

文章编号: 1001-4888(2011)01-0096-07

# 一种新的结构损伤识别试验方法研究<sup>\*</sup>

陈淮<sup>1</sup>, 李静斌<sup>1</sup>, 殷学钢<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 450001; 2. 重庆大学 工程力学系, 重庆 400045)

**摘要:** 提出在构件上增设附加质量来模拟结构损伤的试验方法, 证明了质量增加与刚度降低的等价关系。以简支梁为例, 给出了采用附加沙袋法、悬挂质量法两种附加质量方式模拟结构损伤的具体试验方案, 完成了多工况下简支梁附加质量模拟结构损伤的动测试验。通过试验验证了本文所提方法的正确性, 得出了在梁构件上采用附加沙袋法可准确模拟出不同损伤位置、不同损伤程度的结论。为结构健康诊断与损伤识别方法的验证提供了一种简便的、可重复使用同一个试验构件的实验方法, 避免了不同试验构件随机性对测试结果的影响, 具有较大的实用价值。

**关键词:** 损伤识别; 试验; 附加质量

**中图分类号:** O329

**文献标识码:** A

## 0 引言

结构健康诊断与损伤识别已成为当前学术界和工程界研究的热点问题之一。近年来国内外有关结构健康诊断与损伤识别的研究成果很多, 常用的方法是采用结构的各种动力特性参数进行结构损伤识别<sup>[1-9]</sup>, 但大多数研究成果仅停留在理论研究的层面上, 缺乏必要的试验验证。究其原因, 主要在于结构健康诊断与损伤识别的验证性试验需要对试验构件预先进行破损处理, 而试验构件破损后不可复原, 从而使结构损伤识别试验不能在单一构件上重复做, 造成结构损伤识别试验周期长、费用高, 并且少量破损构件的试验数据离散性大, 难以对理论方法的正确性进行充分支持; 不同的试验构件, 特别是工程中采用的混凝土构件, 其参数随机性也对试验测试结果有影响。由于结构的损伤往往可归纳为结构刚度的降低, 因此对梁、板等简单结构的破损处理方法, 大多采用在梁、板一侧局部切口(挖洞)处理<sup>[10-12]</sup>, 这种方法虽然在一定程度上能够通过梁、板构件的局部刚度降低模拟结构的局部损伤, 但梁、板局部切口(挖洞)后, 受损部位的中性轴与未受损部位的中性轴不再重合, 试验构件与理论计算模型必然存在一定程度的误差。基于以上结构损伤识别验证性实验方案的缺陷, 本文提出了一种通过在试验构件上附加质量来模拟结构刚度降低的试验方法, 可以仅采用一个构件即可实现多参数损伤工况模拟, 并且试验完成后, 试验构件仍然保持完好, 可以重复进行试验使用, 为结构健康诊断与损伤识别方法的验证性试验提供了一种新的方法。

## 1 梁构件局部切口模拟结构损伤方法的局限性

梁是最简单的一维构件, 在结构健康诊断与损伤识别方法的验证性试验中, 经常用梁进行破损性实

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2010-08-07; 修回日期: 2010-09-25

**基金项目:** 高等学校博士学科点专项科研基金(200804590006), 河南省杰出人才计划项目(084200510003), 河南省高等学校青年骨干教师资助计划(2009 年度)

**通讯作者:** 李静斌(1973—), 博士, 副教授, 硕导。主要从事工程结构分析及结构健康监测方面的研究。E-mail: lijingbin@zzu.edu.cn

验。对梁构件进行破损处理,往往采用在梁的受拉翼缘侧进行局部切口,通过计算切口处未断开截面与初始截面的抗弯惯性矩比值,确定局部切口处预设刚度降低的程度。例如,某铝合金简支梁为箱型薄壁截面,规格为 $\square 80 \times 50 \times 1.5 \times 1.5 \text{ mm}$ ,关于水平形心轴的初始截面惯性矩为  $I_0 = 345246 \text{ mm}^4$ 。把该梁划分 15 个单元,为模拟某单元的结构损伤,将该单元受拉侧翼缘板切削掉,切口处未断开截面的惯性矩为  $I_1 = 201370 \text{ mm}^4$ ,则该梁切口处截面惯性矩同初始截面惯性矩之比为  $I_1/I_0 = 0.58$ ,可模拟该单元 42% 的刚度降低。铝合金箱梁初始截面及切口截面如图 1 所示,图中  $X_0$ 、 $X_1$  轴分别为初始截面及切口截面的水平中性轴。

通过在梁构件局部切口实现梁截面刚度降低定量模拟出梁构件的局部损伤,但该方法存在以下缺点:

(1) 对梁构件进行局部切口后,已破损结构具有不可恢复性,对某单元进行一种程度的切口处理只能模拟出该单元的单一损伤工况,要想实现多工况的损伤模拟,势必要增加试验梁的数量,对于钢材等材料变异性小的梁,进行结构损伤识别试验,材料的随机性影响可忽略不计,但对于混凝土等材料变异性大的梁,进行结构损伤识别试验,材料的随机性影响大,不能进行重复试验;

(2) 对梁构件下侧进行局部切口处理后该段梁的水平中性轴向上侧移动,如图 2 所示,其中图(a)为试验梁的真实情况,损伤单元 8 与其它单元的水平中性轴不重合,必然造成整根梁的水平中性轴上移,图(b)为进行损伤识别的有限元计算模型,往往不考虑损伤单元 8 中性轴位置的改变,这必然造成理论计算与试验不完全一致,影响损伤识别的精度;

(3) 以图 1 中的箱型截面为例,仅仅切去下翼缘板,损伤单元的刚度降低就达到了 42%,因此采用该方法难以实现小损伤工况的模拟,这与工程结构多为小损伤的实际情况差距较大;

(4) 对钢梁单元进行局部切口相对较易实现,对混凝土梁,难以准确定量模拟其刚度降低。

综上所述,采用梁构件局部切口模拟结构损伤的试验方法具有较大的局限性,需要寻求一种较为方便的损伤模拟试验方法。

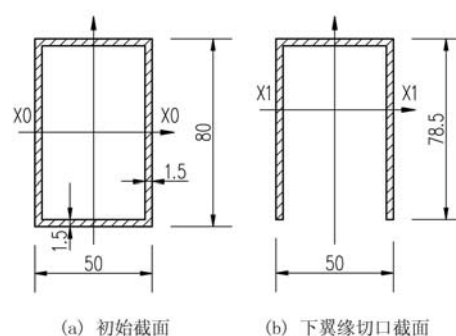


图 1 铝合金箱梁横截面图

Fig. 1 Cross section of Aluminium box girder

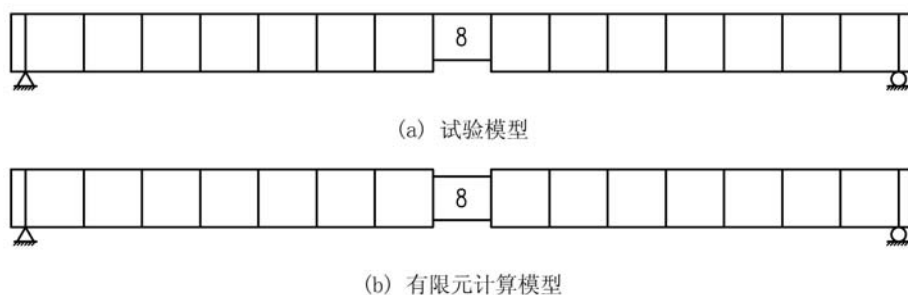


图 2 进行局部切口的简支梁

Fig. 2 Simply supported beam with partial notch

## 2 附加质量模拟结构损伤的试验方法

采用在结构上附加质量能够准确定量模拟结构损伤程度的前提是:所附加的质量应与结构共同参与振动,但不能对结构提供任何附加刚度。下面以梁为例讨论附加质量模拟结构损伤的具体试验方法。

首先应排除在梁构件上表面直接粘结安装刚性质量块的方法,因为刚性的质量块与梁构件上表面可靠粘结后,由于其本身具有一定的抗弯刚度,又远离水平中性轴,故对梁构件产生的附加刚度已不容

忽视;而如果不进行粘结只是将刚性质量块摆放在梁构件上表面,又无法实现质量块与梁的共同振动。因此可从二个方面避免上述情况的出现:其一采用柔性附加沙袋法把质量安放在梁构件上表面,其二采用悬挂质量法把质量悬挂在梁构件下侧。

### 2.1 附加沙袋法

在实验室进行动测试验,可采用在布袋装填细沙,将柔性质量沙袋放置在梁构件上表面来模拟结构损伤。采用附加沙袋作为附加质量的优点为:(1)取材方便,费用低廉;(2)沙袋质量可根据预设的刚度降低程度等效计算出的附加质量精确称量;(3)可根据试验梁划分单元的大小决定所制作沙袋的大小,所装填细沙的流动性又非常便于将整个沙袋的质量均匀附设在设定损伤的梁单元全长范围内;(4)沙袋与梁构件之间的连接可采用胶带粘结,保证沙袋与梁共同振动;(5)沙袋本身的抗弯刚度基本上可忽略不计,因此将沙袋直接安放在梁构件上表面对梁的附加刚度影响很小,为了进一步提高实验的精度,降低沙袋附加刚度的影响,对于 I 字型或 H 型钢梁可将沙袋用胶带对称粘结在梁腹板外侧靠近中性轴的部位。

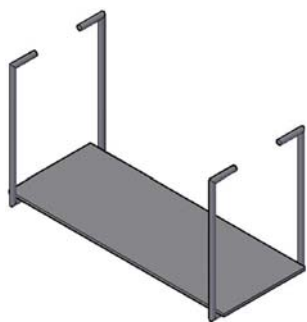


图 3 悬挂质量示意图

Fig. 3 Diagram of suspended mass

### 2.2 悬挂质量法

也可采用在梁构件下侧悬挂附加质量来模拟结构损伤。如图 3 所示,将细钢筋弯折后焊接在矩形钢板的下表面即可制作出适用于 I 字型或 H 型等类型梁的附加悬挂质量挂盘,悬挂质量挂盘顶部的 4 段水平细钢筋可悬挂在试验梁的下翼缘内侧,附加质量的大小可通过在挂盘上面增减钢板进行调整。由于作为附加悬挂质量的挂盘与梁构件仅有 4 个部位的点接触,因此采用悬挂质量法也不会对梁构件产生附加竖向抗弯刚度,满足附加质量的基本要求。同附加沙袋法相比,悬挂质量法可沿梁轴向自由移动,在动测试验改变损伤模拟工况时,悬挂质量法比附加沙袋法更加快捷,且在不同梁单元位置处模拟同一种大小的损伤比附加沙袋法更易保持附加质量沿梁单元分配的一致性。

## 3 附加质量模拟结构损伤的理论证明

结构无阻尼自由振动的动力学特征方程为:

$$([K] - \lambda[M])\{\phi\} = 0 \quad (1)$$

其中,  $[K]$  为结构刚度矩阵;  $[M]$  为结构质量矩阵;  $\lambda, \{\phi\}$  分别为结构特征值和特征向量。

假定结构的刚度、质量均发生改变,则特征对也随之改变,式(1)成为:

$$([K] + [\Delta K] - (\lambda + \Delta\lambda)([M] + [\Delta M]))(\{\phi\} + \{\Delta\phi\}) = 0 \quad (2)$$

其中,  $[\Delta K]$  为结构刚度的改变量;  $[\Delta M]$  为结构质量的改变量;  $\Delta\lambda, \{\Delta\phi\}$  分别为结构特征值和特征向量的改变量。

展开式(2),并代入式(1),得:

$$([\Delta K] - \Delta\lambda[M] - \lambda[\Delta M] - \Delta\lambda[\Delta M])\{\phi\} + ([K] + [\Delta K] - \lambda[M] - \Delta\lambda[M] - \lambda[\Delta M] - \Delta\lambda[\Delta M])\{\phi\} = 0 \quad (3)$$

将式(3)两边同时左乘  $\{\phi\}^T$ , 得:

$$\{\phi\}^T([\Delta K] - \Delta\lambda[M] - \lambda[\Delta M] - \Delta\lambda[\Delta M])\{\phi\} + \{\phi\}^T([K] + [\Delta K] - \lambda[M] - \Delta\lambda[M] - \lambda[\Delta M] - \Delta\lambda[\Delta M])\{\Delta\phi\} = 0 \quad (4)$$

由于  $[K], [M]$  均为对称阵,将式(1)转置,有:

$$\{\phi\}^T([K] - \lambda[M]) = 0 \quad (5)$$

考虑式(5),则式(4)成为:

$$\{\phi\}^T([\Delta K] - \Delta\lambda[M] - \lambda[\Delta M] - \Delta\lambda[\Delta M])\{\phi\} + \{\phi\}^T([\Delta K] - \Delta\lambda[M] - \lambda[\Delta M] - \Delta\lambda[\Delta M])\{\Delta\phi\} = 0 \quad (6)$$

化简式(6),可得:

$$\Delta\lambda = \frac{\{\phi\}^T([\Delta K] - \lambda[\Delta M])(\{\phi\} + \{\Delta\phi\})}{\{\phi\}^T([M] + [\Delta M])(\{\phi\} + \{\Delta\phi\})} \quad (7)$$

式(7)表示结构的刚度、质量改变后,特征值改变量的求解关系式。

如结构的刚度改变,而质量不变,即 $[\Delta M]=0$ ,代入式(7)可得:

$$\Delta\lambda = \frac{\{\phi\}^T[\Delta K](\{\phi\} + \{\Delta\phi\})}{\{\phi\}^T[M](\{\phi\} + \{\Delta\phi\})} \quad (8)$$

可见当结构质量不变而刚度降低时,会引起各阶特征值的降低。

另一方面,当结构的质量改变,而刚度不变,即 $[\Delta K]=0$ ,代入式(7)可得:

$$\Delta\lambda = -\frac{\lambda\{\phi\}^T[\Delta M](\{\phi\} + \{\Delta\phi\})}{\{\phi\}^T([M] + [\Delta M])(\{\phi\} + \{\Delta\phi\})} \quad (9)$$

可见当结构刚度不变而质量增加时,同样会引起各阶特征值的降低。

现假定结构中某单元的刚度降低,引入正值小参数  $\epsilon_{Ki}$ ,则结构刚度的降低量可表示为:

$$[\Delta K] = -\epsilon_{Ki}[K] \quad (10)$$

另一方面假定结构中某单元的质量增加,引入正值小参数  $\epsilon_{Mi}$ ,则结构质量的增加量可表示为:

$$[\Delta M] = \epsilon_{Mi}[M] \quad (11)$$

将式(10)代入式(8)、式(11)代入式(9),并令二者相等,则有:

$$\frac{\epsilon_{Ki}\{\phi\}^T[K](\{\phi\} + \{\Delta\phi\})}{\{\phi\}^T[M](\{\phi\} + \{\Delta\phi\})} = \frac{\lambda\epsilon_{Mi}\{\phi\}^T[M](\{\phi\} + \{\Delta\phi\})}{(1 + \epsilon_{Mi})\{\phi\}^T[M](\{\phi\} + \{\Delta\phi\})} \quad (12)$$

式(12)可进一步简化为:

$$\frac{\{\phi\}^T([\Delta K] - \frac{\epsilon_{Mi}}{\epsilon_{Ki}(1 + \epsilon_{Mi})}\lambda[M])(\{\phi\} + \{\Delta\phi\})}{\{\phi\}^T[M](\{\phi\} + \{\Delta\phi\})} = 0 \quad (13)$$

为满足式(13)成立,由式(5)可知,只需要满足下式即可:

$$\frac{\epsilon_{Mi}}{\epsilon_{Ki}(1 + \epsilon_{Mi})} = 1 \quad (14)$$

即有:

$$\epsilon_{Mi} = \frac{\epsilon_{Ki}}{1 - \epsilon_{Ki}} \quad (15)$$

式(15)表明,在求解结构动力学特征方程(2)时,结构的刚度降低与质量增加存在一定的等价关系,由于常用结构刚度降低来表示结构发生损伤,式(15)则证明了同样可通过结构质量的增加代表结构发生了损伤,即可通过在结构上附加质量来模拟结构已发生的损伤。

#### 4 简支梁附加质量模拟结构损伤试验

为了验证附加质量模拟结构损伤试验方法的正确性,进行了工字钢截面简支梁动测试验,试验工字钢梁全长 6000mm,支座中心线距梁端部截面 100mm,梁计算跨度为 5800mm,将该梁划分为 20 个单元,每单元长度 290mm。试验梁的单元划分如图 4 所示。

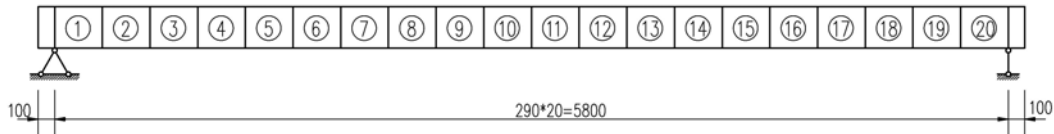


图 4 试验梁单元划分

Fig. 4 Element division of experiment beam

根据钢梁称重结果可知钢梁线质量为 31.667kg/m,每个单元质量为 9.183kg。如分别模拟 1 个单元有 10%、20%、30%的损伤,即  $\epsilon_{Ki}$  分别等于 0.1、0.2、0.3,代入式(15),可计算出结构单元不同损伤程度对应的附加质量的大小,得出预设损伤单元的附加质量值,如表 1 所示。

表 1 模拟结构损伤的附加质量计算表

Tab. 1 Added mass calculation of structural damage simulation

| 刚度减少量 $\epsilon_{Ki}$ | 质量增加量 $\epsilon_{Mi}$ | 1 个单元附加质量(kg) |
|-----------------------|-----------------------|---------------|
| 10%                   | 11.1%                 | 1.019         |
| 20%                   | 25.0%                 | 2.296         |
| 30%                   | 42.9%                 | 3.940         |

分别采用附加沙袋法和悬挂质量法,通过在试验梁部分单元上附加质量模拟梁的损伤,每种方法各进行 21 组模拟损伤工况的动测试验,分别考虑 4、7、9 号单元模拟 10%、20%、30% 的单损伤及 10%、30% 的双损伤。动测试验方法采用锤击激振法。对动力测试结果进行模态分析,可得到两种方法的 42 种模拟损伤工况的实测频率值和振型,并对无任何附加质量的试验梁进行动力测试,得到对应于无损状态的梁的实测频率和振型。限于篇幅,本文仅列出无损状态及采用附加沙袋法及悬挂质量法的 7、9 单元模拟单损伤、双损伤的 10 种工况的前 3 阶频率实测值,如表 2 所示,同时给出了各模拟损伤工况相对无损状态的频率变化量。

表 2 简支梁部分工况实测频率值

Tab. 2 Experimental frequencies under partial damage simulation conditions of the experiment beam

| 实测<br>频率<br>阶次 | 无损<br>状态 | 附加质量模拟结构损伤—附加沙袋法 |        |        |           |        |        |                |         |         |         |
|----------------|----------|------------------|--------|--------|-----------|--------|--------|----------------|---------|---------|---------|
|                |          | 7 # 单元单损伤        |        |        | 9 # 单元单损伤 |        |        | 7 # -9 # 单元双损伤 |         |         |         |
|                |          | 10%              | 20%    | 30%    | 10%       | 20%    | 30%    | 10%-10%        | 10%-30% | 30%-10% | 30%-30% |
| $f_1$          | 23.13    | 23.05            | 22.97  | 22.81  | 23.05     | 22.89  | 22.73  | 22.97          | 22.66   | 22.66   | 22.42   |
| $f_2$          | 88.91    | 88.65            | 88.09  | 87.86  | 88.75     | 88.54  | 88.15  | 88.44          | 87.86   | 87.66   | 86.88   |
| $f_3$          | 175.86   | 175.84           | 175.92 | 175.92 | 175.30    | 174.81 | 174.38 | 175.30         | 174.22  | 175.33  | 174.38  |
| $\Delta f_1$   | 0        | -0.34            | -0.68  | -1.35  | -0.34     | -1.01  | -1.69  | -0.68          | -2.03   | -2.03   | -3.04   |
| $\Delta f_2$   | 0        | -0.29            | -0.91  | -1.18  | -0.18     | -0.42  | -0.85  | -0.53          | -1.17   | -1.41   | -2.28   |
| $\Delta f_3$   | 0        | -0.01            | 0.04   | 0.04   | -0.32     | -0.59  | -0.84  | -0.32          | -0.93   | -0.30   | -0.84   |
| 实测<br>频率<br>阶次 | 无损<br>状态 | 附加质量模拟结构损伤—悬挂质量法 |        |        |           |        |        |                |         |         |         |
|                |          | 7 # 单元单损伤        |        |        | 9 # 单元单损伤 |        |        | 7 # -9 # 单元双损伤 |         |         |         |
|                |          | 10%              | 20%    | 30%    | 10%       | 20%    | 30%    | 10%-10%        | 10%-30% | 30%-10% | 30%-30% |
| $f_1$          | 23.13    | 22.97            | 22.73  | 22.73  | 22.97     | 22.73  | 22.58  | 22.81          | 22.50   | 22.50   | 22.34   |
| $f_2$          | 88.91    | 88.83            | 88.98  | 88.75  | 88.56     | 88.67  | 88.67  | 87.50          | 89.06   | 87.19   | 87.50   |
| $f_3$          | 175.86   | 174.92           | 174.79 | 174.95 | 174.83    | 175.06 | 175.24 | 173.48         | 173.70  | 173.39  | 173.98  |
| $\Delta f_1$   | 0        | -0.68            | -1.69  | -1.69  | -0.68     | -1.69  | -2.36  | -1.35          | -2.70   | -2.70   | -3.38   |
| $\Delta f_2$   | 0        | -0.09            | 0.09   | -0.18  | -0.39     | -0.26  | -0.26  | -1.58          | 0.18    | -1.93   | -1.58   |
| $\Delta f_3$   | 0        | -0.53            | -0.61  | -0.52  | -0.59     | -0.45  | -0.35  | -1.35          | -1.23   | -1.40   | -1.07   |

注:1)表中  $f_1 \sim f_3$  分别表示各工况前 3 阶实测频率,  $\Delta f_1 \sim \Delta f_3$  表示各损伤工况前 3 阶实测频率相对无损状态实测频率的变化率;2)双损伤工况中前一个百分数代表 7 # 单元的损伤程度,后一个百分数代表 9 # 单元的损伤程度。

为验证采用附加质量模拟结构损伤试验方法的正确性,首先建立该简支梁初始有限元模型,再根据表 2 中梁无损状态的前 3 阶实测频率对初始有限元模型进行修正,得到计算频率与实测频率吻合的简支梁精细有限元模型,采用单元抗弯刚度 EI 降低的方法设定模拟损伤,最后分别对各种模拟损伤工况进行特征值分析,前 3 阶频率计算结果如表 3 所示。

表 3 简支梁部分工况有限元计算频率值

Tab. 3 Computational frequencies under partial damage simulation conditions of the experiment beam

| 计算<br>频率<br>阶次  | 无损<br>状态 | 有限元仿真模拟结构损伤 |        |        |           |        |        |                |           |           |           |
|-----------------|----------|-------------|--------|--------|-----------|--------|--------|----------------|-----------|-----------|-----------|
|                 |          | 7 # 单元单损伤   |        |        | 9 # 单元单损伤 |        |        | 7 # -9 # 单元双损伤 |           |           |           |
|                 |          | 10 %        | 20 %   | 30 %   | 10 %      | 20 %   | 30 %   | 10 %-10 %      | 10 %-30 % | 30 %-10 % | 30 %-30 % |
| $f_1$           | 23.13    | 23.03       | 22.92  | 22.77  | 23.01     | 22.86  | 22.67  | 22.91          | 22.59     | 22.66     | 22.34     |
| $f_2$           | 88.91    | 88.53       | 88.07  | 87.50  | 88.80     | 88.67  | 88.50  | 88.42          | 88.14     | 87.41     | 87.16     |
| $f_3$           | 175.86   | 175.80      | 175.73 | 175.63 | 175.31    | 174.64 | 173.81 | 175.25         | 173.75    | 175.08    | 173.57    |
| $\triangle f_1$ | 0        | -0.40       | -0.89  | -1.52  | -0.52     | -1.16  | -1.96  | -0.91          | -2.34     | -2.02     | -3.39     |
| $\triangle f_2$ | 0        | -0.43       | -0.94  | -1.58  | -0.12     | -0.27  | -0.46  | -0.54          | -0.86     | -1.69     | -1.97     |
| $\triangle f_3$ | 0        | -0.03       | -0.07  | -0.13  | -0.31     | -0.69  | -1.16  | -0.35          | -1.20     | -0.44     | -1.30     |

注:1)表中  $f_1 \sim f_3$  分别表示各工况前 3 阶有限元计算频率值,  $\triangle f_1 \sim \triangle f_3$  表示各损伤工况前 3 阶计算频率相对无损状态计算频率的变化率;2)双损伤工况中前一个百分数代表 7 # 单元的损伤程度,后一个百分数代表 9 # 单元的损伤程度。

对比表 2、表 3 中各损伤工况对应的频率值以及频率变化率,可见采用附加质量法能够准确地模拟出各种预设损伤工况,其中采用附加沙袋法的模拟结果更加可靠,而悬挂质量法由于挂盘为刚性结构,在附加质量的同时也产生了一定程度的附加刚度,且挂盘在试验过程中容易晃动,因此损伤模拟效果不如附加沙袋法好。试验结果验证了本文提出的采用附加质量模拟结构损伤进行结构识别试验的正确性,其中附加沙袋法是一种比较准确、可靠的附加质量试验方法,由附加沙袋法模拟的梁构件各种单损伤、双损伤的试验方法完全可以替代传统的梁构件局部单元截面切口的破损处理方法。

5 结束语

(1) 提出了一种在试验构件上增设附加质量来模拟结构发生损伤的结构损伤识别试验方法,以梁构件为例,给出了附加沙袋法、悬挂质量法两种附加质量模拟结构损伤的具体试验方案;

(2) 根据结构无阻尼自由振动的动力学特征方程,证明了附加质量与刚度降低都可等效模拟结构的损伤;

(3) 进行了简支梁附加质量模拟结构损伤的动测试验,完成了附加沙袋法及悬挂质量法的梁构件单损伤、双损伤共计 42 种模拟损伤工况的动态测试,将各工况通过模态分析得到的前 3 阶实测频率对应工况的有限元计算频率进行对比,得出了附加沙袋法是一种准确、可靠的结构损伤试验方法;仅采用同一个试验构件,可模拟出不同部位、不同程度的多种损伤,从而大大降低了试验费用,提高了试验效率;

(4) 本文提出的采用附加质量模拟结构损伤的试验方法为结构健康诊断与损伤识别的验证性试验研究开拓了一种思路,可供验证采用动力特性参数进行结构损伤识别理论方法正确性所用。

参考文献:

[1] Salawu O S. Detection of structural damage through changes in frequency: a review [J]. Engineering Structures, 1997, 19(9): 718—723.

[2] Doebling S W, Farrar C R, Prime M B. A summary review of vibration-based damage identification methods [J]. Shock and Vibration Digest, 1998, 30(2): 91—105.

[3] Fabrizio V, Danilo C. Damage detection in beam structures based on frequency measurements [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(7): 761—768.

[4] Shi Z Y, Law S S, Zhang L M. Structural damage detection from elemental model strain energy change [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(12): 1216—1223.

- [5] Ren W X, De Roeck G. Structural damage identification using modal data I: simulation verification [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2002, 128(1): 87—95.
- [6] Li Zhijun, Li Aiqun, Han Xiaolin. Operational modal identification of suspension bridge based on structural health monitoring system [J]. Journal of Southeast University(English Edition), 2009, 125(1): 104—107.
- [7] 李忠献, 刘永光. 基于遗传神经网络与模态应变能的斜裂缝两阶段诊断方法 [J]. 工程力学, 2008, 25(2): 9—16, 39 (Li Zhongxian, Liu Yongguang. A two-stage method for detecting diagonal cracks based on genetic neural network and modal strain energy [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(2): 9—16, 39 (in Chinese))
- [8] 杜思义, 殷学纲, 陈淮. 基于频率二阶摄动的结构损伤识别方法 [J]. 应用力学学报, 2006, 23(4): 613—617 (Du Siyi, Yin Xuegang, Chen Huai. Damage Detection Method Based on 2nd Order Frequency Perturbation [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2006, 23(4): 613—617 (in Chinese))
- [9] 王博, 何伟, 李静斌. 残余力向量法在结构损伤识别中的应用研究进展 [J]. 实验力学, 2010, 25(1): 47—54 (Wang Bo, He Wei, Li Jingbin. Development and application of residual force vector method in structure damage identification [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(1): 47—54 (in Chinese))
- [10] Sohn H, Farrar C R, Hemez F M. A review of structural health monitoring literature: 1996 ~ 2001 [R]. Technical Report LA-13976-MS, Los Alamos national laboratory, Los Alamos, NM, 2003.
- [11] 孙增寿, 林友勤, 任伟新. 基于小波能量分布向量的结构损伤识别 [J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(5): 103—109 (Sun Zengshou, Lin Youqin, Ren Weixin. Structural damage identification based on wavelet energy distribution vectors [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(5): 103—109 (in Chinese))
- [12] 赵启林, 李志刚, 陈浩森. 混凝土桥梁损伤识别的理论与试验研究 [J]. 工程力学, 2006, 23(S1): 136—141 (Zhao Qilin, Li Zhigang, Chen Haosen. Theoretical and experimental investigations on damage identification of concrete bridges [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(S1): 136—141 (in Chinese))

## On a New Experimental Method for Structural Damage Identification

CHEN Huai<sup>1</sup>, LI Jing-bin<sup>1</sup>, YIN Xue-gang<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Henan 450001, China;

2. Department of Engineering Mechanics, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** A new experimental method by adding additional mass on the tested components to simulate structural damage is proposed, and the equivalence relationship between mass addition and stiffness degradation is proved in this paper. Taking a simply supported beam component as an example, two kinds of additional mass experimental method were proposed, one is the adding sandbag method, the other one is the hanging mass method. Furthermore, steel simply supported beam dynamic testing under various conditions of adding mass to simulate structural damage was carried out. Experimental results validate this method, and it is concluded that structural damage at different locations and with different degrees of beam component can be simulated by adding sandbags on it. This experiment provides a method of simulating structural damage for structural health diagnosis and damage identification. Using this method, only one test component is needed, and the operation procedure is simple and convenient. Its maximum advantage is avoiding the randomness of different tested components and has great practical value.

**Keywords:** damage identification; experiment; added mass