

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.012



开放科学(资源服务)标识码OSID:



基于模态参数指标的空心板梁桥铰缝 损伤对比研究

曲春绪^{1a}, 宫亚超^{1a}, 李宏男^{1a}, 谭岩斌^{1b}, 白凤龙², 陈东生³, 马彪⁴, 刘涛⁵,
刘朵⁶, 伊廷华^{1a}

(1. 大连理工大学 a. 土木工程学院; b. 桥梁与隧道技术国家地方联合工程实验室, 辽宁大连 116024; 2. 大连市勘察测绘研究院集团有限公司, 辽宁大连 116021; 3. 安徽省建筑科学研究设计院, 合肥 230031; 4. 中国瑞林工程技术股份有限公司, 合肥 330031; 5. 山东建勘集团有限公司, 济南 250031; 6. 苏交科集团股份有限公司, 南京 211112)

摘要: 模态参数反映结构动力特性, 基于模态参数的损伤指标能反映结构动力特性的变化, 可用于桥梁结构损伤识别。以模态参数构成的损伤指标众多, 每个损伤指标通过自身的变化来识别损伤, 但难以用统一标准对不同损伤指标的识别效果进行量化对比。针对空心板梁桥的铰缝损伤, 提出一致性量化指标, 从数据层面定量描述指标的损伤指示效果, 便于各类损伤指标的对比和应用。首先根据模态参数损伤指标, 构造一致性量化指标, 定量描述不同损伤指标的识别效果; 然后建立空心板梁桥及其铰缝损伤的有限元实体模型, 模拟3种不同铰缝位置处的损伤工况, 对每处损伤分别设置6种不同损伤程度; 最后应用一致性量化指标对比各损伤指标的识别性能, 总结不同工况下各损伤指标识别效果的变化规律。分析表明, 一致性量化指标能够在不同工况下定量描述不同损伤指标的识别效果。

关键词: 空心板梁桥; 铰缝损伤; 有限元模拟; 损伤识别; 模态参数

中图分类号: U448.21; U446.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2023)01-0167-11

收稿日期: 2021-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(52078100); 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室开放基金(2020D32); 河北省大型结构健康诊断与控制重点实验室开放基金(KLLSHMC1908); 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室开放基金(CPCSME2018-04); 中国地震局建筑物破坏机理与防御重点实验室开放基金(FZ211107)。

作者简介: 曲春绪(1984-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事桥梁结构健康监测和模态参数识别研究, E-mail: quchunxu@dlut.edu.cn。

Received: 2021-10-09

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52078100); Scientific Research Fund of Institute of Engineering Mechanics of China Earthquake Administration (No. 2020D32); Scientific Research Fund of Key Laboratory of Large Structure Health Monitoring and Control of Hebei Province (No. KLLSHMC1908); Scientific Research Fund of Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of Ministry of Education of Southeast University (No. CPCSME2018-04); Scientific Research Founding of Key Laboratory of Building Collapse Mechanism and Disaster Prevention of China Earthquake Administration (No. FZ211107).

Author brief: QU Chunxu (1984-), PhD, associate professor, doctoral supervisor, main research interests: bridge structure health monitoring and modal parameter identification, E-mail: quchunxu@dlut.edu.cn.

Comparative study of hinge joint damage of hollow slab bridge based on modal parameter index

QU Chunxu^{1a}, GONG Yachao^{1a}, LI Hongnan^{1a}, TAN Yanbin^{1b}, BAI Fenglong²,
CHEN Dongsheng³, MA Biao⁴, LIU Tao⁵, LIU Duo⁶, YI Tinghua^{1a}

(1a. School of Civil Engineering; 1b. National & Local Joint Engineering Laboratory of Bridge and Tunnel Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, P. R. China; 2. Dalian Geotechnical Engineering and Mapping Institute Group Co. Ltd, Dalian 116021, P. R. China; 3. Anhui Institute of Building Research & Design, Hefei 230031, P. R. China; 4. China Nerin Engineering Co. Ltd., Hefei 330031, P. R. China; 5. Shandong JianKan Group Co. LTD., Jinan 250031, P. R. China; 6. JSTI Groups, Nanjing 211112, P. R. China)

Abstract: Modal parameters reflect structural dynamic properties, and damage indexes based on modal parameters can reflect changes in structural dynamic properties and can be used for bridge structural damage identification. There are many damage indexes composed of modal parameters, and each damage index identifies damage by its own changes, but it is difficult to quantify and compare the identification effect of different damage indexes by a unified standard. In view of the hinge joint damage of hollow slab bridge, this paper proposes a consistency quantification index to quantitatively describe the indication effect of damage indexes for hinge joint damage of hollow slab bridge, which is convenient for the comparison and application of various damage indexes. First, according to the damage indexes of modal parameters, the consistency quantification indexes are constructed to quantitatively describe the identification effect of different damage indexes. Then, a solid model of hollow slab bridge and hinge joint damage is established based on ANSYS, the damage conditions at three different hinge joint locations are simulated, and six different damage levels are set for each damage location. Finally, the consistency quantification index is applied to compare the identification effects of each damage index, and the change law of the identification effect of each damage index under different damage conditions is summarized. The analysis shows that the consistency quantification index can quantitatively describe the identification effect of different damage indexes under different damage conditions.

Keywords: hollow slab bridge; hinge joint damage; finite element simulation; damage identification; modal parameter

交通运输部《2020年交通运输行业发展统计公报》显示,在中国的91.28万座公路桥梁中,中小跨径桥梁占比超过86%,总计78.6421万座,占到全国公路桥梁总里程的1/3。在各式中小跨桥梁中,装配式空心板梁桥应用最为广泛。该类桥梁中有相当一部分建于20世纪六七十年代,设计时承载能力储备较低,加上不断增加的车辆荷载,铰缝损伤逐渐成为威胁空心板梁桥安全运营的主要病害^[1],因此,有效识别铰缝损伤具有重要意义。

学者们针对铰缝损伤识别展开了大量研究,提出了多种方法对铰缝损伤进行识别,有学者基于静力学方法^[2-3]对铰缝损伤进行识别,也有学者通过动力特性参数^[4]识别铰缝损伤。模态参数作为桥梁健康监测中不可或缺的信息^[5-9],基于模态参数的损伤识别指标也得到了学者们的广泛关注^[10-13],众多的

损伤指标被提出。肖凯龙等^[14]利用多阶曲率模态变化率叠加指标进行损伤识别,并通过数值模拟验证了该指标的有效性。狄生奎等^[15]推导了基于模态曲率差归一化构建的指标与损伤识别的关系,提出了新的损伤判别因子对简支梁进行损伤识别分析。唐盛华等^[16]基于模态柔度矩阵曲率范数差构造了一种新的损伤识别指标,通过某三跨连续梁有限元模型验证了该指标的有效性。在模态应变能变化率指标的基础上,卫军等^[17]提出一种经Bayes数据融合理论处理的改进损伤识别方法,并通过数值分析和试验研究验证了该方法的有效性。杨海峰等^[18]提出了一种基于逆有限元的应变模态损伤检测方法,解决了传统应变模态损伤指标需要完备的实测振型问题,并应用损伤后的应变模态构造指标进行了损伤定位。尽管学者们已经提出了大量损伤指标,

并且通过灵敏度分析,从理论上分析了损伤指标随结构物理参数变化的灵敏程度。但对于三维模型,当自由度数量变多时,计算量变得非常大;另一方面,对损伤的评判均基于指标自身的变化,灵敏度分析并不能评价不同损伤指标的识别效果,因此,难以对不同损伤指标之间的识别效果进行统一量化评价。

笔者以空心板梁桥铰缝损伤为例,提出一致性量化指标,仅从指标数据层面对各损伤指标的识别效果进行定量描述,并通过该指标分析各损伤指标在不同工况下的识别效果。首先,基于模态参数的损伤指标构造一致性量化指标;然后,应用 ANSYS 建立空心板梁桥及铰缝损伤的实体模型,并模拟多种工况;最后,应用一致性量化指标对不同工况下不同损伤指标对铰缝损伤的识别效果进行描述和对比,并总结在不同损伤工况下各指标量化值的变化规律。

1 问题描述

1.1 板梁桥概况

根据交通部颁布的公路桥梁通用图^[19]中装配式空心板梁桥上部结构通用图纸对数值模拟的算例模型进行建模。该桥为一座双向两车道的装配式空心板梁桥,采用漏斗形深铰缝连接,纵向计算跨径为 9.96 m,横向总宽为 11.25 m,由 10 块空心板组成,板高 0.60 m,除边跨板宽度为 0.995 m 外,其余板宽度均为 0.99 m。全桥预制空心板、铰缝及桥面现浇层均使用 C50 混凝土,对应的弹性模量为 34.5 GPa,重力密度为 26 kN/m³。该空心板梁桥的横截面如图 1 所示,图 2 所示为边板、铰缝以及中板的细部尺寸。

装配式空心板梁桥上部承载结构的各个预制板之间通过现浇混凝土和钢筋等组成的铰缝构造连接为整体,通过铰缝的横向连接作用将上部结构所承载的荷载分配到各个预制板上,形成横向协同

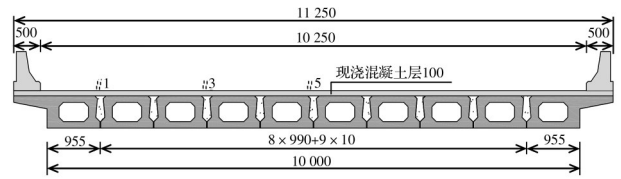


图 1 空心板梁桥横截面(单位:mm)

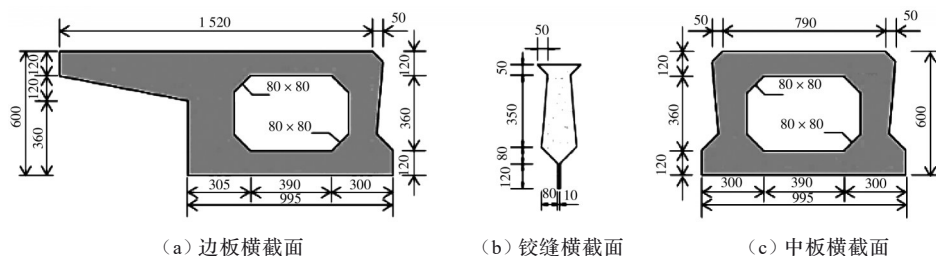
Fig. 1 Transverse section of hollow slab bridge (Unit: mm)

工作的效果。由于预制板之间的连接刚度与预制板相比较小,因此,一般将各个板梁间看作铰接,铰缝则主要以传递板间剪力的方式实现荷载的横向分布。

作为现浇构造,铰缝本身与预制板的质量和性能存在较大的差距,这一特点使其容易成为桥梁运营中的薄弱环节;而由于设计上采用的是铰接板理论,与桥梁实际运营中铰缝的受力状况存在一定差异,因此,传统铰缝设计存在不合理因素,加之施工与后期运营阶段的问题,导致铰缝很容易发生病害。铰缝的工作状况对空心板梁桥的横向协同工作性能有着非常大的影响,同时也是结构能否安全运营的关键。

1.2 模态参数损伤指标

基于模态参数的损伤识别原理是,损伤会引起桥梁结构刚度、质量、阻尼等物理参数的变化,而模态参数可以看作是这些物理参数的函数,因此,由模态参数构造的指标也会产生相应变化,进而反映结构的损伤。根据所应用模态参数的不同,可以对损伤指标进行简单分类。频率、振型作为最基本的模态参数,本身可以直接构造损伤指标;而基于频率及振型的损伤指标对局部损伤的识别不够敏感,Pandey 等^[20]首次提出曲率模态的概念并应用于损伤识别领域,极大地提高了损伤识别的灵敏度;随着人们对模态参数研究的深入,原本属于静力学概念的柔度被拓展到模态领域,得到了模态柔度,并且模态柔度综合了频率与振型两种信息。笔者选择基于这 4 类模态参数的损伤指标进行研究。



(a) 边板横截面

(b) 铰缝横截面

(c) 中板横截面

图 2 预制板及铰缝横截面(单位:mm)

Fig. 2 Transverse section of prefabricated plate and hinge joint (Unit: mm)

对于频率类指标,频率的测量精度相对较高,但频率作为典型的整体量,对结构局部损伤不敏感,也无法进行损伤定位。选用的指标为正则化的频率改变率^[21] (Normalized Frequency Change Ratio, NFCR),该指标定义为

$$\text{NFCR}_i = \frac{\Delta\omega_i/\omega_i^u}{\sum_{j=1}^q (\Delta\omega_j/\omega_j^u)} \quad (1)$$

式中: q 为损伤分析时所采用的频率阶数; u 代表结构未损状态; ω_i^u 、 ω_j^u 分别为结构第 i 、 j 阶固有频率; $\Delta\omega_i$ 、 $\Delta\omega_j$ 分别为结构第 i 、 j 阶固有频率变化值。

该指标的特点是,由于对频率变化率采取了归一化处理,结构的正则化频率变化率消除了损伤程度的影响,仅为损伤位置的函数。

对于振型类指标,尽管振型的测试精度低于频率,但振型包含更多的损伤信息,并且是位置的单调函数,因此,通过指标幅值的变化可以直观地判断损伤的存在及位置。选择一阶振型改变率^[22] (The Ratio of the 1st Mode Shape Change, RMSC1),该指标为

$$\text{RMSC1} = \frac{\varphi_1^d - \varphi_1^u}{\varphi_1^u} \quad (2)$$

式中: φ_1^u 、 φ_1^d 分别为损伤前后的第1阶振型, d 代表结构损伤状态。

相对于振型差值,振型改变率对损伤的反应更加敏感,对于简单梁结构而言,仅有第1阶振型改变率能够进行损伤识别。

对于曲率模态类指标,相较于其他模态参数,曲率模态对结构局部损伤有很高的敏感性,从理论上讲,仅需要实测数据便可以很好地识别损伤,但实际应用时则依赖于密集的测点布设。选择曲率模态变化率^[23] (Curvature Modal Change Rate, CMCR)和叠加曲率模态改变率^[11] (The Ratio of Superimposed Curvature Modal Change, RSCMC),两个指标的表达式分别为

$$\text{CMCR}_{ij} = \frac{(\varphi_{i(j+1)}^u)'' - (\varphi_{ij}^u)''}{l} \quad (3)$$

$$\text{RSCMC} = \sum_{i=1}^q \left(\frac{|(\varphi_{ij}^u)''|}{\max(\varphi_{ij}^u)''} - \frac{|(\varphi_{ij}^d)''|}{\max(\varphi_{ij}^d)''} \right) \quad (4)$$

式中:结构曲率模态 φ_{ij}'' 可借助中心差分理论,由离散点的振型模态近似求得

$$\varphi_{ij}'' = \frac{\varphi_{i(j-1)} - 2\varphi_{ij} + \varphi_{i(j+1)}}{l^2} \quad (5)$$

式中: i 为结构的第 i 阶模态; j 为结构的节点 j ; l 为测点间距。

理论上,结构的曲率模态可以通过计算振型的二阶微分得到,结构局部损伤对振型的影响从而得到放大,因此,曲率模态类指标对局部损伤有非常高的敏感性。曲率模态变化率本质上是曲率模态的三阶差分,对损伤的灵敏度理论上进一步得到增加。叠加曲率模态改变率的优点在于,解决了曲率零点对损伤识别的干扰。

对模态柔度类指标,仅需测试精度较高的低阶模态信息便可得到精度较高的模态柔度。选择模态柔度曲率差^[24] (Modal Flexibility Curvature Change, MFCC)指标,定义为

$$\text{MFCC} = \text{MFC}^d - \text{MFC}^u \quad (6)$$

式中: MFC^u 、 MFC^d 分别为损伤前后的模态柔度曲率矩阵,其构造过程为先对模态柔度 F 列元素进行二阶差分得到一个矩阵,在此基础上,再对行元素进行二阶差分,得到模态柔度曲率矩阵,用于计算MFCC。将MFCC矩阵每行元素求和,得到的列向量作为该损伤指标。

这种构造方式使得该指标包含结构全部的损伤信息,不会产生漏判。用于计算该指标的模态柔度 F 的表达式为

$$F = \Psi \Lambda^{-1} \Psi^T = \sum_{i=1}^m \frac{1}{\lambda_i} \Psi_i \Psi_i^T \quad (7)$$

式中: Λ 为特征值矩阵。

1.3 一致性量化指标

不同损伤指标的指示效果并不相同。由于各类损伤指标采用的模态参数不同,因此,针对相同损伤工况,不同类别指标的幅值数量级存在非常大的差异,仅靠视觉评判存在较大的主观性,使用一致性量化指标 K 对每个指标进行定量化描述,以便对不同损伤指标进行比较。

由于频率类损伤指标与损伤位置不具备对应关系,根据频率类指标的损伤识别多采用模式识别,因此,定量化描述并不考虑频率类损伤指标。其他各类损伤指标在构造上主要以振型为基础,存在与位置的一一对应关系,通过极值引起的突变或是连续性的间断来判断损伤的存在及损伤位置,即识别损伤时考虑了损伤指标数据中离群极值点对指标曲线的影响。

考虑损伤指标数据的幅值分布。离群极值点

时等效为指标幅值分布的尾部,一致性量化指标 K 通过衡量损伤位置处指标幅值占分布整体的多少对不同损伤指标的识别效果进行统一量化描述。对任一损伤指标向量 Θ

$$\Theta = [\theta_1 \cdots \theta_i \cdots \theta_n]^T = \{\theta_i\} \quad (8)$$

式中: θ_i 为第 i 个位置的损伤指标值; n 为测点数量; Θ 与位置存在一一对应关系。通过标准化处理,得到标准化的损伤指标向量 $\tilde{\Theta}$

$$\tilde{\Theta} = \left\{ \frac{\theta_i - \mu}{\sigma} \right\} \quad (9)$$

式中: μ 为指标向量的均值; σ 为指标向量的标准差。

则一致性量化指标 K 表达式为

$$K = (\tilde{\Theta}^2)^T \tilde{\Theta}^2 = n \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_i - \mu)^4}{\left[\sum_{i=1}^n (\theta_i - \mu)^2 \right]^2} \quad (10)$$

K 在数学上可以表述为“归一化中心四阶矩”, K 值越大,意味着损伤指标的识别效果越好。若将指标向量的幅值分块,将均值附近 m 个标准差内的数据称为中心数据,记为 Ω_{center} , 其一致性量化指标计算值记为 K_{center} , 通常 m 可取值为 1; 剩余部分称为尾部数据, 记为 Ω_{tail} , 其一致性量化指标计算值为 K_{tail} 。则全部指标数据的 K 可表达为

$$K = n \frac{\sum_{\Omega_{\text{center}}} (\theta_i - \mu)^4}{\left[\sum_{\Omega_{\text{center}}} (\theta_i - \mu)^2 \right]^2} + n \frac{\sum_{\Omega_{\text{tail}}} (\theta_i - \mu)^4}{\left[\sum_{\Omega_{\text{tail}}} (\theta_i - \mu)^2 \right]^2} = K_{\text{center}} + K_{\text{tail}} \quad (11)$$

Westfall^[25]研究表明,分布于均值附近一个标准差内部的数据对归一化中心四阶矩影响非常小,当 K 值较大时,无论从均值的多少个标准差来定义中心,由中心决定的部分都很小。当存在多损伤时,指标峰值可能会存在多个,也会较大程度地改变指标的 K 值,由于设定为单损伤,故指标的损伤信息主要以单突变为重。当指标存在较大干扰时,同样也会增大指标幅值尾部的重量,因而对峰度值产生一定的干扰,但通过对指标的分析,多数扰动值是由于指标构造的问题,如分母上使用了非常小的值而造成干扰,这类指标干扰可以通过改进而得到解决,因此所选指标不受此影响。

铰缝损伤本质上是一种裂缝,裂缝处的振型是连续的,振型幅值分布比较均匀;但裂缝会造成曲率的不连续,曲率突变的幅值会增加指标分布的尾部重量,造成 K 值极快增加,这与曲率类损伤指标

的灵敏度远高于位移类损伤指标的结论是一致的。

由上述分析可知,一致性量化指标 K 由损伤指标构造,而用于计算 K 值的损伤指标是由结构未损伤状态及损伤状态下的振型参数等构成的。因此,一致性量化指标的可靠性取决于有限元模拟的准确性。

2 数值模拟

2.1 有限元模型

根据空心板梁桥通用图纸,用 ANSYS 软件建立了该桥有限元模型。空心板梁部分、现浇层部分以及横桥向两端防撞栏部分均采用 SOLID65 单元进行模拟,总计 124 800 个单元,151 298 个节点。该有限元模型纵桥向两端采用简支约束,约束布设在梁端底部所有节点上;横桥向两端为自由约束端。由于该空心板截面并不规则,为了便于有限元分析,对截面进行预分块设置并简化截面,最终得到该空心板梁桥结构的有限元模型,约束及坐标系设置一并展示于图 3 中。其中,横桥向梁底每个截面共有 112 个节点,网格足够精细以反映横桥向的振动特性。

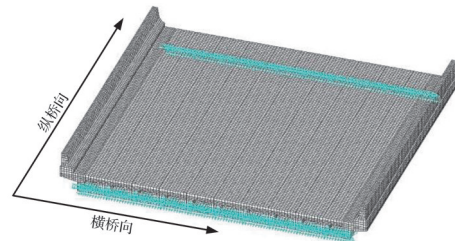


图 3 空心板梁桥有限元模型

Fig. 3 Finite element model of hollow slab bridge

铰缝模型采用实体单元建立,重点是对各损伤指标进行验证并总结规律,并不需要考虑铰缝开裂面的接触问题,因此,采取直接删除对应铰缝单元的方式模拟铰缝损伤,这种处理将忽略开裂面之间的所有联系,物理含义简单明确。

2.2 工况设置

基于空心板梁桥实体模型来研究铰缝损伤对结构振动特性的影响,并进一步构造损伤指标,对铰缝开裂进行损伤识别。预制板的高度 $h=0.6$ m,铰缝损伤程度通过开裂高度来表示,工况设置如表 1 所示。将每种损伤工况设置为纵桥向全贯通的单损伤,分别对 #1、#3 和 #5 号铰缝设置开裂高度为 $0.20h$ 、 $0.33h$ 、 $0.50h$ 、 $0.67h$ 、 $0.80h$ 和 $1.00h$ 的损伤

工况。由于建模中考虑了桥面现浇层,因此,1.00h对应的损伤工况并非对应着铰缝纵向全贯通的损伤。而在结构振型的选取上,考虑到测点布设一般

位于板梁底部,因此,选择的是梁底全部节点的竖向振型数据来构造损伤指标。

表1 损伤铰缝编号与损伤高度

Table 1 Numbers and damage heights of damaged hinge joint

损伤铰缝编号	工况1	工况2	工况3	工况4	工况5	工况6
#1	0.20h	0.33h	0.50h	0.67h	0.80h	1.00h
#3	0.20h	0.33h	0.50h	0.67h	0.80h	1.00h
#5	0.20h	0.33h	0.50h	0.67h	0.80h	1.00h

3 计算结果及分析

针对设置的损伤工况,主要通过改变横桥向铰缝损伤位置、纵桥向分析截面及竖向开裂高度来对比不同损伤指标的一致性量化值,并总结规律。尽管上述损伤指标针对的是一维结构,而所建空心板梁桥实体模型是三维结构,但由于假设铰缝损伤主要影响结构的横向整体性,即铰缝损伤的特征主要影响的是横桥向振型,因此,不考虑空心板梁桥的空间效应。根据文献[26]中对某空心板梁实桥的模式测试,对前4阶模式振型的对比说明,有限元模型与实际桥梁的振动特性相符;而文献[27]针对某存

在铰缝损伤的空心板梁桥进行横桥向模式识别,同样说明铰缝损伤下的有限元模拟是准确的,进而保证K值的可靠性。

在考虑损伤工况之前,首先对未损状态的空心板梁桥模型进行模式分析,得到如图4所示的前10阶振型。只关注横桥向振型,可以看到,第3阶、第5阶、第10阶模式对应的弯曲振型中,横向弯曲振型的半波数大于等于纵桥向弯曲振型的半波数,因此对铰缝损伤的敏感性较其他阶次高。其中,由于第9阶模式对应的振型是三向弯曲,该阶模式对应的横向振型对铰缝损伤的敏感性不如上述几阶。

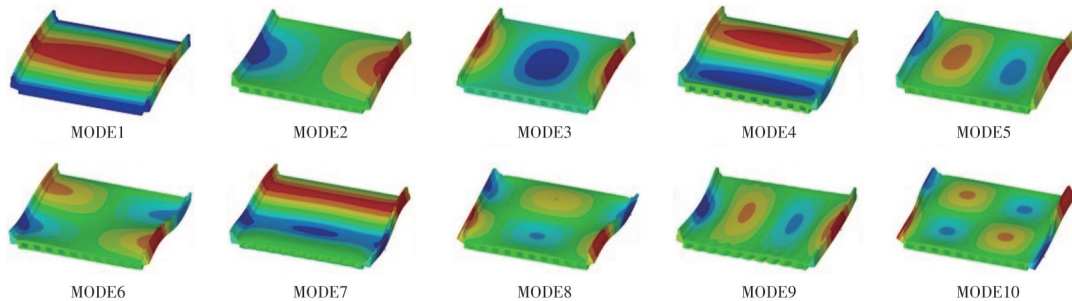


图4 未损伤状态空心板梁桥前10阶振型

Fig. 4 First ten order modal shape of hollow slab bridge in undamaged condition

3.1 频率类指标对各损伤工况的识别

由于频率类指标无法识别损伤的位置,因此不将该指标与其他各类损伤指标进行量化对比。但根据结构固有频率的变化识别损伤是否存在仍是可行的。

从对图4的分析可以看出,以横桥向弯曲振型为主,因此,可以推测铰缝损伤对第3阶、第5阶和第10阶模式对应的固有频率影响较大。各损伤工况对应的正则化频率改变率指标见图5。

每阶模式对应的正则化频率改变率在各损伤程度下的幅值变化并不大,说明在一定程度上该指

标对损伤程度的变化并不敏感。对不同铰缝位置处的损伤,指标幅值较大的阶次并不相同,但可以总结出,第3阶、第5阶、第10阶对应的指标幅值是最明显的。从数值的角度上验证了上述的推测,并且说明了铰缝损伤主要影响横桥向振型假设的合理性。由于该指标对损伤程度的变化并不敏感,选择损伤程度为0.20h,该指标在不同损伤位置下的对比见图6。

对第3阶指标,正则化频率改变率幅值在#5号铰缝损伤时最大;对第5阶指标,正则化频率改变率幅值在#3号铰缝损伤时最大;对第10阶指标,正则

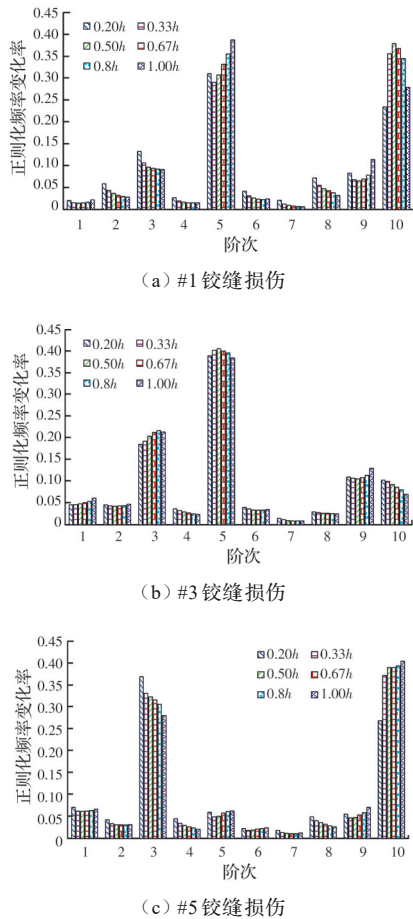


图 5 不同损伤工况下正则化频率改变率
Fig. 5 Normalized frequency change ratio for different damage conditions

化频率改变率幅值在#5号铰缝损伤时最大。显然,不同位置的铰缝损伤对各阶敏感模态的影响也不同。

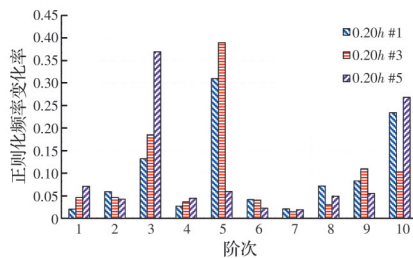


图 6 不同损伤位置下正则化频率变化率
Fig. 6 Normalized frequency change ratio at different damage locations

3.2 横桥向损伤位置不同

仅考虑单处铰缝损伤时,所研究的横桥向铰缝损伤位置如图 7 所示。

以纵桥向跨中截面、损伤程度 0.80h 为例,在图

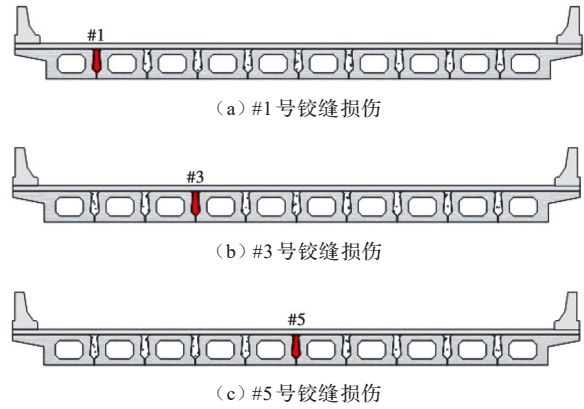


图 7 不同铰缝损伤位置

Fig. 7 Different locations of hinge joint damage

8 中展示了#1、#3和#5号铰缝损伤时所选损伤指标的一致性量化指标 K 值。为便于对比和说明,图 8 中曲率模态变化率以第 1 阶为例。

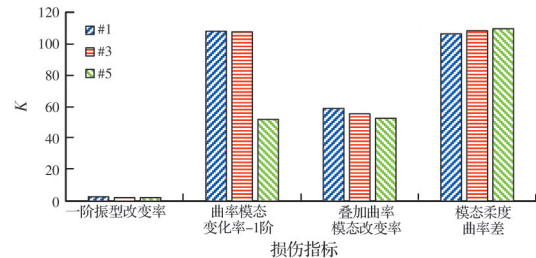


图 8 各损伤指标指示效果

Fig. 8 The indication effect of each damage index

显然,不同类型的损伤指标对不同位置的铰缝损伤识别效果并不相同。可以看到,一阶振型改变率和进行曲率运算(曲率模态变化率、叠加曲率模态变化率、模态柔度曲率差)的损伤指标 K 值差距非常明显,从定量的角度也说明了位移类损伤指标对损伤的灵敏度明显不如曲率类损伤指标。作为损伤指标,曲率类指标更合适。

对于#1~#5是铰缝,两个曲率模态类指标的 K 值都有变小的趋势,说明曲率模态类的损伤指标对于对称中心位置处的损伤敏感性低于非对称位置;而从#1~#5铰缝,模态柔度曲率差的 K 值则有变大的趋势,说明模态柔度曲率差指标对柔度较大位置的损伤敏感性更高。

叠加曲率模态改变率与模态柔度曲率差两个指标综合考虑了多阶模态信息,提高了对不同位置损伤识别的一致性,但也因此失去了单阶模态在识别不同位置损伤时的差异性。而曲率模态变化率指标应用单阶模态信息,存在多阶模态对应的指标,图 9 展示了该指标前 10 阶模态损伤识别效果的变化。

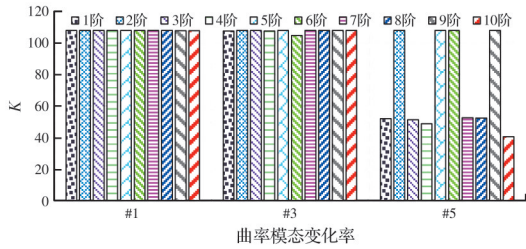


图 9 曲率模态变化率指标各阶次指示效果

Fig. 9 The effect of each order of curvature modal change rate indicator

由图 9 可以看到,在#1号铰缝位置,即边铰缝位置,以及#3号铰缝位置,阶次对曲率模态变化率指标的损伤识别效果没有影响;当#5号铰缝位置损伤时,该指标不同阶次下的损伤识别效果存在明显不同。结合图 4 的振型图可以看到, #1 号和#3号铰缝处损伤时,由于振型的连续性,该指标各阶次在损伤位置处的变化是单向的,因此,各阶次的识别效果接近;而#5号铰缝损伤时,由于不同阶次的横向振型在该位置处有些是曲率零点,有些是曲率极值点,因此,该指标的不同阶次对损伤的表现形式有些为单向突变,如第 2、5、6 和 9 阶,对应横向振型的二阶刚体扭转和二阶竖弯模态;而其他阶次则为双向突变,幅值相对也会低于单向突变的阶次。通过对该指标的分析可以看到,对于横向跨中位置处的铰缝损伤,由于处于振型的对称中心点,因此对于存在多阶次的损伤指标,一方面可以通过叠加多阶模态信息使得其对不同位置损伤的识别更加稳定;另一方面也可以通过对比易损伤位置的分析,选择特定阶次的指标,使其对特定位置的损伤更有针对性。

3.3 纵桥向分析截面不同

进一步对纵桥向不同截面的竖向模态数据进行提取,对比的 9 个截面如图 10 所示。各工况下 9 个分析截面的损伤指标识别效果对比如图 11~图 13 所示。

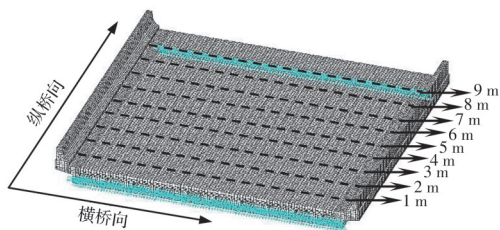


图 10 不同纵桥向分析截面

Fig. 10 Different analytical sections along the longitudinal bridge direction

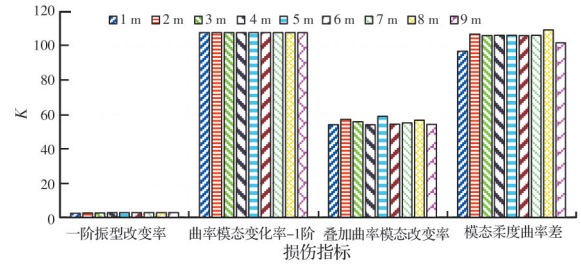


图 11 #1号铰缝损伤时各损伤指标沿纵桥向的指示效果

Fig. 11 The indication effect of each index along the bridge when #1 hinge joint is damaged

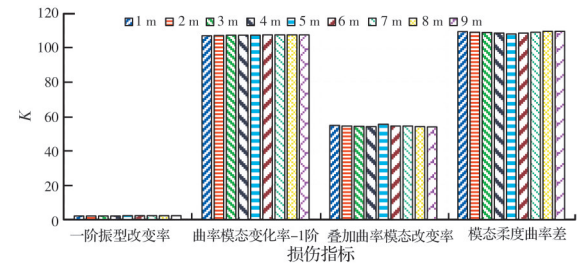


图 12 #3号铰缝损伤时各损伤指标沿纵桥向的指示效果

Fig. 12 The indication effect of each index along the bridge when #3 hinge joint is damaged

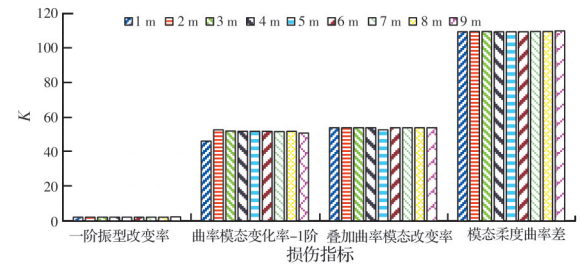


图 13 #5号铰缝损伤时各损伤指标沿纵桥向的指示效果

Fig. 13 The indication effect of each index along the bridge when #5 hinge joint is damaged

由图 11~图 13 可以看出,各指标在不同分析截面位置的 K 值基本相等,说明对不同分析截面各损伤指标的识别效果有很高的一致性,即将纵桥向截面节点竖向振型与横桥向截面节点竖向振型看作是相互独立的,使得横桥向振型构造的相关指标基本不受纵桥向振型的影响。这再次验证了铰缝损伤主要影响横桥向振动特性的假设。

3.4 竖向损伤高度不同

铰缝损伤程度通过损伤高度来表现,针对不同损伤高度的铰缝损伤,对比各损伤指标的指示效果,如图 14 所示。

由图 14 可以看到,随着损伤程度的增加,绿色点线所示的一阶振型改变率损伤指标的 K 值基本

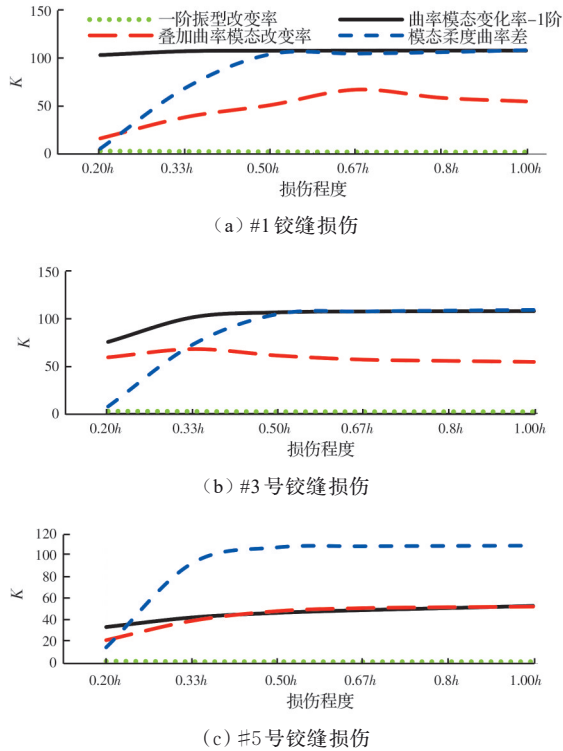


图 14 不同损伤工况下各指标的指示效果

Fig. 14 The indication effect of each index under different damage conditions

一致,表明其对损伤程度的反应也不敏感;曲率类指标对不同损伤程度的反应则是多样化的,并且损伤位置与损伤程度的不同都会影响曲率类指标的识别效果,#1号边铰缝损伤时,1阶曲率模态变化率 K 值基本持平,表明该指标对早期损伤非常敏感,有利于早期微小损伤的识别,但也造成了较大的 K 值,使得实际应用中无法通过该指标了解损伤程度的大小,进而采取合理的措施;模态柔度曲率差 K 值则随着损伤程度的增加呈非线性增加,对于微小或初期损伤的识别不够敏感,对中期及后期损伤的识别效果较好;而模态柔度曲率差 K 值对损伤的敏感度由#5号中铰缝到#1号边铰缝逐渐降低,#1号与#3号铰缝位置损伤时,损伤程度达到 $0.50h$,该指标的 K 值才到极限值,相比于#5号中铰缝,这并不利于对铰缝损伤及时做出决策;叠加曲率模态改变率由于没有考虑各阶次对损伤敏感程度的不同而直接进行了多阶模态信息的叠加,导致该指标的指示效果不一定随着损伤程度的增加而增加;

类似地,由于曲率模态变化率存在多阶指标,为了分析不同阶次下该指标对不同损伤程度识别效果,图 15 所示为各阶次曲率模态变化率的 K 值。

由图 15 可以看到,不同铰缝位置损伤时,都有

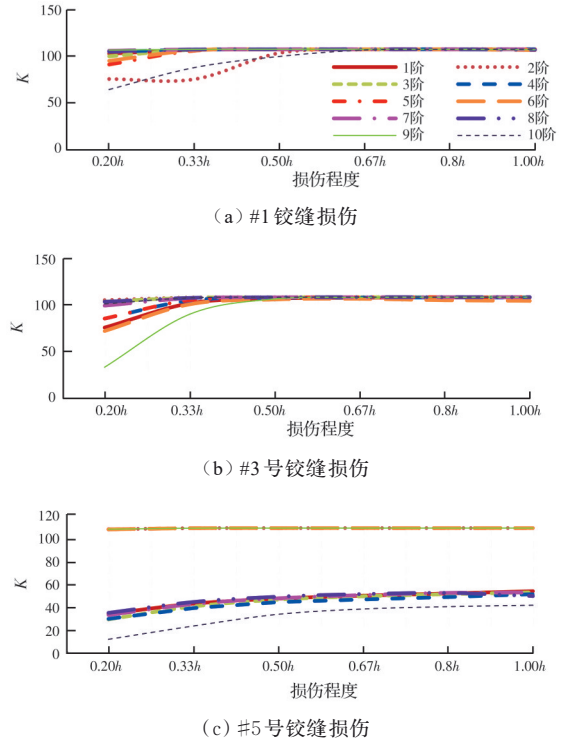


图 15 不同阶次曲率模态变化率不同损伤工况下的指示效果

Fig. 15 The indication effect under different damage conditions with different order curvature modal change rates

几阶曲率模态变化率指标的 K 值线保持水平,并基本重叠在一起。如#1号铰缝位置损伤时,深红色粗线代表的第1阶、灰色方点线代表的第3阶、蓝色短划线代表的第4阶、浅紫色“长划线-点”组合线代表的第7阶、深紫色“长划线-点-点”组合线代表的第8阶和浅绿色细实线代表的第9阶曲率模态变化率指标对不同程度损伤的识别效果基本相同,属于对损伤的敏感阶次,但同样不利于有针对性地给出合理的解决措施。而当#3号铰缝位置损伤时, K 值线保持水平并重叠的阶次为第2阶、第3阶、第7阶、第8阶和第10阶;#5号铰缝位置损伤时, K 值线保持水平并重叠的阶次为第2阶、第5阶、第6阶和第9阶,表明不同损伤位置对各阶曲率模态变化率指标识别效果的影响并不一致。

4 结论

为了验证损伤指标在空心板梁桥实体模型下对铰缝损伤的识别,并对不同损伤指标的识别效果进行量化评价,进行了相关研究,总结了不同损伤工况对损伤指标的影响规律,主要结论如下:

1)频率类损伤指标能够识别损伤是否存在,但无法识别损伤位置;一阶振型改变率的识别效果远

不如求曲率运算的损伤指标。

2)不同横桥向位置的铰缝损伤对不同类型的损伤指标影响不同,由于指标构造的不同,损伤指标受铰缝损伤位置的影响也不同,模态柔度曲率差对中铰缝损伤识别效果更好,而曲率模态类指标对边铰缝损伤的识别效果更好。

3)对于空心板梁桥实体模型,纵桥向振型与横桥向振型可以看作相互独立,即纵桥向不同的分析截面对损伤指标的识别效果影响不大。

4)损伤指标的指示效果随着铰缝损伤程度的增加呈非线性增加,当损伤到一定程度时,指标的指示效果也不会随着损伤程度的增加产生较大的变化。

5)铰缝损伤主要影响以横桥向弯曲振动为主的模态,由于空心板梁桥的振型可以看作横桥向振型与纵桥向振型的组合,两个方向对整体振型的贡献并不相同,这一点由频率类指标可以看出,这也造成了识别空心板梁桥损伤与识别梁结构损伤的差别。

参考文献

- [1] 卫军, 李沛, 徐岳, 等. 空心板铰缝协同工作性能影响因素分析[J]. 中国公路学报, 2011, 24(2): 29-33.
WEI J, LI P, XU Y, et al. Influencing factor analysis on coordinated working performance of hinge joint in hollow slab [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(2): 29-33. (in Chinese)
- [2] SARGAND S M, WALSH K K, HUSSEIN H H, et al. Modeling the shear connection in adjacent box-beam bridges with ultrahigh-performance concrete joints. II: Load transfer mechanism [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(8): 04017044.
- [3] JIANG H B, DONG X T, FANG Z C, et al. Experimental study on shear behavior of a UHPC connection between adjacent precast prestressed concrete voided beams [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(12): 04020106.
- [4] ZHAN J W, ZHANG F, SIAHKOUHI M, et al. A damage identification method for connections of adjacent box-beam bridges using vehicle-bridge interaction analysis and model updating [J]. Engineering Structures, 2021, 228: 111551.
- [5] QU C X, YI T H, YAO X J, et al. Complex frequency identification using real modal shapes for a structure with proportional damping [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2021, 36(10): 1322-1336.
- [6] QU C X, YI T H, LI H N. Mode identification by eigensystem realization algorithm through virtual frequency response function [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2019, 26(10): e2429.
- [7] 伊廷华, 周广东, 曲春绪, 等. 结构运营模态测-辨相和理论[J]. 土木工程学报, 2020, 53(10): 72-81, 88.
YI T H, ZHOU G D, QU C X, et al. Intercoordination theory of testing and identification for structural operational modes [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(10): 72-81, 88. (in Chinese)
- [8] 单德山, 罗凌峰, 李乔. 桥梁健康监测2019年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 115-125.
SHAN D S, LUO L F, LI Q. State-of-the-art review of the bridge health monitoring in 2019 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(5): 115-125. (in Chinese)
- [9] 夏倩, 沈淳珂, 李建爽, 等. 复杂交通环境激励下西安城墙模态参数识别与分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(2): 174-183.
XIA Q, SHEN C K, LI J S, et al. Modal parameter identification and analysis of Xi'an City Wall under complex traffic environment [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(2): 174-183. (in Chinese)
- [10] 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, 96.
LIU Y L, SHI S P, LIAO W. Bridge damage identification using curvature mode shapes [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(8): 77-81, 96. (in Chinese)
- [11] 张晋, 彭华, 游春华. 基于叠加曲率模态改变率的梁结构损伤诊断[J]. 工程力学, 2012, 29(11): 272-276, 301.
ZHANG J, PENG H, YOU C H. Damage diagnosis of beam structures based on superimposed curvature modal change rate [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(11): 272-276, 301. (in Chinese)
- [12] 曹晖, Friswell Michael I. 基于模态柔度曲率的损伤检测方法[J]. 工程力学, 2006, 23(4): 33-38.
CAO H, FRISWELL M I. Nondestructive damage evaluation indicator based on modal flexibility curvature [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(4): 33-38. (in Chinese)
- [13] 郭惠勇, 盛懋. 基于模态应变能的不同损伤指标对比[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(5): 444-450.
GUO H Y, SHENG M. Comparison of different damage indices based on modal strain energy [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(5): 444-450. (in Chinese)
- [14] 肖凯龙, 邬晓光, 安平, 等. 多梁式桥梁检测的叠加曲率模态差变化率方法[J]. 重庆大学学报, 2019, 42

- (11): 108-116.
- XIAO K L, WU X G, AN P H, et al. Method of mode difference change rate of superposition curvature for multi-beam bridge detection [J]. Journal of Chongqing University, 2019, 42(11): 108-116. (in Chinese)
- [15] 狄生奎, 李永广, 项长生, 等. 基于模态曲率差归一化的简支梁损伤识别[J]. 沈阳工业大学学报, 2022, 44(4): 451-460.
- DI S K, LI Y G, XIAO C S, et al. Damage identification of simply supported beam based on normalization of modal curvature difference [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2022, 44(4): 451-460. (in Chinese)
- [16] 唐盛华, 罗承芳, 方志, 等. 基于柔度矩阵曲率范数差的结构损伤识别方法[J]. 应用力学学报, 2020, 37(3): 982-989, 1385.
- TANG S H, LUO C F, FANG Z, et al. Structural damage identification method based on curvature norm difference of modal flexibility matrix [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(3): 982-989, 1385. (in Chinese)
- [17] 卫军, 杜永潇, 吴志强, 等. 基于模态应变能和 Bayes 理论的梁结构损伤识别[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(8): 2052-2061.
- WEI J, DU Y X, WU Z Q, et al. Damage identification of beam structures based on modal strain energy and Bayesian data fusion theory [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(8): 2052-2061. (in Chinese)
- [18] 杨海峰, 吴子燕, 孙蓬, 等. 基于逆有限元的应变模态损伤检测方法[J]. 振动测试与诊断, 2017, 37(1): 147-152, 205.
- YANG H F, WU Z Y, SUN P, et al. Strain modal method for damage detection based on iFEM [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(1): 147-152, 205. (in Chinese)
- [19] 中华人民共和国交通部. 公路桥梁通用图 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- Ministry of Communications of the People's Republic of China. General drawings of roads and bridges [M]. Beijing: People's Communications Press, 2008. (in Chinese)
- [20] PANDEY A K, BISWAS M, SAMMAN M M. Damage detection from changes in curvature mode shapes [J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 145(2): 321-332.
- [21] KAMINSKI P C. The approximate location of damage through the analysis of natural frequencies with artificial neural networks [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 1995, 209(2): 117-123.
- [22] 郭国会, 易伟建. 基于模态参数进行连续梁损伤诊断的数值研究[J]. 振动与冲击, 2001, 20(1): 72-75.
- GUO G H, YI W J. A numerical study on damage diagnosis of a continuous beam using modal parameters [J]. Journal of Vibration and Shock, 2001, 20(1): 72-75. (in Chinese)
- [23] 张勇, 静行, 袁海庆. 基于曲率模态变化率指标的结构损伤识别[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2010, 27(2): 82-86.
- ZHANG Y, JING H, YUAN H Q. Structural damage detection based on change rate of curvature mode [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition), 2010, 27(2): 82-86. (in Chinese)
- [24] 吴秀峰, 常青. 柔度曲率法在输电塔损伤识别中的应用[J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(4): 174-177, 205.
- WU X F, CHANG Q. Application of flexibility curvature method in damage detection of transmission towers [J]. Noise and Vibration Control, 2016, 36(4): 174-177, 205. (in Chinese)
- [25] WESTFALL P H. Kurtosis as peakedness, 1905-2014. R. I. P [J]. The American Statistician, 2014, 68(3): 191-195.
- [26] 王金桥, 战家旺, 张宝和. 简支多片空心板梁桥模态试验研究[J]. 城市道桥与防洪, 2012, 157(6): 300-302.
- WANG J Q, ZHAN J W, ZHANG B H. Study on modal test of simple-supported multi-sheet hollow plate girder bridge [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2012, 157(6): 300-302. (in Chinese)
- [27] XU Z Y, DAN D H, DENG L. Vibration-based monitoring for transverse cooperative working performance of assembled concrete multi-girder bridge: System design, implementation and preliminary application [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2021, 21(3): 2150043.

(编辑 胡玲)