

基于柔度曲率矩阵的损伤结构识别新方法

New Method of Damage Structure Identification Based on the Flexibility Curvature Matrix

戴斌

长沙理工大学 土木与建筑工程学院, 中国 湖南 长沙 410076

B in Dai

Changsha University of Science & Technology School of Civil Engineering and Architecture, Changsha City, Hunan, 410076, China

【摘要】 为了提高柔度方法应用于结构损伤识别的范围和准确性, 在柔度曲率矩阵基础上, 构造出了新的损伤识别指标 {H}。简支梁、固支梁以及一层一跨框架结构的算例对此新识别指标有效性进行了验证。数值分析表明: 该方法只需要采用低阶模态参数就完成了对结构的单、双处损伤识别。本文的研究方法对工程结构损伤识别有一定的参考价值。

【Abstract】 In order to improve the range and accuracy of flexibility method applied to structural damage identification, a new damage identification index {H} is constructed on the basis of flexibility curvature matrix. The validity of the new identification index is verified by the example of a simple supported beam, a clamped beam and a story spanning frame structure. The numerical analysis shows that the method only needs low order modal parameters to complete the single and double damage identification of structures. The research method of this paper has certain reference value for damage identification of engineering structures.

【关键词】 柔度曲率矩阵; 框架; 模态参数; 损伤识别

【Keywords】 Flexibility curvature matrix; Frame; Modal parameter; Damage identification

DOI: <http://dx.doi.org/10.26549/jc.jygl.v11i1.232>

1 构造新损伤识别指标

1.1 柔度曲率矩阵差

将柔度矩阵的各行分别进行按列中心差分, 得到n行、(n-2)列的柔度曲率矩阵。 CG_e , CG_d 表示损伤前和损伤后的柔度曲率矩阵; CG_e^j , CG_d^j 表示损伤前后柔度曲率矩阵的第j列, 则有

$$CG_e^j = \frac{G_j^e(i-1) + G_j^e(i+1) - 2G_j^e(i)}{(\Delta l)^2} \quad (1.6)$$

$$CG_d^j = \frac{G_j^d(i-1) + G_j^d(i+1) - 2G_j^d(i)}{(\Delta l)^2} \quad (1.7)$$

式子 $i=1, 2, 3, \dots, n$, Δl 为单元长度。

令第j列绝对值的最大值为 c_j^e , 则

$$c_j^e = \max |CG_e^j| \quad (1.8)$$

$$c_j^d = \max |CG_d^j| \quad (1.9)$$

取两者差值的绝对值作为识别的指标, 用DMFC表示,

$$DMFC = |c_j^e - c_j^d| \quad (1.10)$$

1.2 新损伤指标的构造方法

依据1.1中得到的损伤前后的柔度曲率矩阵 CG_e 和 CG_d , 通过两者之间的平方差构造出新的损伤识别矩阵, 即

$$\Delta CG = [CG_e]^2 - [CG_d]^2 \quad (1.11)$$

取 ΔCG 矩阵各列绝对值的最大值记为 $\Delta cg = \max |\Delta CG|$, 再取 $[CG_e]^2$ 矩阵中各列绝对值的最大值记为 $cg^e = \max [CG_e]^2$, 进而构造出新的损伤指标为

$$\{H\} = \left| \frac{\Delta cg}{cg^e} \right| = \left| \frac{\max |\Delta CG|}{\max [CG_e]^2} \right| \quad (1.12)$$

2 案例分析

2.1 简支梁的数值模拟

梁长8m, 截面尺寸为300mm×500mm, 梁截面惯性矩为

3.125Gpa, 密度为2500kg/m³。对新的损伤指标 {H} 的损伤识别效果进行验证。

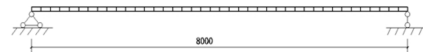
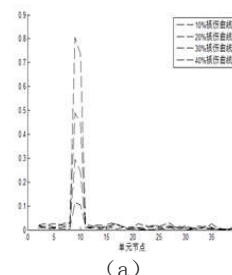


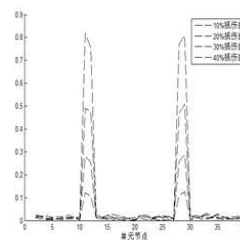
图1 建立有限元模型

2.1.1 单、双处损伤

仅仅9号单元及11, 28单元出现损伤, 弹性模量下降10%、20%、30%和40%。识别效果如下图2:



(a)



(b)

图2 单、双处损伤识别效果图

由上可知: 出现损伤的9号单元及11, 28号单元处 {H} 的突变最大, 而没有出现损伤的单元 {H} 值几乎等于 '0', 由

此可以明显地识别出结构的损伤位置。

2.2 固支梁的数值模拟

将上述分析模型的支承情况改为两端固支，故分析模型变为一个新的有限元模型固支梁，其他的条件不变。同样考虑梁的竖向振动，损伤分别考虑结构的单处、两处、三处损伤的情况，对新的损伤指标 {H} 的损伤识别效果进行验证。固支梁有限元模型如下图3：



图3 固支梁有限元模型

2.2.1 单、双处损伤

仅仅10号单元与12, 30两单元出现损伤，定义损伤程度为弹性模量下降15%、25%、35%和45%。损伤识别效果如下图4：

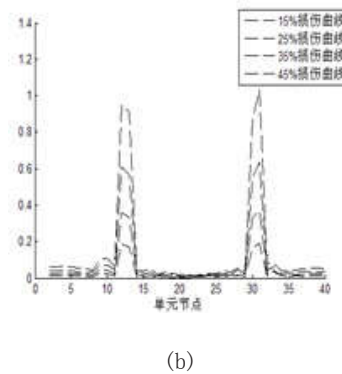
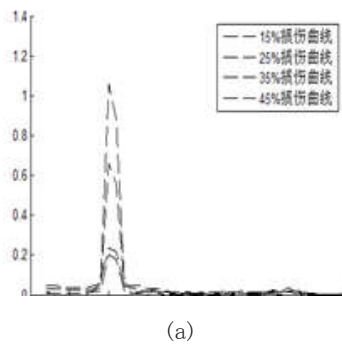


图4 单、双处损伤识别效果图

2.2.2 三处同时损伤的工况

假设固支梁7、15、31单元同时损伤15%、25%、35%作为第三种工况。这次损伤工况的数值模拟效果如下图5：

由上述得到的损伤识别图可知：将支承情况改为两端固支得到固支梁后，新的损伤识别指标 {H} 同样能够很好地识别出固支梁单处与多处发生的损伤。从 (a) 和 (b) 图可以看到根据结构前三阶模态参数计算的 {H} 变化曲线，在发生损伤的10号单元以及12, 30号单元处 {H} 的突变最大，其他未损伤单元处也有突起。但是尽管有突起，却并不影响对损伤单元的识别，不会引起误判。同理，对三处损伤的

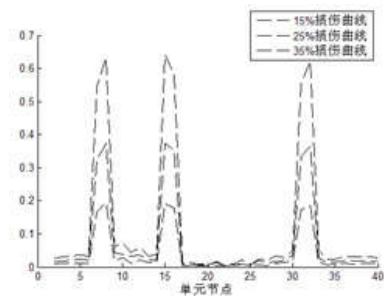


图5 固支梁三处损伤识别图

识别，{H} 指标依然很好地识别出了损伤发生的位置。随着单元损伤程度的增加，新指标 {H} 的值也随之增大，可以定性的看出损伤程度。

2.3 一层一跨框架数值模拟

建立一个一层一跨框架有限元模型，每跨长6.0m，每层高4.0m，梁和柱的截面尺寸为450mm×450mm，混凝土弹性模量为 $E=3 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ ，泊松比为0.3，将框架柱划分为8个单元，梁划分为12个单元。结构的损伤表现为弹性模量的下降，而质量保持不变。分析模型如下图6：

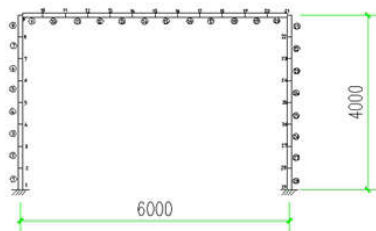


图6 一层一跨有限元框架结构

2.3.1 框架梁两处损伤识别

针对上述框架结构假设梁的第12, 16单元发生了损伤，损伤程度分别为弹性模量下降10%、20%、30%和40%来模拟这种工况。利用ANSYS来提取梁的前三阶固有频率等模态参数，损伤工况的数值模拟效果如下图7：

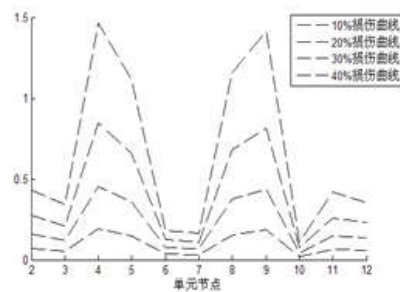


图7 框架梁两处损伤识别效果图

2.3.2 框架柱单处损伤识别

对于框架柱子的损伤识别，可以分为左柱和右柱的识别，即左边柱子单处6单元和右边柱子单处23单元发生损伤，损伤程度分别为弹性模量下降10%、20%、30%和40%来模拟。同样是提取柱子前三阶模态参数，损伤工况的数