

# 基于损伤柔度曲率矩阵的人行天桥损伤识别研究

周奎, 徐晨光, 严烨, 陈思宇

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

**摘要:** 为了研究基于损伤柔度曲率矩阵的损伤识别方法在人行天桥上的适用性, 将此方法用于人行天桥模型和实际工程的桥梁结构分析中。通过对人行天桥简支钢箱梁损伤前的完好结构及各类损伤工况下的损伤结构进行数值模拟, 得到各工况下的这一损伤识别指标的损伤识别性能, 对其进行分析。之后将此方法用于实际的人行天桥动力模态试验中, 在随机环境激励的情况下使用动态信号采集分析系统对人行天桥进行动力模态试验。研究发现, 损伤柔度曲率矩阵这一指标对于人行天桥具有良好的损伤识别性能, 并且其抗噪声能力、微小损伤识别能力以及对于实际工程的适用性能皆有良好表现。

**关键词:** 人行天桥; 损伤识别; 数值模拟; 损伤柔度曲率; 动力模态试验

中图分类号: U 448.11

文献标志码: A

## Damage Identification of Pedestrian Bridge Based on Damage Flexibility Curvature Matrix

ZHOU Kui, XU Chenguang, YAN Ye, CHEN Siyu

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** In order to explore the damage identification of the pedestrian bridge, the identification method based on the damage flexibility curvature matrix was applied to analyze a pedestrian bridge model and a real engineering bridge. The performance of damage identification index under different working conditions was investigated by numerical simulations on the intact and damage structure of the steel box girder. Then, the method was used in the actual dynamic modal test. Under the circumstance of random environment excitation, a dynamic signal acquisition and analysis system was used to perform dynamic modal tests on the pedestrian bridge. It is found that the index has good damage identification performance for pedestrian bridges. It performs well with high anti-noise ability, high small damage identification ability and good applicable performance on practical engineering projects.

**Keywords:** pedestrian bridge; damage identification; numerical simulation; damage flexibility curvature; dynamic modal test

在结构的模态信息中，固有频率是最容易获得的，基于结构固有频率变化的损伤识别研究始于1969年，由Lifshitz等<sup>[1]</sup>提出通过识别结构在损伤前后的固有频率变化情况进行结构的损伤识别。在工程实践中，对于一些大型复杂结构仅能较精确地测得其低阶的模态参数<sup>[2]</sup>，而柔度矩阵与固有频率的平方成反比，因此只需测得结构的前几阶模态参数即可得到精度较好的柔度矩阵。基于柔度矩阵的这一特性，许多学者以柔度作为损伤指标对结构的损伤识别问题进行了研究<sup>[3-8]</sup>。Raghavendrchar等<sup>[9]</sup>采用了固有频率法、模态振型法以及柔度法对一座三跨混凝土桥进行了损伤识别，对比各方法的识别效果，得到基于柔度法的损伤识别指标的灵敏性明显高于基于固有频率以及模态振型的损伤识别指标的结论。Zhao等<sup>[10]</sup>通过类似的对比研究也证实了基于柔度法的损伤识别指标其敏感性远高于其他两种指标。目前尚无统一的基于柔度法的损伤识别参数能有效地对实际工程结构进行损伤位置和损伤程度的诊断。因此，对于实际桥梁工程结构<sup>[11]</sup>，发展更为敏感且能准确测量的基于柔度法的损伤识别指标<sup>[12-14]</sup>，对于桥梁结构的健康检测有着十分重要的理论和现实意义。

本文采用一种基于柔度法的损伤识别指标：损伤柔度曲率<sup>[15]</sup>，对人行天桥进行多种损伤工况下的数值模拟及损伤识别分析(单损伤、多损伤、轻微损伤以及随机噪声影响等工况)<sup>[16]</sup>，检验这种损伤识别指标的有效性、灵敏性及抗噪性能。

1 损伤识别指标

1.1 损伤柔度曲率( $\varepsilon_{\text{AFCR}}$ )

根据结构损伤后的模态参数得到结构的柔度曲率<sup>[17]</sup>，通过柔度曲率矩阵减去其转置矩阵的绝对值得到相对损伤柔度曲率矩阵，利用其行平均值作为损伤识别指标，具体计算步骤如下所示。

a. 对柔度矩阵 $\mathbf{F}$ 按行进行差分，得到的矩阵记为 $\mathbf{CF}$ ，其元素 $CF_{ij}$ 示为

$$CF_{ij} = \frac{\{2l_{(i+1)i} [F_{(i+1)j} - F_{ij}] - 2l_{(i-1)i} [F_{ij} - F_{(i-1)j}]\}}{[l_{(i+1)i}l_{(i-1)i}l_{(i+1)(i-1)}]} \quad (1)$$

式中： $F_{ij}$ 为柔度差矩阵第*i*行第*j*列的元素； $l_{(i-1)i}$ 、 $l_{(i+1)i}$ 、 $l_{(i+1)(i-1)}$ 分别为*i*-1和*i*、*i*+1和*i*、*i*+1和*i*-1之间的距离。

b. 用 $\mathbf{CF}$ 减去其转置矩阵 $\mathbf{CF}^T$ 的绝对值得到新矩阵，记为相对损伤柔度曲率矩阵 $\omega_{\text{FCR}}$ 。

$$\omega_{\text{FCR}} = |\mathbf{CF} - \mathbf{CF}^T| \quad (2)$$

c.  $\omega_{\text{FCR}}$ 按行均值计算得到相对损伤柔度曲率 $\varepsilon_{\text{AFCR}}$ 为

$$\varepsilon_{\text{AFCR}}(i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \omega_{\text{FCR}_j}(i) \quad (3)$$

式中，*N*为结构自由度。

1.2 随机噪声

为了检验上述指标的抗噪性能，根据文献<sup>[18]</sup>的方法，在数值模拟分析得到的振型 $\phi_i$ 和固有频率 $\omega_i$ 引入随机噪声：

$$\omega'_i = \omega_i [1 + \eta \text{rand}(-1, 1)] \quad (4)$$

$$\phi'_i = \phi_i [1 + \beta \text{rand}(-1, 1)] + \gamma \text{rms}(\phi_i) \text{rand}(-1, 1) \quad (5)$$

式中： $\eta$ 为频率噪声水平； $\beta$ 、 $\gamma$ 为振型噪声水平，在之后的数值模拟分析时，考虑到实测数据中的模态频率的精度高于模态振型的精度，因此取噪声水平 $\eta=0.03$ ， $(\beta, \gamma)=(0.05, 0.05)$ ； $\omega'_i$ 和 $\omega_i$ 分别为第*i*阶频率的计算值和模拟值； $\phi'_i$ 和 $\phi_i$ 分别为第*i*阶振型的计算值和模拟值； $\text{rand}(-1, 1)$ 为在-1和1之间均匀分布的随机数； $\text{rms}(\phi_i)$ 为 $\phi_i$ 的均方根。

2 数值建模

2.1 人行简支钢箱梁桥的分析模型

本文研究对象为连接上海理工大学南北两个校区的上海理工大学人行天桥。用有限元分析软件MIDAS Civil对人行天桥主梁进行建模分析，主梁跨径25 m，截面尺寸如图1所示。主梁跨度较大且沿长度方向上截面较为规则，两端为简支约束，采用Q345B钢全焊接而成。材料的弹性模量为 $E = 206 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ ，泊松比为 $\nu = 0.3$ ，密度为 $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ 。将此箱梁离散为25个单元，26个节点，有限元模型及其单元节点划分示意图如图2~4所示。

实际桥梁结构发生损伤会引起结构刚度的降低，对结构质量产生的影响较小<sup>[19]</sup>。为了验证基于损伤柔度曲率矩阵的方法在理论上是否能运用于该类结构，同时为了之后对于实际结构的裂纹局部损伤等情况的研究打下理论基础，在数值模拟分析中，假定结构单元的损伤仅引起单元刚度

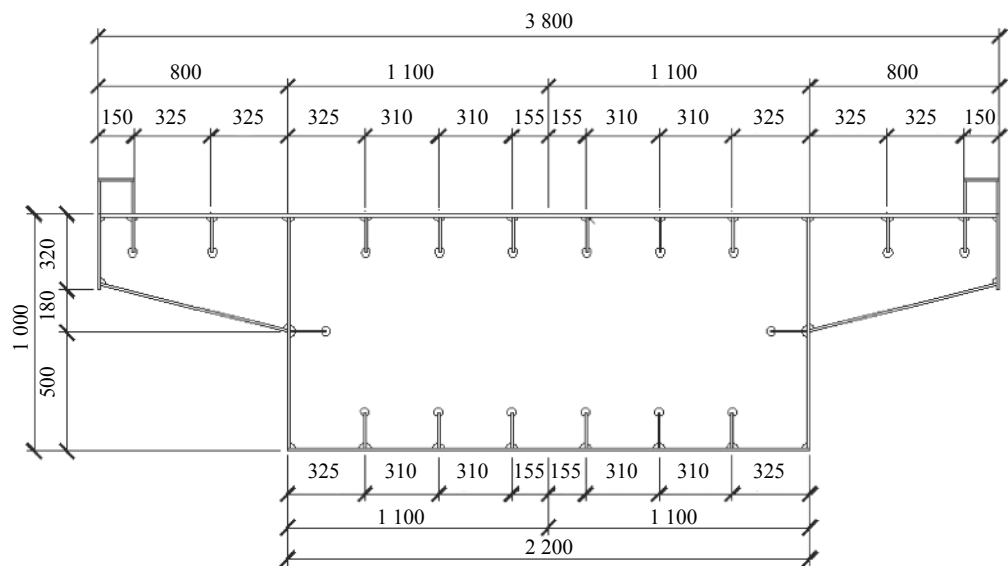


图 1 箱梁横截面图  
Fig.1 Box girder cross section

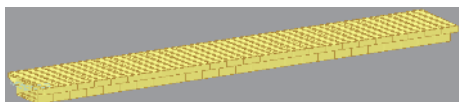


图 2 主梁有限元模型  
Fig. 2 Finite element model of the main girder

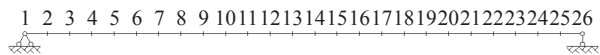


图 3 节点编号示意图  
Fig. 3 Node number diagram

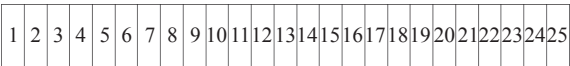


图 4 单元编号示意图  
Fig. 4 Unit number diagram

的下降, 对单元质量不产生影响, 单元不同程度的损伤则通过单元弹性模量  $E$  相对应程度的降低来模拟。

2.2 不同程度的损伤工况

工况 1: 跨中附近处损伤。取跨中附近单元 15 刚度分别下降 20%, 40%, 60%, 如图 5 所示。

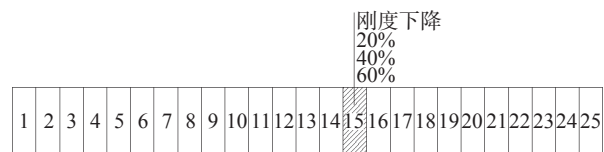


图 5 跨中附近处不同程度损伤示意图  
Fig.5 Various degrees of damage at the place nearby the midspan

工况 2: 支座附近处损伤。取支座附近单元 3 刚度分别下降 20%, 40%, 60%, 如图 6 所示。

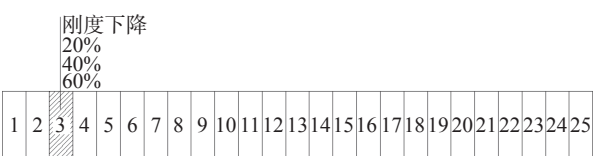


图 6 支座附近处不同程度损伤示意图  
Fig.6 Various degrees of damage at the place nearby the bracing

工况 3: 多处轻微损伤的情况。取单元 5, 10, 16, 21 刚度分别下降 5%, 用  $\alpha_5$ ,  $\alpha_{10}$ ,  $\alpha_{16}$ ,  $\alpha_{21}$  表示, 如图 7 所示。

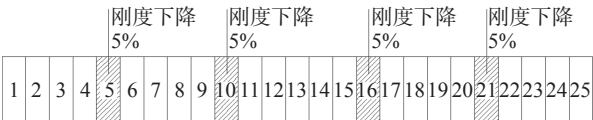


图 7 轻微损伤工况示意图  
Fig.7 Minor damage conditions

3 分析结果

通过 MIDAS Civil 对人行天桥简支钢箱梁损伤前的完好结构及各损伤工况后的结构进行数值模拟, 提取结构损伤前后的前三阶固有频率和振型, 根据式(1)~(3)采用 Matlab 编制程序进行分析计算, 绘制在无噪声影响下和有随机噪声影响下的基于损伤柔度曲率  $\varepsilon_{AFCR}$  随节点变化的曲线, 曲线结果如下。

工况 1: 不考虑噪声影响时基于损伤柔度曲率  $\varepsilon_{AFCR}$  随节点变化的曲线如图 8(a) 所示, 考虑随机噪声影响时的变化曲线如图 8(b) 所示。

工况 2: 不考虑噪声影响时基于损伤柔度曲率矩阵的损伤识别指标  $\varepsilon_{\text{AFCR}}$  随节点变化的曲线如图 9(a)所示, 考虑随机噪声影响时的变化曲线如图 9(b)所示。

工况 3: 不考虑噪声影响时基于损伤柔度曲率矩阵的损伤识别指标  $\varepsilon_{\text{AFCR}}$  随节点变化的曲线如图 10(a)所示, 考虑随机噪声影响时的变化曲线如图 10(b)所示。

由图 8~10 可见: 在各工况下, 随机噪声对  $\varepsilon_{\text{AFCR}}$  值有一定影响; 但无论有无随机噪声的影响, 曲线均在受损单元处产生了明显的突变(如图 8 的 15 单元; 图 9 的 3 单元; 图 10 的 5 单元、10 单元、16 单元及 21 单元), 并且曲线峰值随损伤程度的增加而增加。因此根据  $\varepsilon_{\text{AFCR}}$  随节点变化的曲线图可有效地判定出损伤位置, 并且可以通过  $\varepsilon_{\text{AFCR}}$  值来判断结构单元的损伤程度。

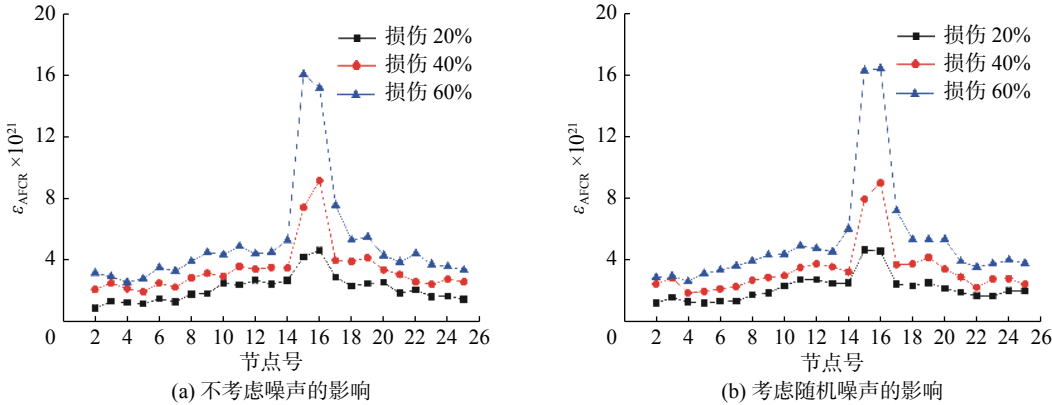


图 8 工况 1 的损伤柔度曲率矩阵曲线

Fig.8 Damage flexibility curvature matrix curve due in case 1

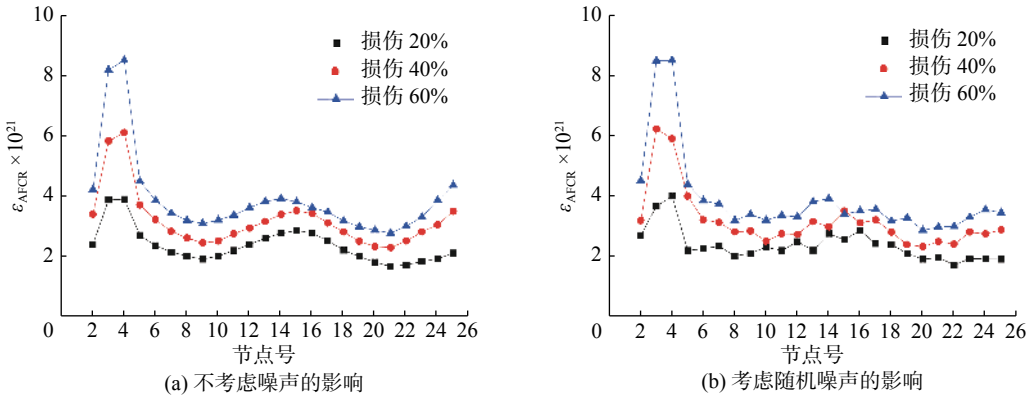


图 9 工况 2 的损伤柔度曲率矩阵曲线

Fig.9 Damage flexibility curvature matrix curve due in case 2

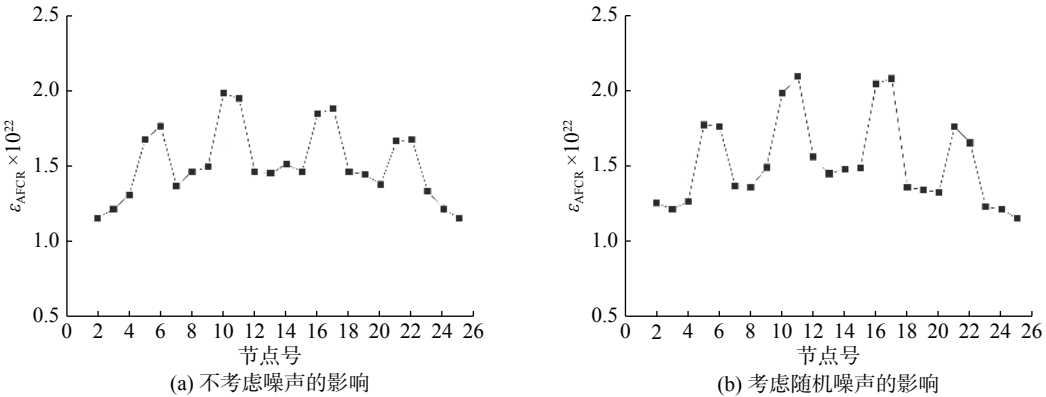


图 10 工况 3 的损伤柔度曲率矩阵曲线

Fig.10 Damage flexibility curvature matrix curve due in case 3



## 4 动力模态试验

### 4.1 基于环境激励下的动力模态试验

试验模态分析方法可分为频响函数法(简称测力法)和环境激励法(简称不测力法)。上海理工大学人行天桥是连接上海理工大学南北校区的主要人行通道,为了不影响人行天桥的正常通行,本试验采取的是由桥下重型卡车的频繁往来以及桥上行人的走动来进行环境随机激励。在随机环境激励的情况下使用 DH5910 动态信号采集分析系统对人行天桥进行动力模态试验。试验时通过该仪器设备采集人行天桥在环境激励下的动力响应信号,将测得的数据使用 DHDAS 实验模态分析系统进行数据处理,即可得到人行天桥的实测固有频率、模态振型以及阻尼等结构动力特征参数,进而可构建结构的柔度矩阵。试验现场照片如图 11 所示。

### 4.2 试验装置

动力模态试验的装置有: DH610 磁电式振动传感器; 891-II 型拾振器; DH5910 坚固型动态数据记录仪; 连接线缆; 锂电池; 无线信号发射器; 笔记本电脑; DHDAS 动态信号采集分析系统。



图 11 模态试验现场照片  
Fig. 11 Modal test scene photos

### 4.3 试验过程与结果

a. 测点布置: 本次试验选取 3×7, 共 21 个测点。两端距支座 2.5 m 处各布置一组测点, 中间段每隔 3 m 布置一组测点, 一组由 3 个测点组成(分别位于桥面两侧距边缘 500 mm 处, 即距栏杆支座边缘 350 mm)。测点具体布置情况如图 12 所示。

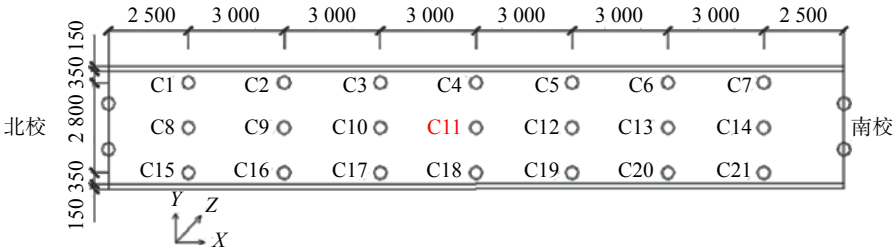


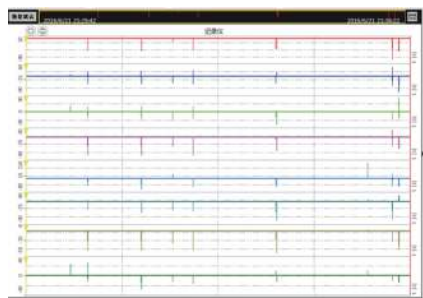
图 12 测点布置示意图  
Fig.12 Measuring point layout diagram

b. 数据采集: 在随机环境激励的情况下进行数据采集, 每一次的采集时间为 10 min。采集到的振动加速度(速度)时程曲线如图 13 所示。

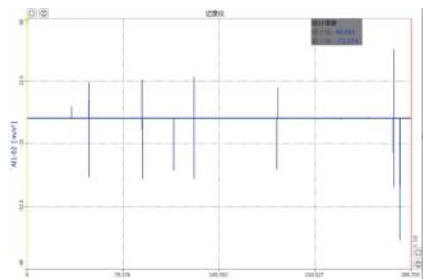
c. 数据处理: 动力模态试验的数据处理是通过 DHDAS 动态信号采集分析系统里的模态分析模块进行处理的, 在软件内的模态分析板块里建立天桥主梁模型, 并根据试验现场测点的布置情况编辑测点信息, 将现场所采集到的振动响应数据导入模型中, 不测力法算法模块中选择“Op.poly1scf”算法模块; 谱分析, 如图 14 所示, 分析点数 1 024,

频率分辨率 0.977 Hz; 选择频段: 根据不同测点的品相函数, 移动 3 根光标确定频率范围(节点数大于 3 为佳), 如图 15 所示; 稳定图计算: 在计算得到的稳态图上选择对应极点, 如图 16 所示, 然后进行振型计算。

由于试验仪器存在误差以及测试周边环境影响等因素的干扰, 人行天桥的低阶模态参数易于取得并且比较精确, 而高阶的模态参数不易取得且误差较大。因此采用试验结果的前三阶模态参数(固有频率 $f$ 、模态振型等)作为上海理工大学人



(a) 全部通道时程曲线



(b) 某一通道放大后的详细时程曲线信息

图 13 加速度（速度）时程曲线

Fig. 13 Acceleration ( speed ) time history curve

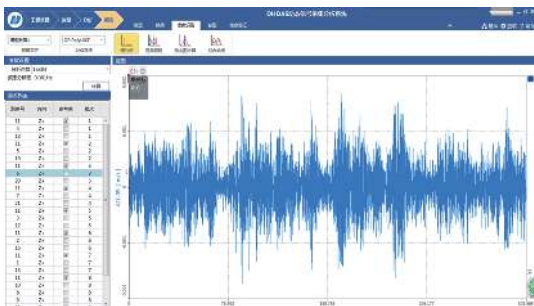


图 14 谱分析

Fig. 14 Spectrum Analysis

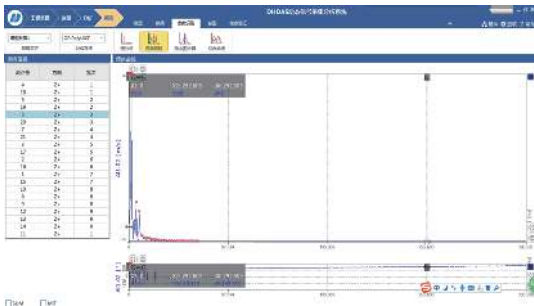


图 15 选择频段

Fig. 15 Frequency band selection

行天桥的实测模态参数(固有频率、模态振型等), 实测的天桥一阶、二阶、三阶振型图如图 17 所示。

d. 基于实测数据的人行天桥损伤识别。

采取中间一行测点(即测点 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14)所拾取到的动力响应数据, 分析得出人行天桥主梁结构的固有频率和模态振型, 作为

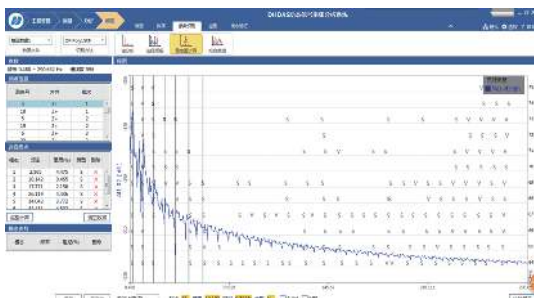
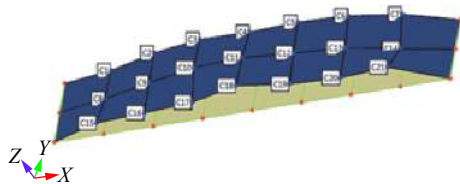


图 16 稳定图计算

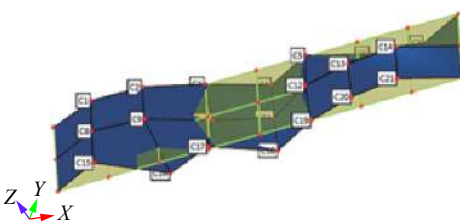
Fig. 16 Stability diagram calculation



(a) $f=2.565\text{ Hz}$



(b) $f=10.388\text{ Hz}$



(c) $f=18.152\text{ Hz}$

图 17 实测振型图

Fig. 17 Measured vibration mode

进行损伤识别的实测结构模态参数。根据第一节里所介绍的基于损伤柔度曲率损伤识别的公式, 将实测的动力响应信息经过 DHDAS 动态信号采集分析系统分析得到的前三阶固有频率和模态振型代入上述公式进行计算分析, 得到现阶段人行天桥主梁的健康状况如图 18 所示。

由图 18 可以看出, 实测的曲线并没有出现明显的突变和峰值, 由此得出现阶段该人行天桥并未发生明显的损伤状况。因此, 此时所监测到的人行天桥主梁结构的模态振型和固有频率也可作为结构的健康状态下的模态参数。在以后定期地对上海理工大学人行天桥进行结构健康监测时, 可将此次动力模态试验所测得的模态信息作为结构无损状态下的模态信息。

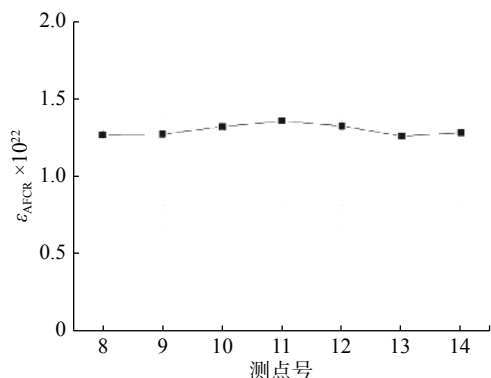


图 18 实测数据的损伤柔度曲率曲线

Fig. 18 Measured damage flexibility curvature curve

## 5 结 论

通过对人行简支钢箱梁天桥进行多种损伤工况下的数值模拟,得到各工况下基于损伤柔度曲率矩阵的损伤识别指标的使用性能,对其进行分析,结果表明:

a. 无论是对跨中附近或是支座附近单损伤工况,还是多处轻微损伤工况下,曲线均在损伤位置处发生显著的突变,可以清晰地识别出单元发生了损伤。

b. 损伤指标的突变峰值随着损伤程度的增加而增加,故对结构的损伤程度也能进行很好的定性判断。但是对于轻微损伤发生在多处位置时,损伤指标对于损伤程度的判断不明显。

c. 利用损伤指标对结构进行损伤识别时,随机噪声对损伤位置以及损伤程度的判断影响不大。

d. 通过 DHDAS 实验模态分析系统得到人行天桥主梁的损伤识别曲线,得出现阶段上海理工大学人行天桥主梁处于健康的状态;实际结构中,桥梁产生裂纹损伤时,该方法的适用性有待进一步检验。

### 参考文献:

- [1] LIFSHITZ J M, ROTEM A. Determination of reinforcement unbonding of composites by a vibration technique[J]. *Journal of Composite Materials*, 1969, 3(3): 412–423.
- [2] 袁明,贺国京. 基于模态应变能的结构损伤检测方法研究[J]. *铁道学报*, 2002, 24(2): 92–94.
- [3] 杨秋伟,刘济科. 工程结构损伤识别的柔度方法研究进

展[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(12): 147–153.

- [4] PANDEY A K, BISWAS M. Experimental verification of flexibility difference method for locating damage in structures[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1995, 184(2): 311–328.
- [5] DENOYER K K, PETERSON L D. Method for structural model update using dynamically measured static flexibility matrices[J]. *AIAA Journal*, 1997, 35(2): 362–368.
- [6] TOKSOY T, AKTAN A E. Bridge-condition assessment by modal flexibility[J]. *Experimental Mechanics*, 1994, 34(3): 271–278.
- [7] ZHANG Z, AKTAN A E. The damage indices for constructed facilities[C]//Proceedings of the 13th International Modal Analysis Conference. Bethel, USA: Society of Experimental Mechanics, 1995: 1520–1529.
- [8] 孙国,顾元宪. 连续梁结构损伤识别的改进柔度阵方法[J]. *工程力学*, 2003, 20(4): 50–54, 198.
- [9] RAGHAVENDRACHAR M, AKTAN A E. Flexibility by multireference impact testing for bridge diagnostics[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1992, 118(8): 2186–2203.
- [10] ZHAO J, DEWOLF J T. Sensitivity study for vibrational parameters used in damage detection[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1999, 125(4): 410–416.
- [11] 姜宏钰. 基于整体柔度系数既有梁桥监测技术研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2011.
- [12] 徐典,杨佑发. 基于柔度曲率矩阵差的损伤结构识别方法[J]. *沈阳工业大学学报*, 2012, 34(6): 715–720.
- [13] 李永梅,周锡元,高向宇,等. 柔度曲率法对梁结构的损伤诊断[J]. *北京工业大学学报*, 2008, 34(11): 1173–1178.
- [14] 周奎,申美玲. 温度影响下基于曲率模态的梁式桥损伤识别[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(3): 179–185.
- [15] 彭念,张永兴,陈建功. 基于损伤柔度曲率矩阵的结构损伤识别新方法[J]. *工业建筑*, 2013, 43(8): 15–18.
- [16] 陈思宇. 基于柔度法的某人行简支钢箱梁桥损伤识别研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2017.
- [17] PANDEY A K, BISWAS M. Damage detection in structures using changes in flexibility[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1994, 169(1): 3–17.
- [18] 张华,闫贵平. 基于柔度矩阵的结构损伤识别方法[J]. *铁道建筑*, 2003(6): 62–63.
- [19] CAWLEY P, ADAMS R D. The location of defects in structures from measurements of natural frequencies[J]. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 1979, 14(2): 49–57.

(编辑: 丁红艺)