明:与应变和振型相比,曲率模态对刚度的改变比较敏感,而损伤又主要反映在刚度的改变上,所以采用

曲率模态识别结构的损伤位置比较理想。针对工程中常用的钢筋混凝土梁,采用数值计算的方法研究曲率模态应用于结构损伤检测的规律和特点。首先用有限元法计算结构的位移模态,然后用差分法计算结构的曲率模态,进而计算出曲率模态的偏离指标和结构的损伤因子。根据损伤因子的大小判断结构的损伤与否,本文中采用有限元方法建立了一钢筋混凝土简支梁模型,通过模态分析得到了结构的振型和曲率模态;同时假设数值模型的多个位置发生损伤,损伤用刚度的折减来表示。通过比较损伤

前后的曲率模态,得到结构的损伤位置。分析结果表明,采用曲率模态识别结构的多处损伤位置,效果理想。

参考文献:

References:

- [1] 王柏生,何宗成,赵琛. 混凝土大坝结构损伤检测振动法的可行性[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(2):51-56.
WANG Bai-sheng, HE Zong-cheng, ZHAO Chen. Feasibility About Vibration-Based Method for Structural Damage Detection of Concrete Dams[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(2): 51-56.
- [2] 张杨,李国强. 通用频率指纹库在固接梁损伤定位中的应用[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(4):40-44.
ZHANG Yang, LI Guo-qiang. Application of Universal Bank of Natural Frequency Indexes in Damage Location of Beams with Fixed Ends[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4): 40-44.
- [3] 吴建营,李杰. 混凝土弹塑性损伤本构关系统一模型[J]. 建筑科学与工程学报,2005,22(4):15-21.
WU Jian-ying, LI Jie. Unified Elasto-plastic Damage Constitutive Relations Model for Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4): 15-21.
- [4] 谢峻,韩大建. 一种改进的基于频率测量的结构损伤识别方法[J]. 工程力学,2004,21(1):21-25.
XIE Jun, HAN Da-jian. An Improved Method for Structure Damage Detection Based on Frequency Measurement[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(1): 21-25.
- [5] PALACZ M, KRAWCZUK M. Vibration Parameters for Damage Detection in Structures[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 249(5): 999-1 010.
- [6] 宗周红,任伟新,阮毅. 土木工程结构损伤诊断研究进展[J]. 土木工程学报,2003,36(5):105-110.
ZONG Zhou-hong, REN Wei-xin, RUAN Yi. Recent Advances in Research on Damage Diagnosis for Civil Engineering Structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(5): 105-110.
- [7] 杨智春,于哲峰. 结构健康监测中的损伤检测技术研究进展[J]. 力学进展,2004,34(2):215-223.
YANG Zhi-chun, YU Zhe-feng. Progress of Damage Detection for Structural Health Monitoring[J]. Advances in Mechanics, 2004, 34(2): 215-223.
- [8] 常军,白羽. 钢筋混凝土梁的损伤识别方法研究[J]. 昆明理工大学学报:理工版,2003,28(1):105-107.
CHANG Jun, BAI Yu. A New Approach to Damage Detection of Reinforced Concrete Beam[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology: Science and Technology, 2003, 28(1): 105-107.
- [9] 常军. 曲率模态识别结构损伤位置方法研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2002.
CHANG Jun. Methods and Research of Structural Damage Location by Curvature Mode[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2002.
- [10] 常军. 曲率模态识别桁架结构的损伤位置方法研究[J]. 昆明理工大学学报:理工版,2005,30(6):85-87.
CHANG Jun. Methods and Research of Damage Location of Truss Beam by Curvature Model[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology: Science and Technology, 2005, 30(6): 85-87.
- [11] PANDEY M B, SAMMAN M. Damage Detection from Changes in Curvature Mode Shapes[J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 145(2): 321-332.
- [12] WAHAB M A, ROECK G D. Damage Detection in Bridges Using Modal Curvatures: Application to a Real Damage Scenario[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 226(2): 217-235.
- [13] 邓焱,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.
DENG Yan, YAN Pu-qiang. New Approach for Strain Modal Measurement and Damage Detection of Bridges[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2000, 40(11): 123-127.
- [14] LU Q, REN G, ZHAO Y. Multiple Damage Location with Flexibility Curvature and Relative Frequency Change for Beam Structures[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 253(2): 1 101-1 114.
- [15] 赵媛,陆秋海. 简支桥梁多位置损伤的检测方法[J]. 清华大学学报:自然科学版,2002,42(4):434-438.
ZHAO Yuan, LU Qiu-hai. Multiple Damage Detection of Simply Supported Beam Bridges[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2002, 42(4): 434-438.
- [16] CARDEN E P, FANNING P. Vibration Based Condition Monitoring: a Review[J]. Structural Health Monitoring, 2004, 3(4): 355-377.