

1-8-2019

## Finite Element Numerical Simulation of Pre-damaged Reinforced Concrete Beam

Jiaquan Wu

*Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, china;*

Hongyan Li

*Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, china;*

Ye Fei

*Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, china;*

Xinyu Zhang

*Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, china;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Finite Element Numerical Simulation of Pre-damaged Reinforced Concrete Beam

## Abstract

**Abstract:** Based on the theory of model analysis, *the general variation of model parameters, such as the structure natural frequency, displacement mode, curvature mode and strain mode etc.* model of reinforced concrete beams with different damage locations and different damage states are reversely studied by finite element numerical simulation with the pre-damaged reinforced concrete beam structure as the research object, model and the aptability, sensitivity in the reinforced concrete structure damage identification are discussed. The results show that the frequency and displacement mode can not effectively reflect the existence of structural damage, but curvature mode and strain mode can reflect the structural damage condition. The structural damage identification based on curvature mode and strain mode method can be used for damage identification of large complex reinforced concrete bridge structure.

## Keywords

model analysis, pre-damaged reinforced concrete beam, numerical simulation, natural frequency, curvature mode, strain mode

## Authors

Jiaquan Wu, Hongyan Li, Ye Fei, Xinyu Zhang, and Kun Ma

## Recommended Citation

Wu Jiaquan, Li Hongyan, Ye Fei, Zhang Xinyu, Ma Kun. Finite Element Numerical Simulation of Pre-damaged Reinforced Concrete Beam[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(9): 3437-3444.

# 预损伤钢筋混凝土梁有限元数值模拟研究

吴加权, 李红艳, 叶飞, 张馨予, 马琨

(昆明理工大学理学院, 云南 昆明 650093)

**摘要:** 基于模态分析理论, 以预损伤钢筋混凝土梁结构为研究对象, 通过有限元数值模拟反向研究了钢筋混凝土梁不同损伤位置、不同损伤状况下结构频率、位移模态、曲率模态、应变模态等模态参数的一般变化规律和各模态参量在钢筋混凝土结构损伤识别中的适应性和敏感性。研究表明, 结构频率和位移模态难以有效反映出结构损伤状况的存在, 而曲率模态和应变模态则均能较好地反映出结构的损伤状态, 基于曲率模态和应变模态的结构损伤识别方法可用于大型复杂钢筋混凝土桥梁结构的损伤识别。

**关键词:** 模态分析; 预损伤钢筋混凝土梁; 数值模拟; 固有频率; 曲率模态; 应变模态

中图分类号: TP23

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 09-3437-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201809026

## Finite Element Numerical Simulation of Pre-damaged Reinforced Concrete Beam

Wu Jiaquan, Li Hongyan, Ye Fei, Zhang Xinyu, Ma Kun

(Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, china)

**Abstract:** Based on the theory of model analysis, the general variation of model parameters, such as the structure natural frequency, displacement mode, curvature mode and strain mode etc. model of reinforced concrete beams with different damage locations and different damage states are reversely studied by finite element numerical simulation with the pre-damaged reinforced concrete beam structure as the research object, model and the aptability, sensitivity in the reinforced concrete structure damage identification are discussed. The results show that the frequency and displacement mode can not effectively reflect the existence of structural damage, but curvature mode and strain mode can reflect the structural damage condition. The structural damage identification based on curvature mode and strain mode method can be used for damage identification of large complex reinforced concrete bridge structure.

**Keywords:** model analysis; pre-damaged reinforced concrete beam; numerical simulation; natural frequency; curvature mode; strain mode

## 引言

近年来, 桥梁结构的损伤识别已成为国内外学术界和工程界普遍关心和需要解决的一个重要问

题, 也是一个研究热点问题<sup>[1-3]</sup>。目前得到普遍认同的一种识别方法是结合振动理论、系统识别、振动测试技术, 信号采集与分析等多学科交叉的模态分析技术<sup>[4-5]</sup>。该技术因其无损性和对结构变化的敏感性而在大型建筑工程结构状态检测中发挥着越来越重要的作用。因为结构的质量、刚度、阻尼、频率, 振型等动力特性参数反映了结构的状态信息, 若是结构有局部损伤产生, 结构特性参数将会



收稿日期: 2016-10-21 修回日期: 2017-01-05;  
基金项目: 国家自然科学基金(5127823), 云南省高校结构健康诊断重点实验室项目(KKKP201207003), 云南省教育厅重大项目(ZD2015003);  
作者简介: 吴加权(1976-), 男, 云南昆明, 硕士, 高工, 研究方向为结构损伤识别。

<http://www.china-simulation.com>

• 3437 •

发生相应的改变,从而通过监测结构的特性参数即可获得其状态信息。国内外众多科研工作者在结构损伤识别方面已经开展了大量的理论探索与试验研究工作,并取得了不少研究成果<sup>[6-9]</sup>。这类研究尽管对于单一均质材料的简支梁、板,悬臂梁等简单结构已经建立了一些识别理论和方法,能够较为准确的识别出损伤位置及损伤程度,但对于大型复杂钢筋混凝土桥梁结构的实际损伤识别研究工作还相对较少,基于现实测量数据进行损伤识别的高灵敏性和抗噪性的识别技术距离广泛实际应用于桥梁工程结构损伤识别还有很大差距<sup>[10-11]</sup>。

大型复杂钢筋混凝土桥梁工程结构在进行安全测试之前,事先利用有限元数值计算来模拟实际试验过程,从而指导试验方案设计和改进试验研究方法是完全有必要的。特别对于一些无原始数据或原始数据不完备的桥梁工程结构健康检测而言,采用有限元数值分析来最大可能的还原振动结构系统的原始状态信息,并将其与实测信息进行对比分析来识别结构的损伤状况是一种最为有效和可行的途径。本文利用 ANSYS有限元分析软件建立了含不同裂纹损伤状况下的预钢筋混凝土梁有限元模型,基于模态分析技术中的曲率模态和应变模态不但能够反映结构局部特征的变化情况,而且对局部结构变化的敏感性远远高于位移模态振型,可以方便实现结构的损伤定位的优越性。根据模态分析相关原理,反向开展结构频率、位移模态、曲率模态,应变模态等模态参数随结构不同损伤状况的一般变化规律及曲率模态、应变模态在复杂钢筋混凝土桥梁结构损伤识别中的适应性、可行性与可靠性数值模拟研究,研究结果最终为钢筋混凝土桥梁结构工程的损伤识别提供必要的理论依据和试验指导。

## 1 应变模态和曲率模态基础理论

应变模态是位移模态的一阶导数,对应于每一阶位移模态,则必有其对应的应变模态分布。曲率模态则是结构的中面变形模态,与应变模态是同一

能量平衡状态的两种表现形式,具有正交性和叠加性。依据弹性理论,梁变形的曲率模态为位移模态的二阶导数。对应于每一阶位移模态,同样有其对应的曲率模态分布状态存在。

由结构振动力学可知,梁横向弯曲振动的无阻尼自由振动微分方程为:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ EI(x) \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \right] + M(x) \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

当梁在载荷作用下发生弯曲时,梁上任意截面  $x$  处,结构弯曲振动曲线的曲率函数为

$$q(x) = \frac{1}{\rho(x)} = \frac{M(x)}{EI(x)} \quad (2)$$

式中:  $\rho(x)$  为梁结构中轴线发生形变后的曲率半径;  $M(x)$  为梁的承受弯矩;  $EI(x)$  为梁的抗弯刚度。由直梁弯曲的变形近似方程可得

$$\frac{1}{\rho(x)} = \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI(x)} \quad (3)$$

用差分方程来代替式(3),梁上任意截面等间距的3个连续测点为

$$\frac{1}{\rho} = \frac{y_{n+1} - 2y_n + y_{n-1}}{\Delta^2} = \frac{M(x)}{EI(x)} \quad (4)$$

由式(4)可以看出,在结构有限元离散模型的振动模态分析中,若能够计算出等间距有限元离散单元节点处的位移模态,则结构的曲率模态可由中央差分方程求出。另据梁的弯曲与应变之间的关系有:

$$\varepsilon = -\frac{h}{\rho} = -h \cdot \frac{y_{n+1} - 2y_n + y_{n-1}}{\Delta^2} \quad (5)$$

式中:  $h$  为梁上测点距中性层的距离。由式(4)和式(5)可以看出,应变模态与曲率模态之间仅相差了一系数项,通过有限元离散模型得到曲率模态也就得到了应变模态。

## 2 预损伤钢筋混凝土梁有限元模型

预损伤钢筋混凝土模型梁长为 6 m, 宽和高分别为 0.25 m 和 0.5 m, 混凝土强度等级取 C40, 密度取  $2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。混凝土保护层厚度 0.4 m, 2 根受压纵筋  $\Phi 20$ 、3 根受拉纵筋  $\Phi 20$ , 箍筋  $\Phi 8$ ,

箍筋配置间距 0.2 m, 钢筋弹性模量取值 200 GPa, 密度取为  $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 材料泊松比取为 0.3。模型梁的建立采用分离式模型, 用八节点六面体的 solid 185 单元划分混凝土, 两节点 pipe16 单元划分钢筋, 最终模型总节点数 41 496 个, 混凝土单元 5 120 个, 钢筋单元 38 540 个。梁的损伤是在梁 1/4 跨和 1/2 跨底部位置沿梁高度预制宽度为 1 mm 的横向裂纹, 裂纹深度分别为梁高的 5%、10%、

15%、20%, 即: 0.025 m、0.050 m、0.075 m 和 0.10 m 4 种损伤工况。有限元模型梁和梁损伤截面如图 1 所示。

钢筋混凝土模型梁在进行模态提取时选用了分块兰索斯法(BlockLanczos)进行计算。图 2 为完整钢筋混凝土梁有限元模型的前四阶位移模态三维振型图。

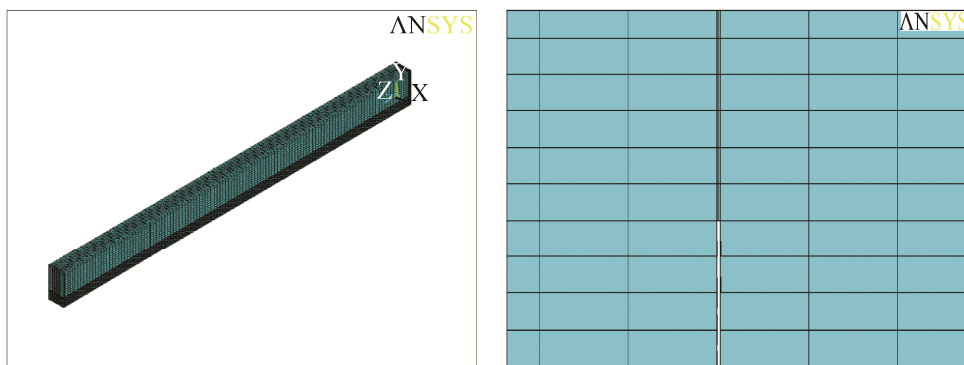


图 1 钢筋混凝土梁有限元模型和损伤截面图

Fig. 1 Finite element model and damage section of reinforced concrete beam

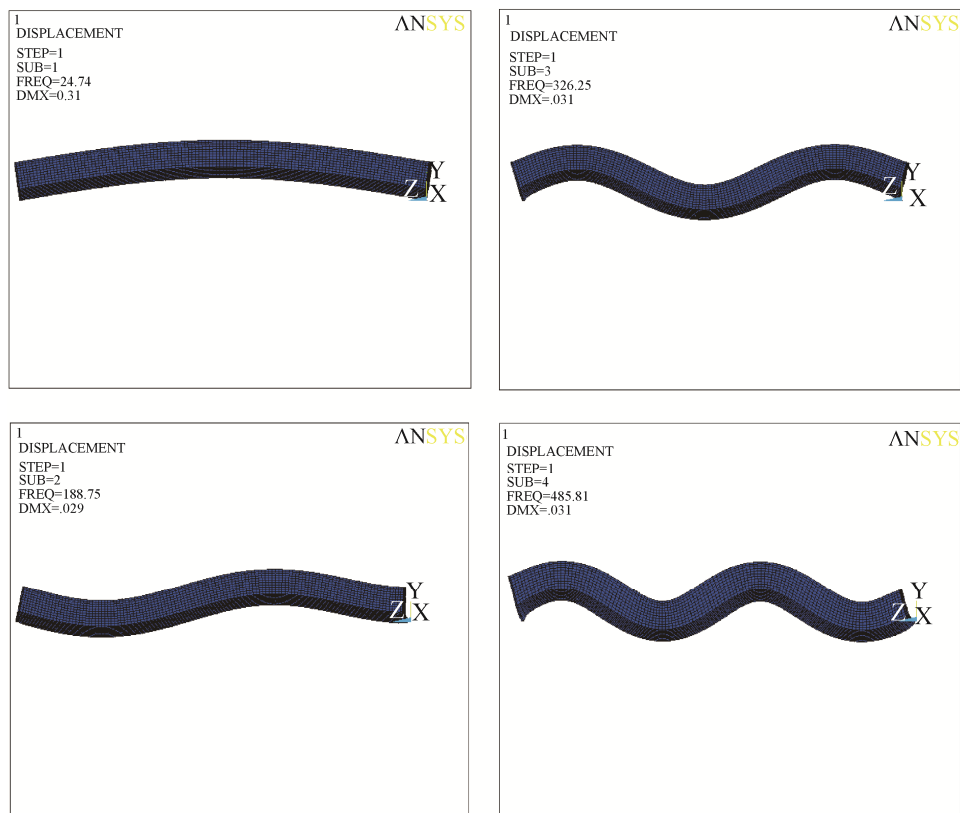


图 2 钢筋混凝土梁模型前四阶位移模态振型

Fig. 2 First four order displacement model shape of reinforced concrete beam

## 2.1 预损伤钢筋混凝土梁固有频率分析

采用与完好钢筋混凝土模型梁相同的模态提取方法,可以得到预损伤钢筋混凝土梁有限元模型不同损伤状况下的前四阶固有频率和相对于完好梁的频率变化量,见表1。从表1可以看出,相对于完好梁,两个不同损伤位置的固有频率均随损伤程度的增大而逐渐变小;除1/2跨损伤位置一阶固有频率随模型梁结构损伤程度的增加变化较大外,其余各损伤状况下模态频率相对于完好梁的频率变化整体较小,频率最大变化量为1.4%,最小为0.015%。实验研究结果表明,钢筋混凝土梁局部结构损伤对固有频率的影响较小,固有频率的变化量在工程实际检测过程中可能会被环境噪声和实验

误差所完全掩盖,结构损伤识别过程中仅通过频率变化难以有效判断出结构的损伤状况。

## 2.2 位移模态振型

在图2位移模态三维振型中,处于同一高度、同一水平位置上的各节点位移模态形变量是相同的。由于模型梁预设最小损伤量为梁高的5%,即0.025 m,因此,文中位移模态提取了模型层面第二层(图3),即:距离模型梁底部0.0125 m位置平面中间一条线上的123个节点位移值,根据节点与模型梁对应物理坐标位置关系将位移模态振型转换至二维平面下进行讨论,模型中每两个节点之间的间距为0.05 m。

表1 不同损伤状况下预损伤钢筋混凝土梁有限元模型前四阶固有频率和频率变化量

Tab. 1 First four order natural frequency of the pre-damaged reinforced concrete beam and the variation of the frequency with different damage degrees

位置	阶次	损伤量								
		0		5%		10%		15%		20%
		$f/Hz$	$f/Hz$	$\Delta f/\%$	$f/Hz$	$\Delta f/\%$	$f/Hz$	$\Delta f/\%$	$f/Hz$	$\Delta f/\%$
1/4 跨	1	24.74	24.69	0.20	24.64	0.40	24.59	0.60	24.55	0.77
	2	188.75	188.62	0.069	188.39	0.19	188.21	0.28	188.06	0.36
	3	326.25	326.20	0.015	326.14	0.033	326.07	0.055	325.98	0.083
	4	485.81	485.20	0.12	484.53	0.26	483.94	0.38	483.33	0.51
1/2 跨	1	24.74	24.68	0.24	24.47	1.1	24.49	1.0	24.40	1.4
	2	188.75	188.63	0.063	188.42	0.17	188.28	0.24	188.13	0.32
	3	326.25	326.19	0.018	326.09	0.049	325.98	0.082	325.84	0.13
	4	485.81	484.87	0.19	483.18	0.54	481.78	0.83	480.41	1.1

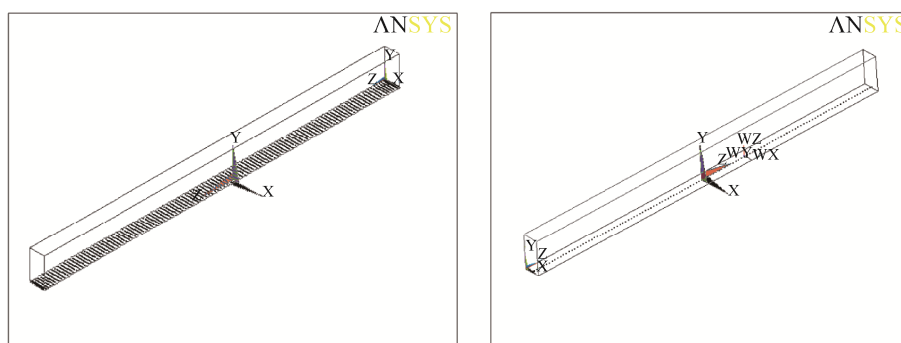


图3 钢筋混凝土梁有限元模型提取层面和提取线

Fig. 3 Reinforced concrete beam extraction layer and extraction line

图 4~5 分别为 1/4 跨和 1/2 跨损伤位置对应不同损伤程度下钢筋混凝土梁有限元模型的位移模态振型。从图 4~5 不同损伤状况的位移模态振型图可以看出, 位移模态振型平滑度和重合度较好; 前四阶位移模态振型中, 除 1/4 跨损伤位置的二阶和三阶, 1/2 跨损伤位置的一阶和三阶在损伤程度达到

20%的情况下有细微突变, 反映出了结构损伤的存在, 其余模态振型均无明显突变现象产生。数值仿真计算结果证实了位移模态振型对结构损伤的不敏感性, 单纯依靠位移模态也无法较好地实现钢筋混凝土梁结构损伤状况的判断。

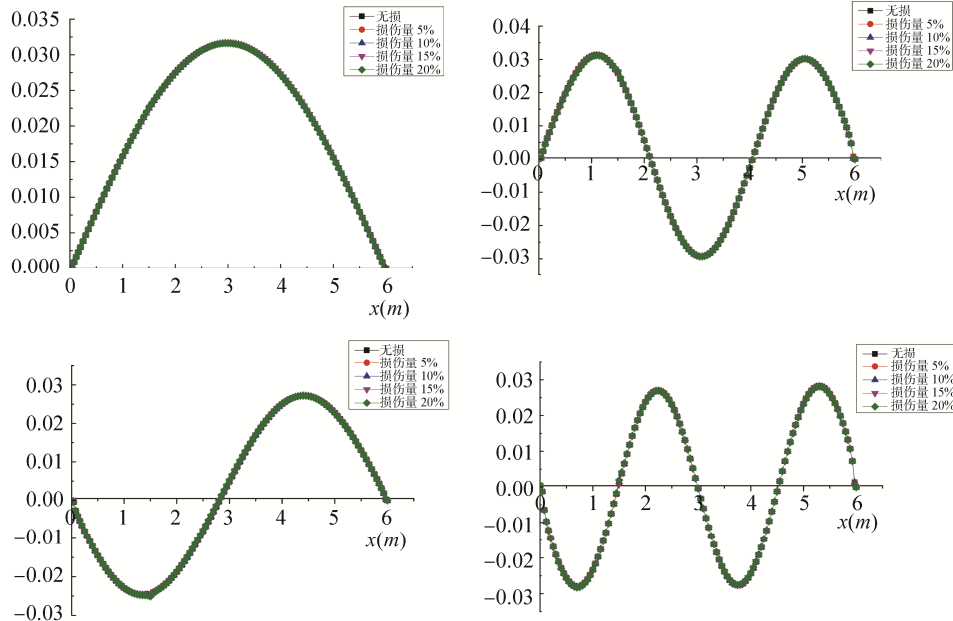


图 4 1/4 跨损伤位置不同损伤程度位移模态振型

Fig. 4 Displacement model shapes of 1/4 span with different damage degrees

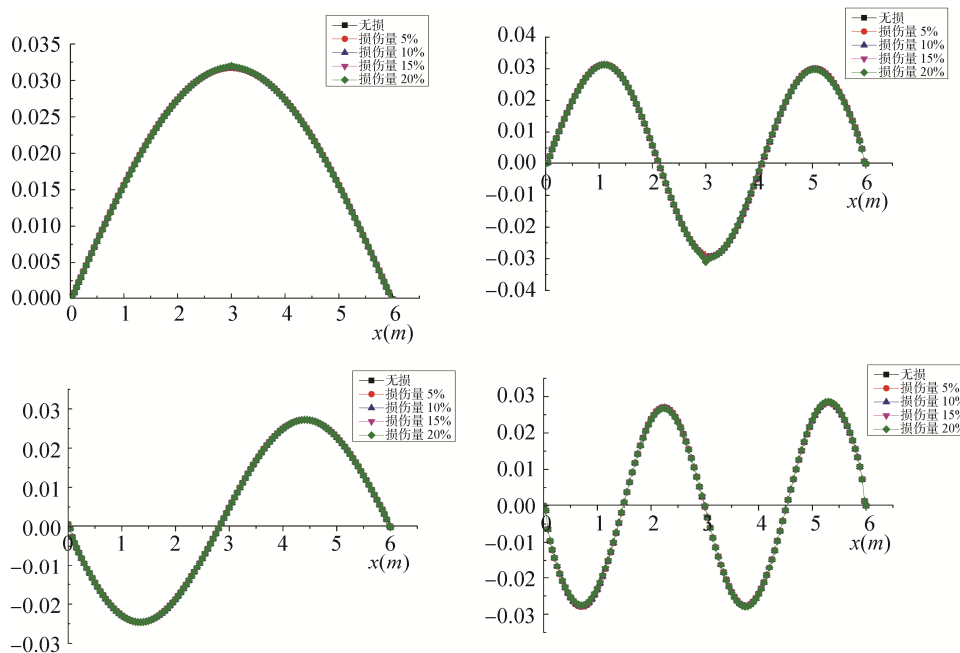


图 5 1/2 跨损伤位置不同损伤程度位移模态振型

Fig. 5 Displacement model shapes of 1/2 span with different damage degrees

### 2.3 曲率模态振型和应变模态振型

将上述数有限元数值计算得到的位移模态振型数据按式(4)和式(5)进行计算,便可得到不同损伤位置、不同损伤程度下预损伤钢筋混凝土梁有限元数值模拟的曲率模态振型和应变模态振型。由于1/4跨的第四阶模态振型和1/2跨第二阶、第四阶模态振型损伤位置恰好处于振型节点处,结构损伤对其几乎无影响,振型无明显突变。因此,文中仅讨论结构损伤对处于非振型节点位置的曲率模态和应变模态的影响。图6~9给出了1/4跨损伤位置的一阶、二阶、三阶和1/2跨损伤位置的一阶、三阶曲率模态振型和应变模态振型。

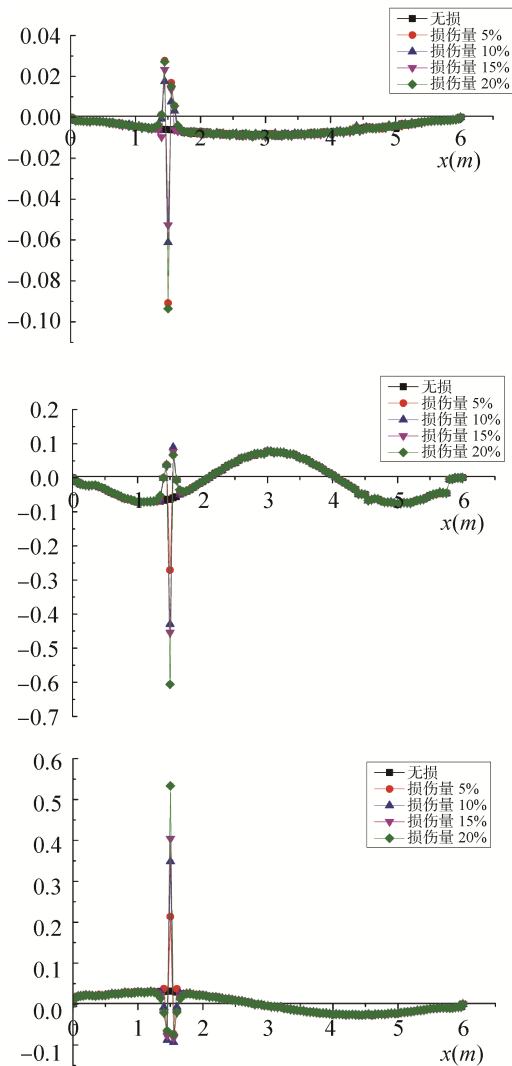


图6 1/4跨损伤位置不同损伤程度前三阶曲率模态振型  
Fig. 6 First three order curvature mode shapes of 1/4 span damage location

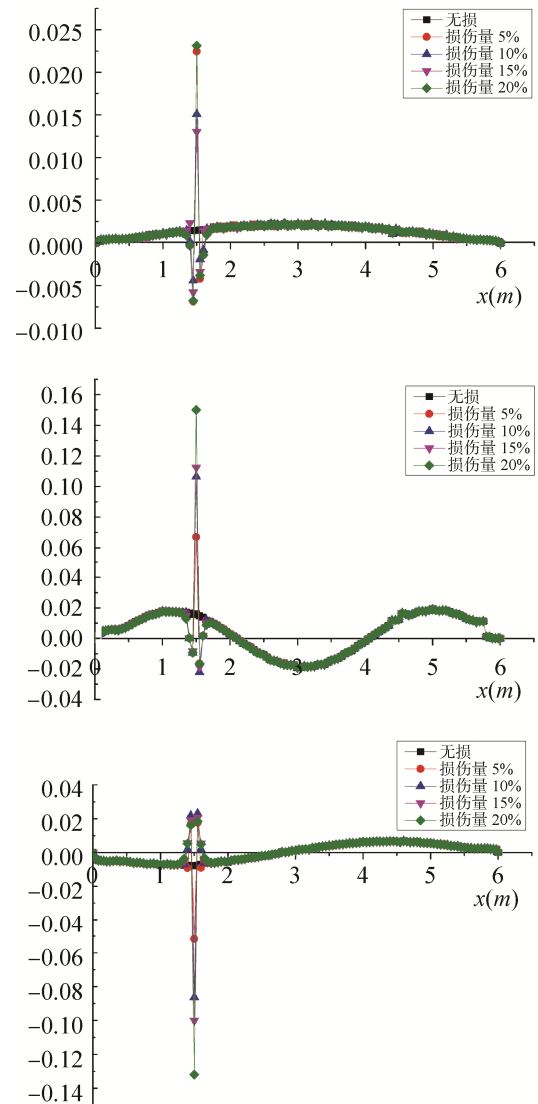


图7 1/4跨损伤位置不同损伤程度前三阶应变模态振型  
Fig. 7 First three order strain mode shapes of 1/4 span damage location

从上述有限元数值模拟计算得到的曲率模态和应变模态振型图可以看出:(1)不同损伤位置的曲率模态和应变模态在损伤位置两侧都发生了突变;损伤位置上的模态振型突变量最大,突变量随结构损伤程度的增大而增大;曲率模态和应变模态都较好的反映出了结构的损伤位置和损伤程度。(2)1/4跨损伤位置的一阶、二阶和三阶的曲率模态和应变模态振型都发生了突变,准确的反映出了结构的损伤位置。其中二阶和三阶的突变幅度较大,一阶的突变幅度较小;1/2跨损伤位置仅一阶和三



阶有突变, 且曲率模态和应变模态的突变也同样准确反映出了结构的损伤位置。第三阶曲率模态和应变模态突变幅度大于一阶的突变幅值。由此可知, 在进行桥梁工程结构振动系统损伤识别时, 除了考虑测点的优化布置外, 模态阶次振型的选取对于判定结构损伤的存在也起着至关重要的做用。(3)根据式(5), 易于理解的是上述图中曲率模态和应变模态的振型恰好相反; 本例中两个损伤位置的曲率模态振型幅值远大于应变模态振型幅值, 这主要取决于测量点距中性层间的距离  $h(x)$ , 若  $h(x) > 1$  则应变模态振型幅值大于曲率模态振型幅值, 损伤位置的应变模态突变程度也远大于曲率模态; 反之,

若  $h(x) < 1$ , 则曲率模态振型幅值及损伤带来的曲率振型突变量也必将大于应变模态振型突变量。因此, 在均能反映结构损伤存在的对等条件下, 要得到较大的峰值突变, 应变模态和曲率模态的优选条件主要取决于测量点距中性层距离的大小。(4)曲率模态和应变模态振型的突变方向始终与所处阶次振型峰值方向相同, 这一点与现有文献研究结果存在明显的差异。其原因在于, 结构的局部损伤会导致结构局部刚度降的低, 从而导致损伤部位的曲率增大。同样, 结构损伤位置的应变会因应力集中而明显增加。因此, 在突变位置, 振型突变方向应当与振型峰值变化方向相一致。

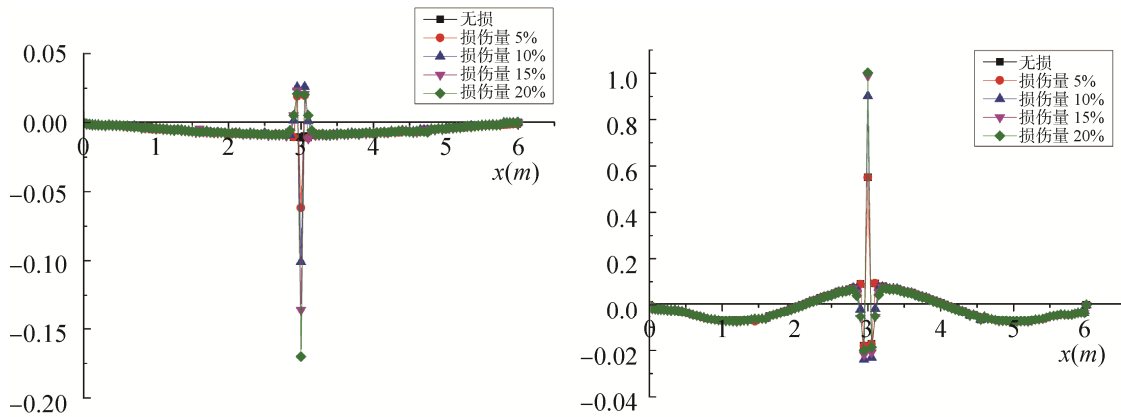


图 8 1/2 跨损伤位置不同损伤程度一、三阶曲率模态振型  
Fig. 8 First and third order curvature mode shapes of 1/2 span damage location

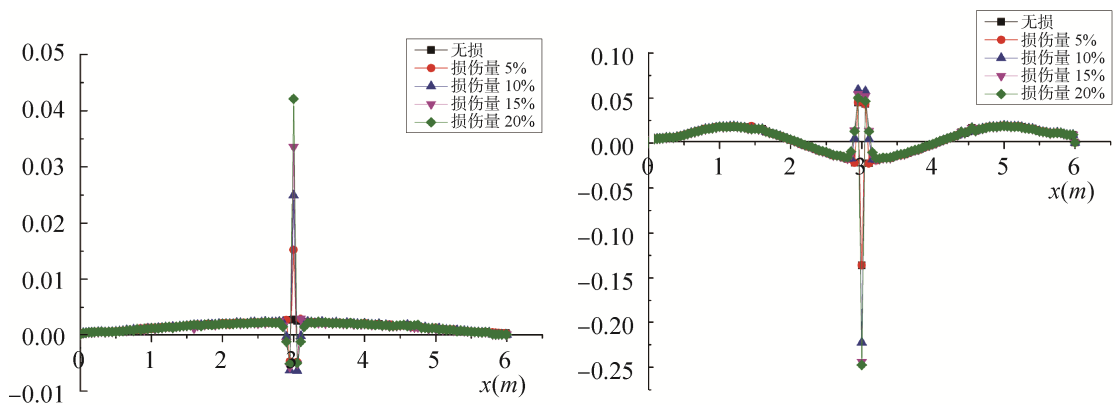


图 9 1/2 跨损伤位置不同损伤程度一、三阶应变模态振型  
Fig. 9 First and third order strain mode shapes of 1/2 span damage location

### 3 结论

通过不同损伤状况下预损伤钢筋混凝土梁有限元数值模拟计算结果表明:

(1)预损伤钢筋混凝土有限元模型梁的固有频率随结构损伤程度增加而呈现出减小的规律性变化,但变化量较小,在工程实际检测过程中不易测出;当损伤量较大时,模型梁不同损伤位置的部分位移模态振型发生了细微的突变,这一突变在实际桥梁结构损伤检测中同样难以被识别。由此也进一步证明了,频率和位移振型对钢筋混凝土梁结构损伤的不敏感性,即通过频率和位移模态振型无法有效地对结构损伤位置和损伤程度进行准确判断。

(2)曲率模态振型和应变模态振型在结构损伤部位周围位移处都产生了较为剧烈的突变,准确的反映出了预设损伤位置的存在,且振型突变随着结构损伤程度的增大而增大,振型突变方向与所处阶次振型峰值方向相一致。相同损伤情况下,两个不同损伤位置的第三阶曲率模态和应变模态振型突变变量较大。在工程结构损伤识别实际应用过程中,为了得到较好的识别效果,针对被测结构的不同损伤部位,需要合理选取恰当的模态振型阶次来考察结构的损伤状况。特别要避免选取处于振型节点位置的模态阶次来考察结构损伤。

(3)曲率模态振型和应变模态振型相位相反。在均能反映结构损伤存在的对等条件下,要得到较大的振型突变,应变模态和曲率模态的优选条件取决于测量点距中性层距离的大小。

#### 参考文献:

- [1] 秦权. 桥梁结构的健康监测[J]. 中国公路学报, 2000, 13(2): 37-42.  
Qin Quan. Health monitoring of long-span bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(2): 37-42.
- [2] 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, 2011, 13(2): 1-11.  
Zhu Hong-ping, Yu Jing, Zhang Jun-bing. A Summary Review and Advantages of Vibration-based Damage Identification Methods in Structural Health Monitoring[J].

Engineering Mechanics, 2011, 13(2): 1-11.

- [3] 王柏生, 倪一清, 高赞明. 青马大桥桥板结构损伤位置识别的数值模拟[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 67-72.  
Wang Baisheng, Nie Yiqing, Gao Zanming. Numerical Study of Damage Localization for TSINGMA Bridge Deck[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(3): 67-72.
- [4] 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.  
Li Debao, Lu Qiu hai. Experimental Modal Analysis and Application [M]. Beijing: Sciences Press, 2001.
- [5] 顾培英, 邓昌, 吴福生. 结构模态分析及其损伤识别[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008.  
Gu Peiyong, Deng Chang, Wu Fusheng. Structural Modal Analysis and Damage Identification[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2008.
- [6] Wei Fan, Pizhong Qiao. Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study[J]. Structural Health Monitoring (S1475-9217), 2011, 10(1): 83-111.
- [7] Patil D P, Maiti S K. Detection of multiple cracks using frequency measurements[J]. Engineering Fracture Mechanics (S0013-7944), 2003, 70(12): 1553-1572.
- [8] A N Robertson, C R Farrar, H Sohn. Singularity detection for structural health monitoring using holder exponents[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, (S0888-3270), 2003, 17(6): 1163-1184.
- [9] 孙杰. 基于多模态的神经网络的结构损伤识别方法的研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2012, 36(6): 1240-1242.  
Sun Jie. Research on Damage Identification Based on Multi-modal Using Neural Networks[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2012, 36(6): 1240-1242.
- [10] 郭健, 孙炳楠. 桥梁健康监测中的关键性问题和损伤识别方法[J]. 公路, 2006, 1(4): 109-115.  
Guo Jian, Sun Bingnan. Key Problems and Methods of Damage Identification in Bridge Health Monitoring[J]. 2006, 1(4): 109-115.
- [11] 吴向男, 徐岳, 梁鹏, 等. 桥梁结构损伤识别研究现状与展望[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2013, 33(6): 49-55.  
Wu Xiangnan, Xu Yue, Lian Peng, et al. Research status and prospect of bridge structure damage identification[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2013, 33(6): 49-55.