

结构质量分布及损伤与动力响应关系研究*

王山山 邱玲 徐炜

(河海大学工程力学系,南京 210098)

摘要 结构动力系统中质量、阻尼、刚度等物理参数及其分布决定着结构的动力特性. 当这些物理参数及其分布发生改变时,结构的动力特性会随着改变,从而即使在相同荷载作用下,结构的动力响应也会发生改变. 为保障结构的安全运营需深入了解结构在不同质量分布及损伤情况下的动力响应. 用试验的方法研究了结构的不同质量分布及损伤与结构动力响应的关系. 不同质量分布用立柱上方不同的质量块模拟,结构损伤用立柱中部的裂缝模拟. 测试了正弦扫频激励结构发生一阶共振时动力应变的最大值. 试验结果表明结构动力应变响应最大值随着结构质量分布的不均匀程度的增大而增大. 在不同的质量分布状况下,当结构无损伤时,结构下部应变响应最大值总大于结构中部应变响应最大值. 当结构有损伤时,结构下部应变响应最大值总小于结构中部应变响应最大值.

关键词 结构, 质量分布, 损伤, 应变, 响应, 试验

引言

结构动力系统中质量、阻尼、刚度等物理参数及其分布决定着结构的动力特性. 当这些物理参数及其分布发生某些改变时,结构的动力特性会随着改变,从而即使在相同荷载作用下,结构的动力响应也会发生改变. 深入研究结构的动力特性和动力响应,对保证结构的安全运行以及结构的动力优化设计等方面有着重要意义. 虽然在结构损伤对结构动力响应研究方面已有很多成果^[1-3],但结构质量分布及损伤与结构动力响应之间的关系的研究还很少见. 本文将采用试验的方法对结构质量分布及损伤与结构动力响应之间的关系进行研究.

1 理论依据

多自由度系统结构动力系统的控制方程为^[4]

$$\begin{aligned} [M] \{\ddot{x}(t)\} + [C] \{\dot{x}(t)\} + \\ [K] \{x(t)\} = \{f(t)\} \end{aligned} \quad (1)$$

其中矩阵 $[M]$, $[C]$, $[K]$ 分别表示质量、阻尼和刚度分布 $\{x\}$, $\{\dot{x}\}$, $\{\ddot{x}\}$, 分别表示加速度向量、速度向量和位移向量, $\{f(t)\}$ 是外部作用力函数向量.

设阻尼 $[C]$ 为比例阻尼

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (2)$$

式中, α 和 β 为比例常数.

进行如下的变换:

$$\{x\} = \sum_{r=1}^N q_r \{\varphi_r\} \quad (3)$$

式中 $\{\varphi_r\}$ 为由 $[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\}$ 所确定的第 r 阶模态振型, q_r 为相应的模态坐标. 将(3)式代入(1)式得:

$$\begin{aligned} [M] \left(\sum_{r=1}^N \ddot{q}_r \{\varphi_r\} \right) + [C] \left(\sum_{r=1}^N \dot{q}_r \{\varphi_r\} \right) + \\ [K] \left(\sum_{r=1}^N q_r \{\varphi_r\} \right) = \{f(t)\} \end{aligned} \quad (4)$$

上式左乘以 $\{\varphi_r\}^T$,并考虑到

$$\begin{aligned} \{\varphi_r\}^T [C] \{\varphi_r\} = \alpha \{\varphi_s\}^T [M] \{\varphi_r\} + \\ \beta \{\varphi_s\}^T [K] \{\varphi_s\} = \begin{cases} 0, & r \neq s \\ \alpha m_s + \beta k_s = c_s, & r = s \end{cases} \end{aligned}$$

c_s 称为模态阻尼系数. 于是(4)式变成:

$$m_s \ddot{q}_s + c_s \dot{q}_s + k_s q_s = \{\varphi_s\}^T \{f(t)\} \quad (5)$$

令 $\{f(t)\} = \{F\} e^{j\omega t}$, 则 $q_s = Q_s e^{j\omega t}$, 代入上式得:

$$(-\omega^2 m_s + j\omega c_s + k_s) Q_s e^{j\omega t} = \{\varphi_s\}^T \{F\} e^{j\omega t} \quad (6)$$

由此得:

$$Q_s = \frac{\{\varphi_s\}^T \{F\}}{-\omega^2 m_s + j\omega c_s + k_s} \quad (7)$$

从上式可以看出 Q_s 相当于一个质量、刚度和阻尼分别为 m_s , k_s , c_s 的单自由度系统在模态力 $P_s = \{\varphi_s\}^T \{F\}$ 作用下的响应.

根据(3)式,可得位移响应为:

$$\{x\} = \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_N \end{Bmatrix} e^{j\omega t} = \sum_{r=1}^N q_r \{\varphi_r\} = \sum_{r=1}^N Q_r \{\varphi_r\} e^{j\omega t} \quad (8)$$

当系统中质量、阻尼、刚度等物理参数及其分布发生改变时,结构的动力特性会随着改变,从而即使在相同荷载作用下结构的动力响应也会发生改变。

对受弯为主的结构,设 z 是弯曲变形中面到某一点的距离,则该点的应变为^[5]:

$$\varepsilon = v'' z \quad (9)$$

此处 v'' 为弯曲振动的曲率响应.由于应变与位移响应的两次微分成比例关系,因此应变响应结构由于损伤、质量分布变化而引起的动力响应的变化更敏感。

2 试验方法

试验模型采用立柱上加不同尺寸质量块来模拟结构的不同质量分布情况.材料为Q235钢材.立柱截面为12mmx12mm的等截面直杆,立柱高为500mm.立柱上方焊接正立方体质量块,质量块的边长分别为0mm、20mm、40mm、60mm和80mm.图1为试验模型照片。

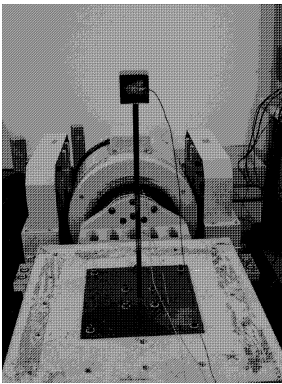


图1 试验模型照片

Fig. 1 Test specimen

由于应变响应结构由于损伤、质量分布变化而引起的动力响应的变化更敏感.试验中采用应变响应来表达结构的动力响应.应变响应由布置在立柱下部和中间的两个应变片测试.传感器布置示意图见图(2)。

结构的损伤用位于No.2传感器对面立柱中间

的裂缝模拟.裂缝宽1mm,深分别为3mm。

试验时激励设备采用DYS-300-2-60电动振动系统,采集与分析系统采用DH5920型多通道并行动态数据采集分析仪。

为便于比较,试验时对不同试验工况均采用相同的激励。

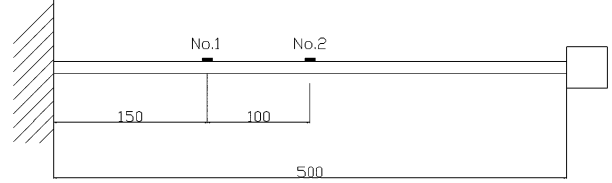


图2 传感器布置示意图

Fig. 2 Sketch of arrangement of strain sensors

3 试验结果及讨论

试验激励采用正弦扫频,激振频带宽保证结构发生第一阶共振,激励力大小在各种情况下均为5m/s².图3为典型的结构下部应变(No.1传感器采集)响应时程曲线.图4为典型的结构中应变(No.2传感器采集)响应时程曲线.动力响应的单位为应变($\mu\varepsilon$).

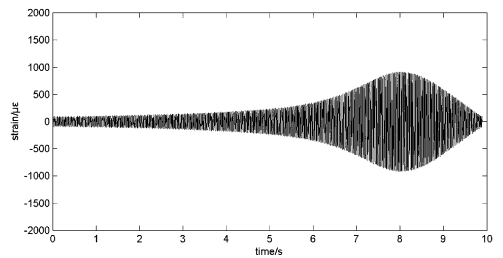


图3 典型结构下部应变响应时程曲线

Fig. 3 Typical strain time history at inferior part of column

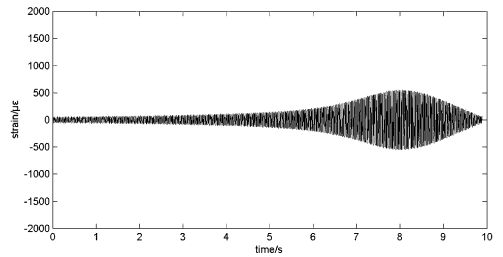


图4 典型结构中应变响应时程曲线

Fig. 4 Typical strain time history at middle part of column

根据结构在无损伤质量分布不同状况下的时程曲线,可得结构在无损伤质量分布不同状况下结构下部及中部动力应变响应的最大响应值,见表1.结构下部及中部动力应变响应的最大响应值比

较见图 5.

表 1 结构无损伤时下部及中部动力应变响应的最大响应值

mass block dimension (mm)	0	20	40	60	80
strain of inferior part($\mu\epsilon$)	915.2	1060.8	1212.5	2054.2	3186.3
strain of middle part($\mu\epsilon$)	411.7	548.4	959.6	1524.0	2150.2

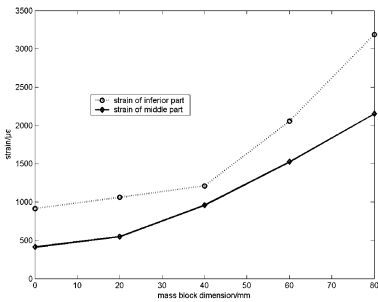


图 5 结构无损伤时下部及中部动力应变响应的最大响应值比较

Fig.5 Maximal dynamic strain response compare at inferior and middle part of intact structure

由表 1 及图 5 可知,在无损伤质量分布不同状况下,结构下部及中部动力应变响应最大值都随着质量块边长的增大而增大,结构下部应变响应最大值总大于结构中部分应变响应最大值.在本试验情况下,结构下部动力应变响应最大值最大增加了 3.48 倍,结构中部分动力应变响应最大值最大增加了 5.22 倍.

当在立柱的中部都设置宽 1mm,深 3mm 的裂缝时,可得结构在有损伤质量分布不同状况下结构下部及中部动力应变响应的最大响应值,见表 2.结构下部及中部动力应变响应的最大响应值比较见图 6.

表 2 结构有损伤时下部及中部动力应变响应的最大响应值

mass block dimension (mm)	0	20	40	60	80
strain of inferior part($\mu\epsilon$)	784.5	904.9	1317.8	1991.0	2936.3
strain of middle part($\mu\epsilon$)	929.6	931.3	1583.3	2261.4	3357.9

由表 2 及图 6 可知,在有损伤质量分布不同状况下,结构下部及中部动力应变响应最大值也都随着质量块边长的增大而增大,但结构下部应变响应最大值总小于结构中部分应变响应最大值.在本试验情况下,结构下部动力应变响应最大值最大增加了 3.74 倍,结构中部分动力应变响应最大值最大增加

了 3.61 倍.

比较图 5 与图 6 可知,结构下部动力应变响应最大值在有损伤时基本上比无损伤时小,而结构中部分动力应变响应最大值在有损伤时基本上比无损伤时大.由此可见动力应变响应最大值对结构损伤比对结构质量分布不均匀更敏感.

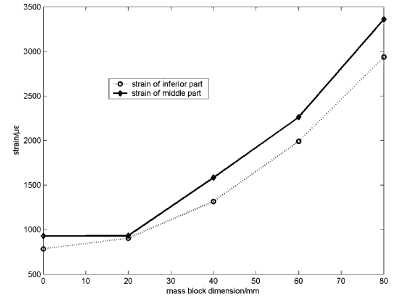


图 6 结构有损伤时下部及中部动力应变响应的最大响应值比较

Fig.6 Maximal dynamic strain response compare at inferior and middle part of damage structure

4 结论

结构动力系统中质量、阻尼、刚度等物理参数及其分布决定着结构的动力特性.当这些物理参数及其分布发生改变时,结构的动力特性会随着改变,从而即使在相同荷载作用下,结构的动力响应也会发生改变.针对有、无损伤情况下质量不同分布状况的系列结构,用正弦扫频的方法研究了结构的损伤及质量分布对结构动力应变响应的影响.试验结果表明无损伤时,在质量分布不同状况下,结构下部及中部动力应变响应最大值都随着质量块的边长的增大而增大,结构下部应变响应最大值总大于结构中部分应变响应最大值.有损伤时,在质量分布不同状况下,结构下部及中部动力应变响应最大值也都随着质量块的边长的增大而增大,但结构下部应变响应最大值总小于结构中部分应变响应最大值.结构下部动力应变响应最大值在有损伤时基本上比无损伤时小,而结构中部分动力应变响应最大值在有损伤时总比无损伤时大.由此可见动力应变响应最大值对结构损伤比对结构质量分布不均匀更为敏感.

参 考 文 献

1 E. Peter Carden, Paul Fanning. Vibration based condition monitoring: a review . *Structural Health Monitoring*, 2004,

- 3(4):355~377
- 2 Shanshan Wang, Qingwen Ren, Pizhong Qiao. Structural damage detection using local damage factor. *Journal of Vibration and Control*, 2006, 12(9):955~973
 - 3 G Fraraccio, A Briigger, R Betti. Identification and damage detection in structures subjected to base excitation. *Experimental Mechanics*, 2008, 48(4): 521~528
 - 4 李德葆, 陆秋海. 实验模态分析及其应用, 北京: 科学出版社, 2001. (Debao Li, Qiu Hai Lu. Experimental modal analysis and application. Beijing: Science Press, 2001 (in Chinese))
 - 5 王山山, 任青文. 基于曲率模态振型的刚架结构损伤检测. 动力学与控制学报, 2005, 3(2):81~86 (Shanshan Wang, Qingwen Ren. Damage detection for frame structure using curvature mode shapes. *Journal of Dynamics and Control*, 2005, 3(2):81~86 (in Chinese))

STUDY ON RELATIONSHIP BETWEEN STRUCTURAL MASS DISTRIBUTION , DAMAGE AND DYNAMIC RESPONSE *

Wang Shanshan Qiu Ling Xu Wei

(Department of Engineering Mechanics, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract The structural dynamic property is determined by physical parameters such as mass, damping, stiffness and their distribution. The structural dynamic property alters when these parameters and their distribution change. So the structural dynamic response varies even if the exciting force is same. Maintaining safety and integrity of the structures requires a better understanding of relationship between structural mass distribution, damage and dynamic response. In this study, relationship between structural mass distribution, damage and dynamic response is investigated by experiments. As a demonstration, the experiment of a steel structure with different mass distribution and damage is validated. The mass distribution in the structure is simulated by column welded different dimensional mass block at the top part, and structural damage simulated by saw-cutting a crack at the middle part of column. The sweep-sine resonance test is applied to study the relationship between structural mass distribution, damage and dynamic response. The structural first resonance dynamic strain response is measured during experiments. The experimental results indicate that the structural first resonance dynamic strain response increase when the asymmetry of mass distribution increases. When the structure is intact, the structural first resonance dynamic strain response at inferior part of column is always bigger than that of response at middle part of column. When the structure is damage, the structural first resonance dynamic strain response at inferior part of column is always less than that of response at middle part of column.

Key words structure, mass distribution, damage, strain, response, experiment