

79-82
①6

基于振型变化的框架结构破损评估

TU312.3
TU323.5

郭国会

范培生

易伟进

(湖南大学土木工程系 长沙 410082) (洛阳公路管理总段 河南洛阳 471000) (湖南大学土木工程系 长沙 410082)

摘要 针对常规的基于特征值变化进行结构破损评估方法的不足,提出了基于振型变化进行框架结构破损评估的方法。通过计算模拟,对此方法的适用性和有效性进行了讨论,初步证实了该方法的可行性。

关键词 框架结构, 破损评估, 振型变化

中图分类号 TU311

1 结构破损评估

结构物在正常使用条件下,由于自然灾害或其它因素的影响,将逐渐发生老化和破损现象,在结构上的反应将是刚度退化、变形增大、裂缝出现和扩展、承载力下降等变化。要对损伤结构做出拆除、加固或正常使用的决定,必须对其进行破损评估。

结构的损伤会引起其动态特性的变化,即损伤会引起阻尼增大、频率降低、振型发生变化。长期以来人们就利用损伤结构动态特性的变化来对结构进行破损评估^[1-5],但着眼点多为结构特征值的变化,对于模态振型的研究却不深入。通过分析,认为基于特征值变化进行结构破损评估的方法主要存在以下不足:

1) 对于大型复杂结构,不同部位的损伤可能引起结构特征值产生近似相同的变化,从而基于特征值的变化无法对结构进行破损评估;

2) 结构振动测试中只能获得其低阶频率,对于多种材料复合结构、高次超静定结构,损伤对于低阶频率的影响可能极小,无法对结构进行全面的评估。

鉴于以上原因,本文讨论利用振型变化来实现结构的破损评估,并以一十层框架结构为例,通过计算模拟来证实该方法的可行性。

2 基于振型变化的框架结构破损评估

2.1 基本思想

Pandy 等人利用振型曲率的变化对梁类结构进行了破损评估^[6]。对于梁类构件,有

$$V'' = M/EI \quad (1)$$

式中, V'' 、 M 、 EI 分别为梁截面相对应的曲率、弯矩和弯曲刚度。

由式(1)可知,当梁某区域发生损伤时,相应的弯曲刚度降低,截面曲率必然增大,从而利用破损结构和未破损结构振型曲率的变化,可以探测结构的损伤出现及损伤位置。

框架结构计算模型可以简化为竖向悬臂结构,旋转 90°即为图 2 所示模型,与图 1 所示

收稿日期:1997-11-07

郭国会,男,1973年生,博士生

湖南省自然科学基金及机械部专项科研基金资助

的悬臂梁模型相比,图 2 中每段刚度代表框架结构各层的层间剪切刚度,由于结构的静力变形曲线可以展开成前几阶振型的叠加形式^[1],而框架结构的静力变形曲线又与其层间剪切刚度密切相关,故基于 Pandy 等人的思想,框架结构低阶振型的变化必能反映结构的局部损伤状况。

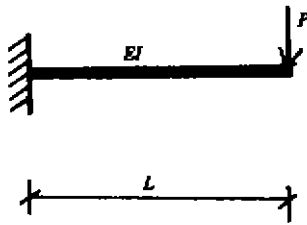


图 1 悬臂梁模型

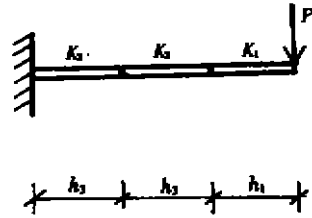


图 2 旋转 90° 的框架结构计算模型

2.2 灵敏度分析

由于结构振动测试仅能获得结构的低阶信息,此处仅以一阶振型为基础,进行振型关于结构物理参数的灵敏度分析。

设一阶振型向量 φ_1 为结构物理参数向量 C 的连续函数

$$\varphi_1 = \varphi_1(C) \quad (2)$$

记未破损结构相对应的一阶振型向量及结构物理参数向量的值为 φ_{10} 、 C_0 , 则

$$\varphi_1 = \varphi_{10} + (\partial\varphi_1/\partial C)(C - C_0) + \dots \quad (3)$$

当结构物理参数向量变化很小时,可以忽略高阶微量,从而有

$$\Delta\varphi_1 = (\partial\varphi_1/\partial C)\Delta C \quad (4)$$

式中, $\Delta\varphi_1 = \varphi_1 - \varphi_{10}$ 为破损结构和未破损结构一阶振型差值向量;

$\Delta C = C - C_0$ 为破损结构和未破损结构物理参数差值向量;

$\partial\varphi_1/\partial C$ 称为一阶振型向量对结构物理参数向量的灵敏度矩阵,为 Jacobi 矩阵。

对于 n 层框架结构,以层间剪切刚度表示结构物理参数,则灵敏度矩阵为:

$$\partial\varphi_1/\partial K = \begin{bmatrix} \partial\varphi_{11}/\partial K_1 & \partial\varphi_{11}/\partial K_2 & \dots & \partial\varphi_{11}/\partial K_n \\ \partial\varphi_{12}/\partial K_1 & \partial\varphi_{12}/\partial K_2 & \dots & \partial\varphi_{12}/\partial K_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \partial\varphi_{1n}/\partial K_1 & \partial\varphi_{1n}/\partial K_2 & \dots & \partial\varphi_{1n}/\partial K_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $\varphi_{11}, \varphi_{12}, \dots, \varphi_{1n}$ 为经过质量归一化处理的一阶振型向量各分量;

K_1, K_2, \dots, K_n 为 n 层框架结构各层的层间剪切刚度。

如果记 $S = \partial\varphi_1/\partial K$, 则式(4)或以表示为: $\Delta\varphi_1 = S\Delta K$ (6)

这样,如果求得灵敏度矩阵 S , 并已由振动测试获得破损结构和未破损结构一阶振型差值向量 $\Delta\varphi_1$, 则结构的破损评估可以由(6)式表达: $\Delta K = S^{-1}\Delta\varphi_1$ (7)

2.3 灵敏度矩阵的求解

由式(7)可以由获得的一阶振型差值对结构进行破损评估,但上述灵敏度分析的基础是式(2)中由结构物理参数差值向量引起的高阶微量可以忽略不计。因此,在利用本方法进行框架结构破损评估时,假定结构物理参数差值向量较小,以致其引起的高阶微量可以忽略不计。

当框架结构只有第 i 层出现破损时,式(6)可以表示为:

$$\begin{bmatrix} \Delta\varphi_{11} & \Delta\varphi_{12} & \dots & \Delta\varphi_{1n} \end{bmatrix}^T = \Delta K_i \begin{bmatrix} \partial\varphi_{11}/\partial K_i & \partial\varphi_{12}/\partial K_i & \dots & \partial\varphi_{1n}/\partial K_i \end{bmatrix}^T \quad (i = 1, 2, \dots, 10) \quad (8)$$

式中, ΔK_i 为框架结构损伤前后第 i 层层间剪切刚度变化值。

由式 (8) 可求得灵敏度矩阵中第 i 个列向量, 令框架结构各层依次破损, 可以求得灵敏度矩阵。

3 模拟分析

3.1 初始物理参数

如图 3 所示, 一十层框架结构, 质量 $M_i (i = 1, 2, \dots, 10) = 200 \text{ t}$, 刚度 $K_i (i = 1, 2, \dots, 10) = 42 \text{ 000 kN/m}$, 不考虑阻尼, 假定结构刚度的退化不会引起质量的变化。

3.2 仿真结果

根据式 (8) 计算出灵敏度矩阵后, 由式 (7) 可求出结构相应的破损状态。抽取几种破损状态, 定义结构损伤系数为:

$$\alpha_i = \Delta K_i / K_i \quad (i = 1, 2, \dots, 10) \quad (9)$$

则可根据 α_i 的理论值与计算值对本方法的效果加以分析。

计算结构一阶振型向量对结构物理参数向量的灵敏度矩阵, 令结构发生不同程度的损伤, 利用式 (7) 进行框架结构的破损评估, 结果见表 1。

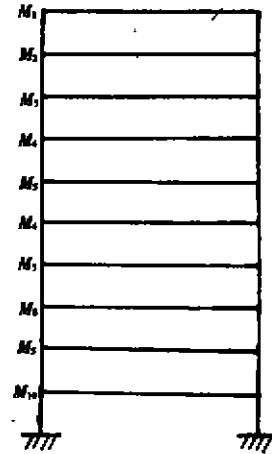


图 3 十层框架结构计算简图

表 1 根据一阶振型变化计算的理论与计算值对比表

损伤状态	序号	理论值	计算所得各层刚度损伤系数 (%)									
		层数(损伤系数%)	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9	α_{10}
单层损伤	①	2(18)	1.2	19.1	1.1	1.0	1.2	1.2	1.2	1.1	1.2	1.2
	②	4(10)	0.4	0.4	0.4	9.9	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	③	6(25)	1.4	1.2	1.3	0.5	0.9	26	0.9	0.6	0.9	1.1
	④	8(30)	1.5	1.2	0.7	1.4	1.3	0.7	37	0.7	1.3	0.7
两层损伤	①	3(14)、7(8)	1.5	1.5	13.4	1.4	1.5	1.4	7.6	1.4	1.4	1.5
	②	4(16)、9(24)	1.7	1.7	1.7	15.6	1.7	1.7	1.7	1.7	22.3	1.7
	③	5(10)、8(30)	1.8	1.8	1.7	1.7	11.2	1.8	1.8	34.1	1.8	1.8
三层损伤	①	2(15)、5(10)、8(15)	3.3	12.5	3.1	3.0	6.7	3.1	3.2	12.8	3.2	3.2
	②	3(15)、4(12)、7(10)	3.0	2.9	13.1	9.5	2.9	2.7	13.0	2.7	2.6	2.7

基于二阶振型变化对图示框架结构进行破损评估的结果见表 2, 由表 1 和表 2 可见, 随着振型阶数的增加, 误差逐渐加大, 此方法的有效性有所降低, 基于高阶振型变化对图示框架结构进行破损评估的结果也说明了这一点。

表 2 根据二阶振型变化计算理论与计算值对比表

损伤状态	序号	理论值	计算所得各层刚度损伤系数 (%)									
		层数(损伤系数%)	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9	α_{10}
单层损伤	①	2(18)	1.4	20.4	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3	1.4
	②	4(10)	0.6	0.6	0.5	11.2	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
	③	6(25)	1.7	1.7	1.6	1.5	0.9	28	1.1	0.8	1.4	1.5
	④	8(30)	2.0	2.1	2.1	1.8	1.4	0.9	1.3	41	2.0	1.7
两层损伤	①	3(14)、7(8)	2.6	2.6	16	2.4	2.5	2.5	6.5	2.1	2.0	2.0
	②	4(16)、9(24)	2.8	2.8	2.8	17.9	2.6	2.6	2.7	2.8	21.2	2.7
	③	5(10)、8(30)	3.0	2.8	2.8	2.8	12.4	2.8	2.8	37.4	3.0	3.0

4 结 论

1) 本方法是在由结构物理参数差值向量引起的高阶微量可以忽略不计的基础上所得,表 1 中,当结构层间剪切刚度变化较小时,准确地实现了框架结构的破损评估。当结构损伤系数大于 0.25 时,计算结果较差,也正说明了这一点。

2) 灵敏度矩阵是根据式(8),令单个楼层依次破损时推导出来的。当结构有三个或多个楼层破损时,由于耦合影响,计算结果偏差较大。故本文所述方法不能对多个楼层同时破损的情况进行准确地破损评估。

3) 计算模拟表明,随着振型阶数的增加,方法的有效性逐渐降低,实际结构的振动测试中,能够获得较为准确的结构低阶信息,从而保证了本方法的适应性。

参 考 文 献

- 1 Pandy A K, Biswas M. Damage Detection in Structures Using Changes in Flexibility. *Journal of Sound and Vibration*, 1994, 169(1): 3 ~ 17
- 2 Hassiotis S, Jeong G D. Assessment of Structural Damage from Natural Frequency Measurements. *Computers & Structures*, 1993, 49(4): 679 ~ 691
- 3 Cawley P, Adams E P. The Location of Defects in Structures from Measures of Natural Frequencies *Journal of Strain Analysis*, 1979, 14(2): 49 ~ 57
- 4 沈蒲生, 易伟建, 王长新. 混凝土结构破损评估的动力学方法及应用研究. *湖南大学学报*, 1995, 22(1): 113 ~ 119
- 5 周先雁, 沈蒲生, 易伟建. 混凝土平面杆系结构破损评估理论及试验研究. *湖南大学学报*, 1995, 22(4): 104 ~ 109
- 6 Pandy A K, Biswas M, Samman M M. Damage Detection from Changes in Curvature Mode Shapes. *Journal of Sound and Vibration*, 1991, 145(2): 321 ~ 332
- 7 邵旭东. 混凝土桥梁承载力评定的理论与应用:[学位论文]. 长沙:湖南大学, 1991

Damage Assessment of Frame Structures Based on Changes in Mode

Guo Guohui

(Dept. of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, 410082)

Fan Peisheng

(Luoyang Highway Management Company, 471000)

Yi Weijin

(Dept. of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, 410082)

Abstract The method of structural damage assessment based on changes in eigenvalues has some defects. Therefore, this paper presents a method of damage assessment of frame structures based on changes in mode. The adaptability and efficiency of this method are discussed through computation simulation. The results indicate that this method is feasible.

Key Words frame structures, damage assessment, changes in mode