

基于子构件曲率模态变化的桥梁损伤识别研究

吴多¹,刘来君¹,秦煜²,张筱雨¹

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064 ; 2. 中铁二院重庆勘察设计研究院有限责任公司, 重庆 400023)

摘要 目的 为保障桥梁运营安全,提高健康监测水平,对桥梁进行损伤识别研究;利用曲率模态曲线变化规律,提出一种基于桥梁子构件的识别方法.方法 基于桥梁子构件分解技术,以一座梁式组合桥为例,设置不同损伤工况,根据组成桥梁整体各构件的特点将桥梁分解为较简单的构件进行损伤定位与程度识别,以振动分析中曲率模态参数的研究为基础,对桥梁在不同损伤位置、程度下曲率模态曲线的变化规律进行分析.结果 结合桥梁损伤前后的曲率模态曲线变化,采用提出的拟合公式方法,不仅可进行损伤定位,对损伤程度进行准确识别,还可有效地提高损伤识别的效果.分析不同单元划分、截面形式等因素对识别效果的影响.结论 桥梁子构件的识别方法可对实际桥梁健康进行监测,一定程度上解决了传统的曲率模态方法不能得到准确的损伤程度这一缺陷.

关键词 桥梁工程;损伤识别;子构件;曲率模态

中图分类号 TU375.1 文献标志码 A

Study on the Bridge Damage Identification Based on the Curvature Mode Change of the Sub-components

WU Duo¹, LIU Laijun¹, QIN Yu², ZHANG Xiaoyu¹

(1. School of highway, Chang'an University, Xi'an, 710064, China; 2. CREEC (Chongqing) Survey, Design and Research Co. Ltd, Chongqing, China, 400023)

Abstract: To ensure the safety of bridge operation and improve the level of health monitoring, the damage identification of bridges was studied, and through utilizing the variation rule of curvature modal curve, an identification method based on the bridge sub-components was put forward. A beam composite bridge was taken as an example and different damage conditions were set for research and analysis. In virtue of the bridge sub-component decomposition technology, the bridge was decomposed into simple components for damage location and degree identification according to the characteristics of all the bridge components. Based on the study of the curvature modal parameters in the vibration analysis, the variation rule of curvature modal curve at different damage locations and degrees was analyzed thoroughly. The research results show that combining the fit-

收稿日期:2017-06-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51408083);陕西省交通运输厅交通科研项目(13-25K);云南省交通运输厅科技项目(云交科2013(A)02)

作者简介:吴多(1990—),男,博士研究生,主要从事土木结构健康监测方面研究.

ting formula method proposed in this paper with the change of curvature modal curve before and after bridge damage, not only the damage location but also the damage degree could be accurately identified and the damage identification effect could be substantially improved. The influences of different element divisions and cross-sectional forms on the identification effect were analyzed. The identification method of the bridge sub-components will provide reference for the research of actual bridge health monitoring and, to a certain extent, make up for the defect that the traditional curvature modal method can not identify accurate damage degree.

Key words: bridge engineering; damage identification; sub-components; curvature mode

桥梁损伤识别是桥梁健康监测的重要组成部分,是桥梁的正常运营的安全保障.近年来,国内外越来越多的学者针对其进行研究.许多桥梁在施工和运营阶段都相继设置了各类短期和长期的监控设备,用来实时掌握桥梁的运行情况^[1-3].但现有的方法往往对简单结构的损伤识别具有很好的适用性,但应用于跨度大、截面形式复杂多变的大中型桥梁进行整体损伤识别往往得不到理想的结果^[4].因此,笔者提出一种基于桥梁子构件的识别方法,根据组成桥梁整体各构件的特点将桥梁分解为较简单的构件进行损伤定位与程度识别,以振动分析中曲率模态参数的研究为基础,对桥梁在不同损伤位置、程度下曲率模态曲线的变化规律进行深入分析,在一定程度上解决了传统的曲率模态方法不能得到准确的损伤程度这一缺陷.

1 桥梁结构的子构件识别方法

1.1 现有损伤识别方法

桥梁由上部结构、下部结构、墩台基础以及其他附属设施等部分组成.目前对桥梁进行损伤识别的主要分为理论探索^[5-7]、试验验证^[8-9]和实桥的健康监测(BHM)^[10-12]等.

理论探索:主要是将桥梁跨度大、墩柱高和截面小的桥梁简化为伯努利-欧拉梁进行分析,对梁体采用预先降低刚度、弹性模量或减小单元截面的方法进行梁体损伤工况的模拟,采用各类方法对其识别.

试验验证:主要是采用大型拟动力、动力

设备(加载机、振动台)对现有各类桥梁的缩尺模型进行试验分析,对桥梁预设不同程度、不同部位的损伤工况,模拟其在自然条件、地震作用等各类外界环境影响下的受力变化和动力响应.根据试验结果进行理论验证以及公式拟合,虽然与实际模型的贴合度较好,但由于试验工况设置的不完整、成本昂贵、理论不成熟等条件限制,现阶段基于试验验证的桥梁损伤识别方面的研究具有一定的迟滞性.

实桥的健康监测:由各类信号检测设备、高性能传感器和传输设备等组成的实时监测系统将桥梁实时状态传输至监测控制平台,利用动态监测软件对各类数据进行实时监测、定期统计分析,实时掌握桥梁结构的实际状态.实桥的健康监测可基本表征桥梁的实际损伤状态,但基于实桥的安全运营,通常桥梁在接近损伤阶段,相关部门就采取各类维修、加固措施对桥梁进行处理.基于其保守性,无法得到桥梁的较大损伤工况下各类参数的真实响应.

1.2 子构件体系的识别方法

由于桥梁结构的特殊性,采用现有的识别方法对其进行识别,均具有一定的局限性和不足.理论的不成熟是阻碍损伤识别这一研究方向发展的障碍.桥梁子构件损伤方法的基本思想^[13]是:根据不同桥梁类型的特点,遵循某些假定条件,将完整的大型复杂桥梁,人为分解为若干个基本子构件(见图1).首先对组成自由度更少、结构形状更加规则的各子构件进行损伤识别,然后将各子构件

损伤结果进行累计,即可得到全桥整体的损伤情况。

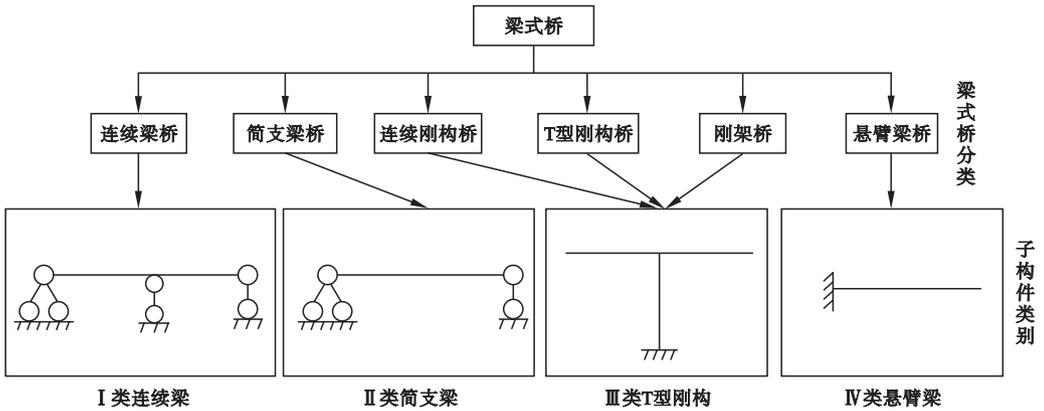


图 1 梁式桥结构分解

Fig. 1 Structure decomposition of beam bridges

2 损伤子结构的曲率模态方法

振动模态技术因其以较好的敏感性和易获得性被广泛应用于桥梁健康监测的各个方面^[14-16]. 在损伤识别中,当桥梁的某一位置出现损伤时,各部分的模态会产生不同的变化,特别是损伤位置周围会发生较大变化.通过对监测系统测得的桥梁各类模态参数处理分析,就可得到桥梁真实的状态信息.由于监测技术发展的局限,现阶段桥梁监测项目一般只包含频率、位移和弯曲模态等整体结构参数的监测,依靠这类模态参数,往往只能得到桥梁整体模态的变化趋势,却难以得到桥梁的局部模态信息.因此针对桥梁局部特性参数的敏感性,提出了应变模态能、曲率模态等研究方法^[17-18].其中曲率模态可较敏感地反映出桥梁局部特性变化,并且通过各阶振型对应的位移模态可得到桥梁准确的曲率模态,相比频率和振型,其敏感性得到了大幅度提高,因此在桥梁健康监测中有较好的应用前景.笔者提出的桥梁子结构体系,可较好地贴合现有的曲率模态方法.

2.1 梁体的曲率模态理论

梁体的位移模态是模态分析的最突出的参数之一,也是获取曲率模态参数的重要方

法之一^[19-20].

材料力学理论中规定微段梁的弯曲曲率为

$$\rho = \frac{M}{EI} \quad (1)$$

式中: ρ 为曲率; M 为结构弯矩; EI 为梁体抗弯刚度.

梁体振动的微分方程:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI(x) \left(\frac{\partial v(x,t)}{\partial x^2} + a_1 \frac{\partial v^3(x,t)}{\partial x^2 \partial t} \right) \right] + m(x) \frac{\partial v^2(x,t)}{\partial x^2} + c(x) \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} = f(x,t) \quad (2)$$

式中: $v(x,t)$ 为 t 时刻梁轴线任一截面 x 处的横向振动位移; a_1 为刚度比例系数; $EI(x)$ 为 x 处的抗弯刚度; $m(x)$ 为 x 处的质量; $c(x)$ 为 x 处的阻尼.

由应力-应变关系可确定变化后的应力 σ 为

$$\sigma = E(\varepsilon + a_1 \dot{\varepsilon}) \quad (3)$$

式中: E 为其弹性模量; ε 为其初始应变; $\dot{\varepsilon}$ 为其应变的变化量.

根据模态理论,方程(3)的解可表示为模态贡献的叠加形式,即振动位移 $v(x,t)$ 为

$$v(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \varphi_i(x) q_i(t) \quad (4)$$

式中: $\varphi_i(x)$ 和 $q_i(x)$ 分别为位移模态振型和

模态坐标.

结合式(1)与材料力学中弹性梁的曲率函数为振动位移函数的二阶导数的关系,可得弯曲振动致任意截面 x 处的曲率变化函数:

$$\rho(x) = \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} = v''(x) = \sum_{r=1}^N \varphi''_r(x) q_r(x). \quad (5)$$

式中: $\varphi''_r(x)$ 为曲率模态振型.

当梁段发生弯曲时,根据梁体中性面的曲率公式可得:

$$\rho(x) = \frac{v''(x)}{(1 + v'(x))^{\frac{3}{2}}} \approx v''(x). \quad (6)$$

由式(1)与式(5)~(6)可知,当梁体发生局部损伤(材料弱化、截面破损等)时,相应损伤梁段的惯性矩、弹性模量等动力结构参数下降,导致结构局部的抗弯刚度减小,曲率增大使得原本平滑的曲率模态曲线出现畸变、突变等,根据观察曲率模态曲线的轮廓,可识别梁体的损伤位置和程度.

求得梁体的曲率模态的步骤:

①首先通过监测设备测得梁体各测点的位移模态 $\varphi(r)$,组成梁体整体位移模态振型:

$$\varphi(r) = [\varphi(1) \varphi(2) \cdots \varphi(r)]. \quad (7)$$

②然后对各测点采用中心差分的方法,得到相应的曲率模态 $\rho(r)$:

$$\rho(r) = \frac{\varphi(r-1) - 2\varphi(r) + \varphi(r+1)}{d_{r,r+1} \cdot d_{r-1,r}}. \quad (8)$$

式中:下标 r 表示第 r 个测点; $d_{r-1,r}$ 表示相邻测点 $r-1$ 和 r 之间的距离; $d_{r,r+1}$ 表示相邻测点 r 和 $r+1$ 之间的距离.

③通过各测点的曲率模态 $\rho(r)$,得到梁体整体曲率模态振型 $P(r)$ 为

$$P(r) = [\rho(1) \rho(2) \cdots \rho(r)]. \quad (9)$$

2.2 受损梁体曲率模态曲线分析

当梁体某一部位出现损伤时,梁体整体曲率模态振型 $P(r)$ 曲线会产生相应的变化.损伤部位曲率模态曲线的畸变面积如图2所示.

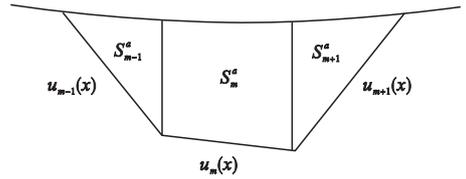


图2 损伤部位曲率模态曲线的畸变面积

Fig. 2 Distortion area of the curvature mode curve of the damaged unit

①单损伤工况下,曲率模态损伤曲线的损伤面积:

$$\begin{cases} S_{m-1}^a = \int_{l_{m-1}}^{l_m} [u_{m-1}(x) - v(x)] dx, \\ S_m^a = \int_{l_m}^{l_{m+1}} [u_m(x) - v(x)] dx, \\ S_{m+1}^a = \int_{l_{m+1}}^{l_{m+2}} [u_{m+1}(x) - v(x)] dx. \end{cases} \quad (10)$$

$$S_m^a = S_{m-1}^a + S_m^a + S_{m+1}^a = \int_{l_{m-1}}^{l_m} [u_{m-1}(x) - v_a(x)] dx + \int_{l_m}^{l_{m+1}} [u_m(x) - v_a(x)] dx + \int_{l_{m+1}}^{l_{m+2}} [u_{m+1}(x) - v_a(x)] dx. \quad (11)$$

式中: m 为单元编号; a 为损伤程度; $u_{m-1}(x)$ 为损伤左侧单元畸变线方程; $u_m(x)$ 为损伤单元畸变线方程; $u_{m+1}(x)$ 为损伤右侧单元畸变线方程; $v_a(x)$ 为 a 损伤程度下曲率模态的未畸变曲线; l_n 为节点位置.

②多损伤工况下,曲率模态损伤曲线的累计损伤面积由下组合式求和表示.

$$S_{m,n,\dots,p}^{a,b,\dots,d} = \begin{Bmatrix} S_m^a \\ S_n^b \\ \vdots \\ S_p^d \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} S_{m-1}^a + S_m^a + S_{m+1}^a \\ S_{n-1}^b + S_n^b + S_{n+1}^b \\ \vdots \\ S_{p-1}^d + S_p^d + S_{p+1}^d \end{Bmatrix} =$$

$$\left\{ \begin{aligned} & \int_{l_{m-1}}^{l_m} [u_{m-1}(x) - v_a(x)] dx + \int_{l_m}^{l_{m+1}} [u_m(x) - v_a(x)] dx + \int_{l_{m+1}}^{l_{m+2}} [u_{m+1}(x) - v_a(x)] dx \\ & \int_{l_{n-1}}^{l_n} [u_{n-1}(x) - v_b(x)] dx + \int_{l_n}^{l_{n+1}} [u_n(x) - v_b(x)] dx + \int_{l_{n+1}}^{l_{n+2}} [u_{n+1}(x) - v_b(x)] dx \\ & \vdots \\ & \int_{l_{p-1}}^{l_p} [u_{p-1}(x) - v_d(x)] dx + \int_{l_p}^{l_{p+1}} [u_p(x) - v_d(x)] dx + \int_{l_{p+1}}^{l_{p+2}} [u_{p+1}(x) - v_d(x)] dx \end{aligned} \right. \quad (12)$$

式中: m, n, p 为结构编号; a, b, d 为损伤程度; $u_{m-1}(x), u_{n-1}(x), u_{p-1}(x)$ 为损伤单位左侧相邻单元的畸变线方程; $u_m(x), u_n(x), u_p(x)$ 为损伤单元的畸变线方程; $u_{m+1}(x), u_{n+1}(x), u_{p+1}(x)$ 为损伤单元右侧相邻单元的畸变线方程; $v_a(x), v_b(x), v_d(x)$ 为 a, b, d 损伤程度下曲率模态的未畸变曲线。

3 梁式组合桥的损伤识别

图 3 所示为某梁式组合桥, 跨度为 $6 \times$

30 m; 材料密度 $\rho = 2\,500 \text{ kg/m}^3$; 弹性模量 $E = 3,125 \text{ GPa}$; 泊松比取 0.3。现按照子结构体系的分解方法, 将桥梁整体划分为 I ~ IV 类子结构。为研究其曲率模态曲线的变化设置 4 类工况: ①对 I 类连续梁直接研究受损伤梁体的曲率模态曲线的变化; ②对 II 类简支梁研究其曲率模态畸变面积; ③对 III 类 T 型刚构研究单元划分方式对曲率模态曲线的影响; ④对 IV 类悬臂梁考虑截面形式对曲率模态曲线的影响。

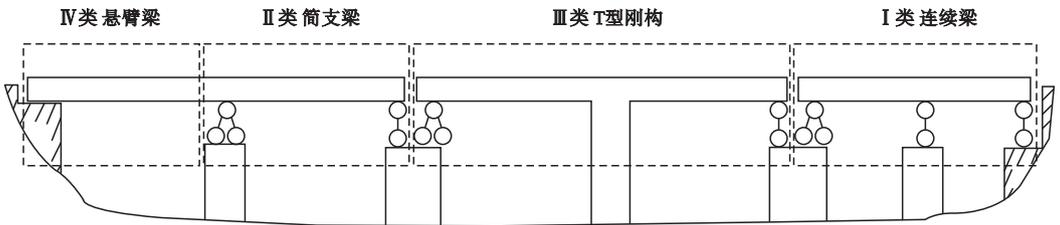


图 3 某梁式组合桥的子构件分解

Fig. 3 Decomposition of the sub-components of a beam type composite bridge

3.1 I 类子构件的直接曲率模态法分析

I 类子构件为两跨连续梁, 跨度 $2 \times 30 \text{ m}$, 共分为 60 个单元, 61 个节点支撑处的节点分别为 N1、N31 和 N61, 分别设定两种损伤工

况。①单处损伤: 16 单元损伤 5%、15%、30%、50% 和 70%; ②多处损伤: 16 单元、45 单元同时损伤 5%、10%、30%、50% 和 70%。I 类子构件的 1 阶曲率模态曲线如图 4 所示。

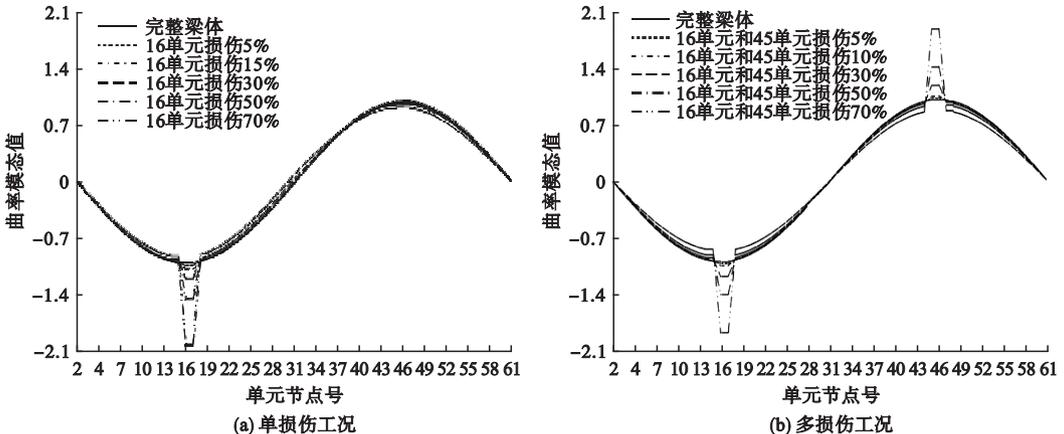


图 4 I 类子构件的 1 阶曲率模态曲线

Fig. 4 First order curvature mode curve of type I sub-components

由图4可知,一阶曲率模态曲线可较好地反映I类子构件(连续梁)的预设工况.通过分析可得构件发生损伤的位置和损伤程度的变化.构件出现损伤后,其模态曲率曲线呈现两部分变化:第一部分是损伤处曲线的畸变面积进一步增大;第二部分是发生损伤后,整体的模态曲率趋势曲线的曲率有一定程度的缩减.除此外,其他各高阶曲率模态曲线也可不同程度地反映损伤情况.

3.2 II类子构件曲率模态曲线的畸变面积分析

II类子构件为一简支梁,跨度30m,共分为30个单元,31个节点.两端支撑分别为左端N1节点和右端N31节点.研究受损梁体的曲率模态曲线的特征,设定下列损伤工况:16单元分别损伤5%、15%、40%、60%和80%.II类子构件的一阶曲率模态曲线如图5所示.

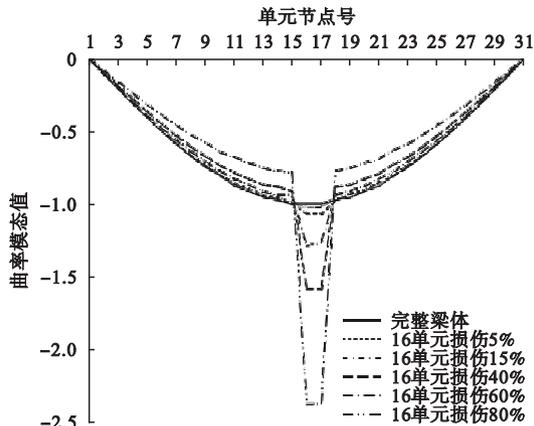


图5 II类子构件的一阶曲率模态曲线

Fig.5 First order curvature mode curve of type II sub-components

根据图5,可得到II类子构件不同损伤程度的一阶曲率模态曲线的变化情况.各工况的模态曲线与基线围成的面积及其变化情况如表1、表2所示,其中未损伤梁体的最大曲率值取定为1m,梁体长度为实际长度.

表1 II类子构件的曲率模态曲线面积

Table 1 Curvature mode curve area of type II sub-components

梁体情况	S_{m-}^a / m^2	$S_{m畸}^a / m^2$	S_{m+}^a / m^2	T_S / m^2	$(T_S^a - T_S^l) / \%$
未损伤	9.55	1	8.55	19.09	0
16单元损伤5%	9.52	1.02	8.53	19.08	-1
16单元损伤15%	9.48	1.07	8.49	19.04	-5
16单元损伤40%	9.30	1.28	8.34	18.92	-18
16单元损伤60%	9.01	1.59	8.11	18.72	-38
16单元损伤80%	8.31	2.37	7.54	18.22	-87

表2 II类子构件的曲率模态曲线面积变化情况

Table 2 Curvature mode curve area change of type II sub-components

梁体情况	$(S_{m-}^a - S_{m-}^l) / (S_{m-}^a - S_{m-}^l) / (S_{m+}^a - S_{m+}^l) / T(a) / m^2$	m^2	m^2	$\%$
未损伤	0	0	0	0
16单元损伤5%	-2	2	-2	-1
16单元损伤15%	-7	7	-5	-5
16单元损伤40%	-25	28	-20	-18
16单元损伤60%	-54	59	-43	-38
16单元损伤80%	-124	137	-101	-87

由表1、表2可知,各损伤工况下曲率模态曲线的面积情况随着损伤程度的增加,损伤单元的畸变面积增大,其他未损伤部位的面积减小由总体曲线面积 $T(a)$ 的变化可知,随着损伤加剧,其面积也呈现减小的趋势.

对其损伤工况下面积的变化情况进行多项式拟合,得到对应的损伤程度为

$$a = 3.045 \cdot T^3(a) - 5.14 \cdot T^2(a) + 3.082 \cdot T(a) + 0.005473. \quad (17)$$

通过式(17)计算得到采用曲率模态面积方法的准确损伤程度.

3.3 III类子构件在不同单元划分方式下的曲率模态曲线分析

III类子构件为T型刚构,跨度 2×15 m,将其上部结构分为30个单元,31个节点左右两端N1、N31节点为约束支撑,中间节点N31为墩梁固结处,设定其损伤工况见表3.

表 3 III 类子构件的损伤工况

Table 3 Damage conditions of type III sub-components

工况	损伤情况	损伤程度/%
1	13 单元损伤	20
2	13 单元损伤	50
3	13 单元损伤	70
4	13、21 单元损伤	10
5	13、21 单元损伤	40
6	13、21 单元损伤	60

单元划分方式的不同会影响模态曲率曲线的变化,笔者考虑相同长度单元和不相同长度单元划分两种模式(见图 6)。等长单元划分模式:划分单元模式为 $30 \times 1 \text{ m}$ 如图 6(a)所示;不等长单元划分:划分模式为 $6 \times 1 \text{ m}$; $2 \times 0.5 \text{ m}$; $4 \times 1 \text{ m}$; $1 \times 2 \text{ m}$; $6 \times 1 \text{ m}$; $2 \times 0.5 \text{ m}$; $5 \times 1 \text{ m}$; $1 \times 2 \text{ m}$; $3 \times 1 \text{ m}$ 如图 6(b)所示。

III 类子构件等长度单元的一阶曲率模态曲线如图 7 所示,不等长度单元的一阶曲率模态曲线如图 8 所示。

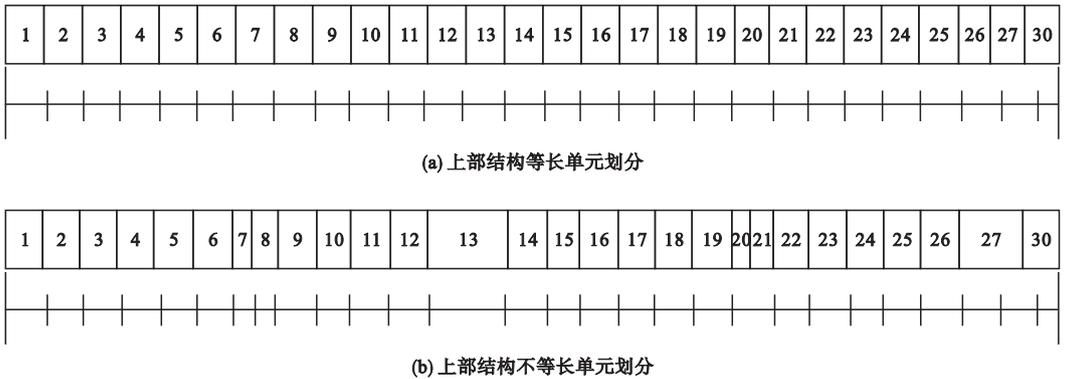


图 6 III 类子构件上部结构单元划分

Fig. 6 Division of superstructure elements of type III sub-components

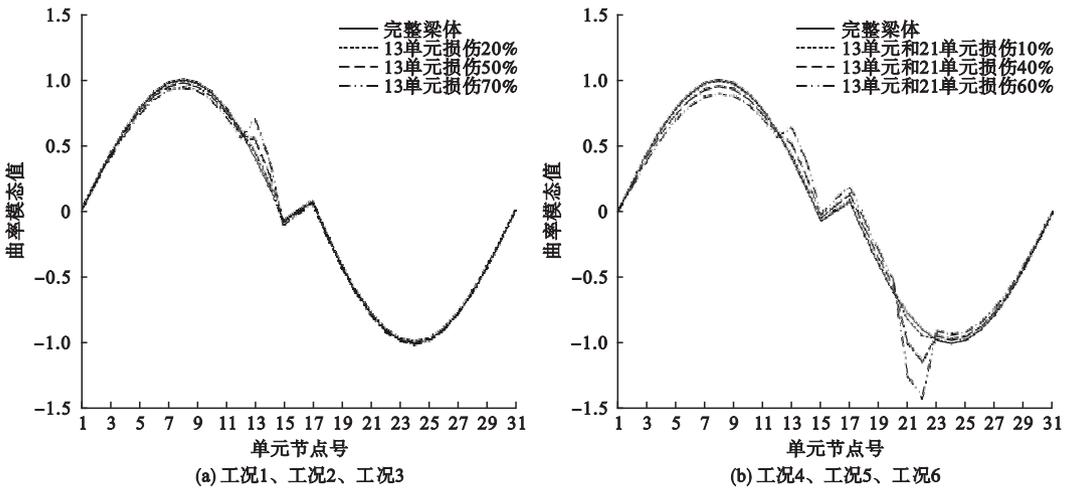


图 7 III 类子构件等长度单元的一阶曲率模态曲线

Fig. 7 First order curvature mode curve of type III sub-components with equal length units

对比图 7(a) 和图 7(b) 可知,曲率模态的方法可以较好地对比单处和多处损伤工况的 III 类子构件进行识别. 通过观察图 7(b) 两处损伤的识别情况,21 号单元的识别效果比 13

号单元的效果更好,这是因为 13 号单元更接近墩梁固结处. 说明边界条件、墩梁间的相互作用也会对当前构件的损伤识别产生一定影响. 对比图 8(a) 和图 8(b) 可知,对于不等长

单元划分的Ⅲ类子构件,仅采用曲率模态的方法不能够很好地识别出损伤情况,图8(a)

和图8(b)的单处和多处损伤工况的识别效果均较差.

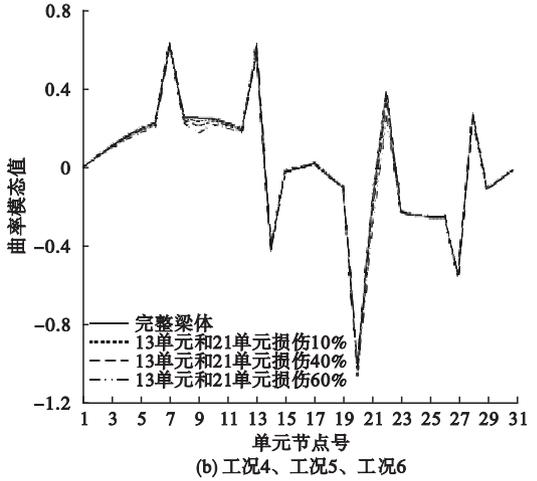
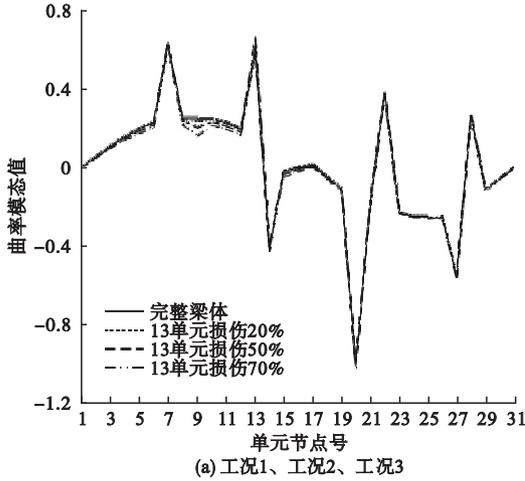


图8 Ⅲ类子构件不等长度单元的一阶曲率模态曲线

Fig. 8 First order curvature mode curve of type Ⅲ sub-components with unequal length units

对比图7和图8,等长度划分单元的曲率模态曲线更加平滑,更容易识别出损伤处的突变.不等长度划分单元的曲率模态曲线虽然在损伤工况下也产生一定的突变,但由于曲线本身存在“伪突变”的干扰,导致损伤处的突变不明显,容易忽视突变,采用曲率模态法识别性较差.因此在实际监测中,如采用曲率模态的方法进行损伤状态的识别,在传感器的布设方面应尽量采取等间隔进行布

设,以便得到更容易判定损伤的工况.

3.4 Ⅳ类子构件在不同截面变化形式下的曲率模态曲线分析

截面形式的变化会对构件的动力响应产生一定的影响.笔者针对一阶模态曲率曲线的特点,对Ⅳ类悬臂梁构件的等截面、均匀变截面和分段变截面的3种不同截面(见图9)方式下曲率模态曲线的变化规律进行研究.

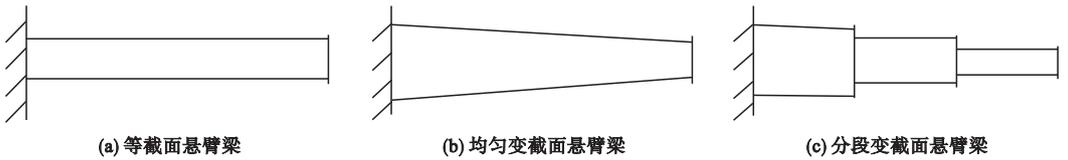


图9 Ⅳ类子构件的截面形式

Fig. 9 Cross section forms of type IV sub-components

Ⅳ类子构件为悬臂梁,跨径30 m,共分为30个单元,31个节点,左端固定部位的节点为N1.分别设定两种损伤工况.①单处损伤:16单元损伤20%、50%和70%;②多处损伤:11单元、21单元同时损伤10%、40%和60%.不同的截面形式会导致不同的模态曲率曲线,Ⅳ类悬臂梁的截面损伤工况如表4所示.

表4 Ⅳ类悬臂梁的截面损伤工况

Table 4 Damage conditions of type IV cantilever beam

截面形式	工况	
	单损伤	多损伤
等截面	16单元损伤20%	11、21单元损伤10%
均匀变截面	16单元损伤50%	11、21单元损伤40%
分段变截面	16单元损伤70%	11、21单元损伤60%

图10~图12为IV类子构件等截面悬臂梁、均匀变截面悬臂梁、分段变截面悬臂梁在单处和多处损伤工况下的一阶曲率模态曲线

线,采用曲率模态的方法对这3类截面均可进行损伤识别.

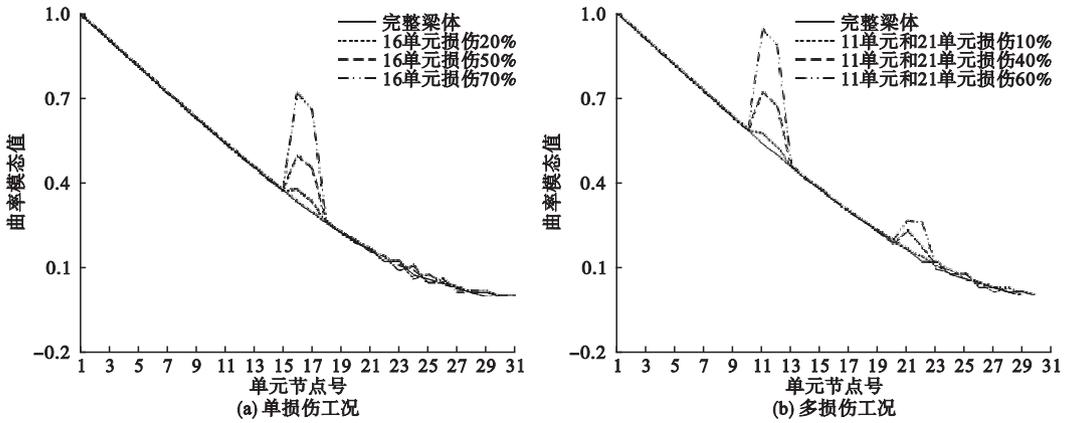


图10 等截面形式的一阶曲率模态曲线

Fig. 10 First order curvature mode curve of constant cross-section

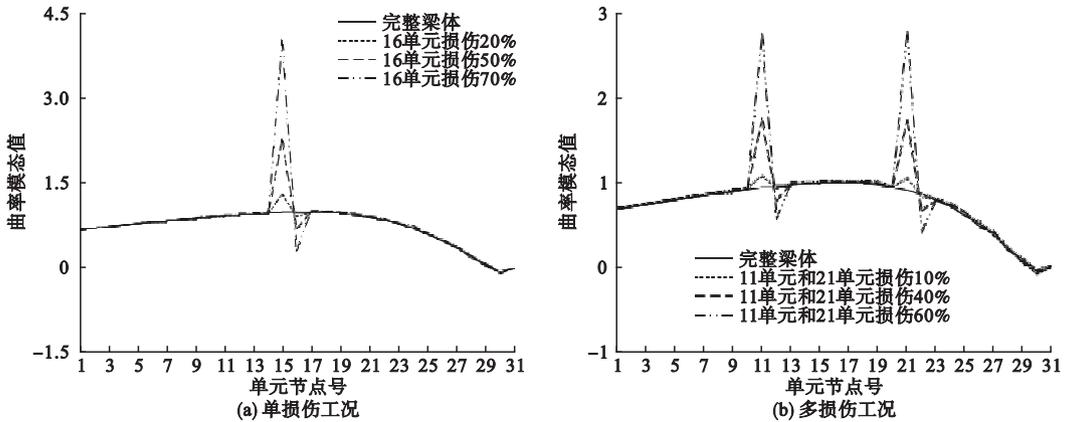


图11 均匀变截面形式的一阶曲率模态曲线

Fig. 11 First order curvature mode curve of homogenous variable cross-section

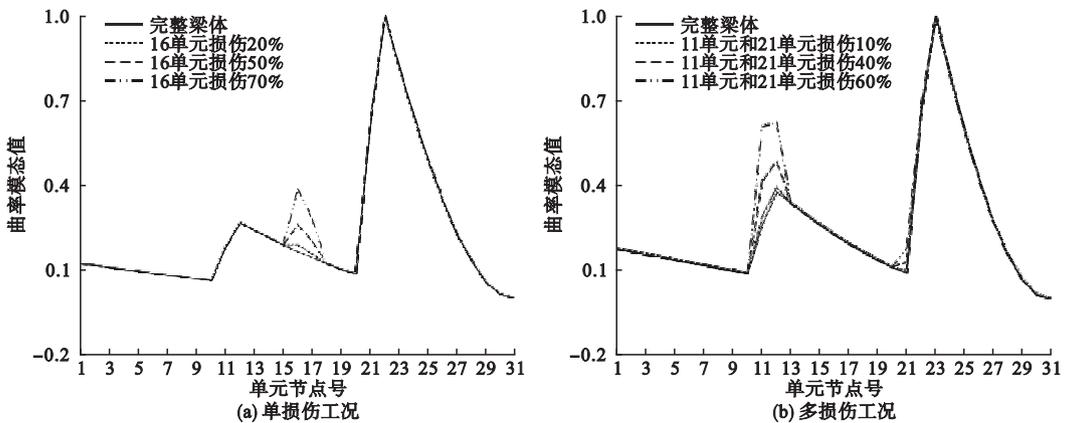


图12 分段变截面形式的一阶曲率模态曲线

Fig. 12 First order curvature mode curve of segmental constant cross-section

由图 10 可知,等截面悬臂梁的一阶曲率曲线基本为线性变化。从图 10(b) 两处损伤的识别情况可知,11 号单元的识别效果比 21 号单元的效果更好,越接近自由端的位置,相应的曲率更小,对应的识别效果更差

由图 11 可知,均匀变截面悬臂梁的一阶曲率曲线为“凸型”变化。由于悬臂梁特点以及截面均匀变化的规律,随着单元节点的增大,与靠近自由端的影响相比,起初梁体截面减小的影响因素占主导,因此曲率得到了一定的增大,在最大值时,梁体截面影响和靠近自由端的影响达到了平衡,越接近自由端,其影响越大,对应的曲率越小,直至减小为零。

由图 12 可知,分段变截面悬臂梁的一阶曲率曲线趋势类似等截面悬臂梁。只是在截面突变处,曲率会产生较大变化。对于相同幅度的突变,越接近自由端,相应的曲率变化值会越大。从图 12(b) 两处损伤的识别分析可知,11 号单元的识别效果比 21 号单元的效果更好,对于模态曲率曲线,其斜率越大处损伤的识别越困难。

4 结 论

(1) 通过振动模态分析,得到桥梁实时的曲率模态参数曲线,利用其损伤时受损处曲线产生突变的特点,进行损伤定位和损伤程度的判定是一种有效的方法。

(2) 对受损桥梁的曲率模态曲线畸变面积进行分析,将畸变面积的变化趋势与损伤程度的发展进行拟合,可得到较准确的损伤程度。这种方法可弥补传统曲率模态识别方法中不能确定损伤程度这一缺陷。

(3) 单元划分、截面形式的差异都会一定程度的影响损伤识别的准确性。因此,在实际的工程监测过程中,应尽量做到:传感器均匀布置;截面的突变处、自由端和墩梁固结等构件接触部位重点监测。

参考文献

[1] 吉伯海,傅中秋. 近年国内桥梁倒塌事故原因

分析[J]. 土木工程学报,2010,43(增刊):465-498.

(JI Bohai, FU Zhongqiu. Analysis of Chinese bridge collapse accident causes in recent years [J]. China civil engineering journal, 2010, 43 (S):465-498.)

[2] MODARES M, WAKSMANSKI N. Overview of structural health monitoring for steel bridges [J]. Practice periodical on structural design & construction, 2013, 18(3):187-191.

[3] ZAURIN R, KHUC T, CATBAS F N. Hybrid sensor-camera monitoring for damage detection; case study of a real bridge [J]. Journal of bridge engineering, 2016, 21(6):1-13.

[4] 吴向男,徐岳,梁鹏,等. 桥梁结构损伤识别研究现状与展望[J]. 长安大学学报(自然科学版),2013,33(6):49-58.

(WU Xiangnan, XU Yue, LIANG Peng, et al. Research status and prospect of bridge structure damage identification [J]. Journal of chang'an university (natural science edition), 2013, 33 (6):49-58.)

[5] GE L, SOONG T T. Damage identification through regularization method. I: theory [J]. Journal of engineering mechanics, 1998, 124 (1):103-108.

[6] BUDA G, CADDEMI S. Identification of concentrated damages in euler-bernoulli beams under static loads [J]. Journal of engineering mechanics, 2007, 133(8):942-956.

[7] GHRIB F, LI L, WILBUR P. Damage identification of euler-bernoulli beams using static responses [J]. Journal of engineering mechanics, 2012, 138(5):405-415.

[8] HERNANDEZ E M. Identification of localized structural damage from highly incomplete modal information: theory and experiments [J]. Journal of engineering mechanics, 2015, 142 (2):1-9.

[9] 韩建平,董小军,周伟. 基于振动台试验的 RC 框架模型修正及模拟损伤识别 [J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(5):87-92.

(HAN Jianping, DONG Xiaojun, ZHOU Wei. Model updating for RC frame based on shaking table test and identification of simulated damage [J]. Journal of earthquake engineering and engineering vibration, 2010, 30(5):87-92.)

[10] FRASER M, ELGAMAL A, HE X, et al. Sensor network for structural health monitoring of a highway bridge [J]. Journal of computing in civil engineering, 2010, 24(1):11-24.

[11] 王超,朱宏平. 军山长江大桥健康监测系统设计

- 计与应用[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(5):76-80.
(WANG Chao, ZHU Hongping. Design and application of health monitoring system for the junshan yangtze river bridge [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2015, 37(5): 76-80.)
- [12] 张记东, 梁力, 李鑫, 等. 南昌新八一大桥健康监测预警指标计算分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(增刊):121-125.
(ZHANG Jidong, LIANG Li, LI Xin, et al. Analysis of warning indices for bridge health monitoring of the eight one bridge in Nanchang [J]. Journal of civil, architectural & environmental engineering, 2015, 37(S):121-125.)
- [13] 孙大风, 郭雪莽. 静力凝聚法及其在工程中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 1988(增刊):33-39.
(SUN Dafeng, GUO Xuemang. The static condensation method and its application in engineering [J]. Journal of north China university of water resources and electric power (natural science edition), 1988(S):33-39.)
- [14] 费庆国, 李爱群, 韩晓林, 等. 大跨桥梁结构健康监测系统振动传感器配置仿真[J]. 东南大学学报(自然科学报), 2010, 40(6):1243-1246.
(FEI Qingguo, LI Aiqun, HAN Xiaolin, et al. Simulation study on vibration sensor placement for structural health monitoring system of long-span bridge girder [J]. Journal of southeast university (natural science edition), 2010, 40(6): 1243-1246.)
- [15] 赵瀚玮, 丁幼亮, 李爱群, 等. 公铁两用斜拉桥竖向动力特性长期监测分析[J]. 铁道建筑, 2016(11):26-30.
(ZHAO Hanwei, DING Youliang, LI Aiqun, et al. Long-term monitoring and analysis of vertical dynamic characteristic of rail-cum-road cable-stayed bridge [J]. Railway engineering, 2016(11):26-30.)
- [16] ASADOLLAHI P. Statistical analysis of modal properties of a cable-stayed bridge through long-term wireless structural health monitoring [J]. Journal of bridge engineering, 2017, 22(9):1-15.
- [17] XU Z D, WU Z. Energy damage detection strategy based on acceleration responses for long-span bridge structures [J]. Journal of bridge engineering, 2007, 29(4):609-617.
- [18] 刘义伦, 时圣鹏, 廖伟. 利用曲率模态识别桥梁损伤的研究 [J]. 振动与冲击, 2011, 30(8):77-81.
(LIU Yilun, SHI Shengpeng, LIAO Wei. The research on bridge damage identification using curvature mode shapes [J]. Journal of vibration and shock, 2011, 30(8):77-81.)
- [19] 徐华东, 王立海, 胡志栋. 运用曲率模态技术的木梁损伤定量识别 [J]. 振动、测试与诊断, 2011, 1(31):110-114.
(XU Huadong, WANG Lihai, HU Zhidong. Quantitative identification of wood beam damage using modal curvature theory [J]. Journal of vibration, measurement & diagnosis, 2011, 1(31):110-114.)
- [20] 沈庆阳, 纪国宜. 基于曲率模态的薄板结构的损伤定位研究 [J]. 工业建筑, 2013(增刊):322-326.
(SHEN Qingyang, JI Guoyi. Study on damage detection of sheet structure using curvature model [J]. Industrial construction, 2013(S): 322-326.)