

引用本文: 亓兴军, 亓圣, 孙绪法, 等. 基于模态测试和等效荷载的装配式简支梁桥刚度快速评估[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(4): 117-124.

QI Xingjun, QI Sheng, SUN Xufa, et al. Rapid stiffness evaluation of prefabricated simply supported beam bridge based on modal test and equivalent load[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(4): 117-124.

DOI: 10.19815/j.jace.2021.08034

基于模态测试和等效荷载的装配式简支梁桥刚度快速评估

亓兴军¹, 亓圣¹, 孙绪法¹, 王珊珊²

(1. 山东建筑大学 交通工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东高速集团有限公司, 山东 济南 250098)

摘要: 把不中断交通的模态测试方法和传统可靠的静力荷载试验方法相结合, 提出了装配式简支梁桥刚度快速评估的等效荷载模态挠度测试方法; 以装配式简支空心板桥梁为研究对象, 建立无损伤和有损伤状态的有限元模型, 提取冲击激励下主梁指定测点的竖向加速度, 识别桥梁结构的模态参数, 预测主梁位移柔度矩阵; 根据《公路桥梁荷载试验规程》设计静力荷载试验的等效荷载, 确定等效荷载作用下有损伤桥梁跨中的实测模态挠度; 根据有限元无损状态的理论挠度计算挠度校验系数, 结合规范快速评估损伤桥梁的刚度状况, 并通过对桥梁跨中模态挠度和理论挠度的偏差分析, 探究了不同测点布置以及不同模态阶次对预测模态挠度的影响。结果表明: 在冲击激励下, 无论是采用跨中及四分之一跨共 18 个测点方案, 还是仅跨中 9 个测点方案, 都能够准确识别到桥梁前 3 阶模态参数且预测的模态挠度偏差均低于 5%, 满足工程精度的要求; 采用前 3 阶模态参数与采用前 4 阶模态参数预测的跨中模态挠度相同, 即简支梁第 2 个纵向竖弯振型对跨中模态挠度的预测没有贡献; 从振动理论和测试方法上验证了基于模态测试和等效荷载可以实现简支梁刚度的快速评估, 具有较好的实际工程应用价值。

关键词: 简支梁桥; 刚度; 快速评估; 等效荷载; 模态挠度

中图分类号: TU311

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2023)04-0117-08

Rapid stiffness evaluation of prefabricated simply supported beam bridge based on modal test and equivalent load

QI Xingjun¹, QI Sheng¹, SUN Xufa¹, WANG Shanshan²

(1. School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China;

2. Shandong Hi-speed Group Co., Ltd., Jinan 250098, Shandong, China)

Abstract: Combining the modal test method without interrupting traffic with traditional reliable static load test methods, an equivalent load modal deflection test method for rapid stiffness evaluation of prefabricated simply supported beam bridges was proposed. Taking prefabricated simply supported hollow slab bridges as the research object, finite element models for undamaged and damaged states were established. The vertical acceleration of the designated measurement point of the main beam under impact excitation was extracted, the modal parameters of the bridge

收稿日期: 2021-08-11

基金项目: 山东省交通运输厅科技计划项目(2020B69); 山东省高等学校土木结构防灾减灾协同创新中心项目(XTM201904)

作者简介: 亓兴军(1974-), 男, 工学博士, 教授, 硕士生导师, E-mail: qxj123@163.com.

structure was identified and the displacement flexibility matrix of the main beam was predicted. According to *Load Test Methods for Highway Bridge*, the equivalent load for static load test was designed, and the measured modal deflection of the damaged bridge midspan under the equivalent load was determined. The deflection calibration coefficient was calculated based on the theoretical deflection of the finite element undamaged state, and the stiffness of the damaged bridge was quickly evaluated in combination with the specifications. Through the error analysis of the mid-span modal deflection and theoretical deflection of the bridge, the influence of different measurement point arrangements and different modal orders on the predicted modal deflection was explored. The results show that under impact excitation, whether using a total of 18 measurement points in the midspan and quarter span scheme or only 9 measurement points in the midspan scheme, the first three modal parameters of the bridge can be accurately identified and the predicted modal deflection error is less than 5%, meeting the requirements of engineering accuracy. Using the first three modal parameters is the same as using the first four modal parameters to predict the midspan modal deflection, that is, the second longitudinal vertical bending mode of a simply supported beam does not contribute to the prediction of midspan modal deflection. From the perspective of vibration theory and testing methods, it is demonstrated that rapid stiffness evaluation of simply supported beams can be achieved based on modal testing and equivalent loads, which has good practical engineering application value.

Key words: simply supported beam bridge; stiffness; rapid evaluation; equivalent load; modal deflection

0 引言

桥梁是道路的重要组成部分,是交通工程中的关键性枢纽,在交通和交通发展中起着非常重要的作用^[1-2]。据交通运输部权威统计数据,截至2020年底,中国公路桥梁总里程已达 520×10^4 km,桥梁总数已达91.28万座,其中中小跨度桥梁更是超过了78.64万座,占总数的86%以上。装配式简支梁桥以其预制方便、用材经济、便于运输和吊装等优点,成为中小跨径公路桥梁应用最广泛的桥型之一^[3]。然而随着交通量持续增加和超载现象时有发生,服役桥梁在外部荷载的作用下损伤现象严重,倒塌事故屡见报道,运营状况堪忧^[4-6]。因此,对桥梁结构尤其是病旧桥梁及时作出准确的工作性能评估尤为重要。

目前,对桥梁结构的性能评估主要依靠荷载试验,桥梁荷载试验包括静载试验法和动载试验法^[7-8]。石永燕等^[9]根据桥梁静载试验的试验原理,提出了加载安全解域的边界问题,在理论和算法上解决了桥梁静荷载试验加载过程中的安全性问题;Catbas等^[10-11]利用柔度矩阵对低阶模态参数灵敏度高的特性实现桥梁损伤的识别与桥梁承载能力的初步评估;邹兰林^[12]以频率校验系数为指标,通过

建立频率校验系数与跨中挠度校验系数的关系来评估桥梁结构的工作性能;Tian等^[13-15]利用自己研发的冲击装置对大跨径桥梁进行了多参考冲击试验和静力试验,研究得出结构的预测挠度和计算挠度吻合较好;林贤坤等^[16-17]验证了基于不中断交通运行模态分析的模态挠度法在实际工程中应用于桥梁状态评估的可行性与有效性。

静载试验在桥梁检测中已经形成了成熟的体系,但是动载试验目前多通过桥梁结构的频率、振型等指标对结构性能进行粗略评估。因此,本文提出一种基于模态挠度和等效荷载的装配式简支梁桥刚度快速评估方法。对于结构来说,刚度是影响其工作性能的重要因素,结构刚度的改变必然引起其使用性能的变化,所以对于混凝土简支梁桥的性能评估主要从刚度着手^[18-20]。基本流程为:①对服役桥梁进行冲击激励,提取指定测点的竖向加速度时程响应,通过模态分析识别桥梁结构的频率、振型等模态参数;②将识别的振型进行质量归一化,计算桥梁的位移柔度矩阵,以便进行模态挠度的预测;③利用ANSYS有限元软件,结合原设计资料建立无损桥梁模型,计算荷载试验加载效率,确定均布等效荷载;④预测等效荷载下服役桥梁的跨中模态挠度,计算桥梁的挠度校验系数,结合规范快速评估服役桥

梁的刚度状况。该试验方法无需长时间中断交通或利用交通车流间隙进行桥梁试验,方便快捷,对于数量众多的中小型桥梁应用前景广泛。

本文以 16 m 跨径装配式空心板简支桥梁为研究对象,建立有限元模型,探讨基于模态测试和等效荷载快速评估装配式简支梁桥刚度的有效性和可行性。

1 基本理论

根据振型的正交性得

$$\left. \begin{aligned} \text{diag}(\mathbf{M}_i) &= \boldsymbol{\phi}^T \mathbf{M} \boldsymbol{\phi} \\ \text{diag}(\mathbf{C}_i) &= \boldsymbol{\phi}^T \mathbf{C} \boldsymbol{\phi} \\ \text{diag}(\mathbf{K}_i) &= \boldsymbol{\phi}^T \mathbf{K} \boldsymbol{\phi} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵; $\boldsymbol{\phi}$ 为位移振型矩阵, $\boldsymbol{\phi} = [\boldsymbol{\phi}_1 \ \boldsymbol{\phi}_2 \ \cdots \ \boldsymbol{\phi}_i]$, $\boldsymbol{\phi}_i$ 为对应的第 i 阶位移振型向量。

由式(1)可知,识别的结构任意位移振型 $\boldsymbol{\phi}_i$ 满足正交性条件,可对结构的质量矩阵和刚度矩阵按照式(2)或式(3)进行对角化。

$$\left. \begin{aligned} \boldsymbol{\phi}^T \mathbf{M} \boldsymbol{\phi} &= \text{diag}(\mathbf{M}_i) \\ \boldsymbol{\phi}^T \mathbf{K} \boldsymbol{\phi} &= \text{diag}(\mathbf{K}_i) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \boldsymbol{\phi}_i^T \mathbf{M} \boldsymbol{\phi}_i &= m_i \\ \boldsymbol{\phi}_i^T \mathbf{K} \boldsymbol{\phi}_i &= k_i \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

对于第 i 阶模态,当存在位移振型 $\bar{\boldsymbol{\phi}}_i$, 满足 $\bar{\boldsymbol{\phi}}_i^T \mathbf{M} \bar{\boldsymbol{\phi}}_i = m_i = \mathbf{I}$ 时,称 $\bar{\boldsymbol{\phi}}_i$ 为质量归一化位移振型,相应的振型矩阵 $\bar{\boldsymbol{\Phi}}_i^T$ 为质量归一化位移振型矩阵。

一个结构的质量矩阵是确定的,其对应的某阶质量归一化位移振型也是确定的。模态特征值分析计算的或进行模态分析识别的某阶位移振型 $\boldsymbol{\phi}_i$ 不一定刚好就是质量归一化的位移振型,其与对应的质量归一化位移振型 $\bar{\boldsymbol{\phi}}_i$ 之间存在比例系数 a_i ,如式(4)所示。

$$\bar{\boldsymbol{\phi}}_i = \boldsymbol{\phi}_i / a_i \quad (4)$$

将其代入 $\bar{\boldsymbol{\phi}}_i^T \mathbf{M} \bar{\boldsymbol{\phi}}_i = 1$ 可以求得比例系数 a_i ,即

$$a_i = \sqrt{\boldsymbol{\phi}_i^T \mathbf{M} \boldsymbol{\phi}_i} \quad (5)$$

将质量归一化的位移振型矩阵代入式(2)得

$$\left. \begin{aligned} \bar{\boldsymbol{\Phi}}^T \mathbf{M} \bar{\boldsymbol{\Phi}} &= \text{diag}(\mathbf{m}_i) = \mathbf{I} \\ \bar{\boldsymbol{\Phi}}^T \mathbf{K} \bar{\boldsymbol{\Phi}} &= \text{diag}(\bar{\mathbf{k}}_i) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: \mathbf{I} 为单位矩阵; \mathbf{m}_i 、 $\bar{\mathbf{k}}_i$ 分别为模态质量矩阵、模态刚度矩阵。

在 $\bar{\boldsymbol{\Phi}}$ 为方阵且满秩的情况下,可对式(6)的第 2 式两边同时左乘 $(\bar{\boldsymbol{\Phi}}^T)^{-1}$ 、右乘 $\bar{\boldsymbol{\Phi}}^{-1}$ 得到结构的刚度矩阵为

$$\mathbf{K} = (\bar{\boldsymbol{\Phi}}^T)^{-1} \text{diag}(\bar{\mathbf{k}}_i) \bar{\boldsymbol{\Phi}}^{-1} \quad (7)$$

结构的位移柔度矩阵 \mathbf{F}^d 为刚度矩阵 \mathbf{K} 的逆矩阵,如式(8)所示。

$$\mathbf{F}^d = \mathbf{K}^{-1} = \bar{\boldsymbol{\Phi}} \text{diag}\left(\frac{1}{\bar{\mathbf{k}}_i}\right) \bar{\boldsymbol{\Phi}}^T = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{\boldsymbol{\phi}}_i \bar{\boldsymbol{\phi}}_i^T}{\bar{\mathbf{k}}_i} \quad (8)$$

模态质量矩阵 \mathbf{m}_i 、模态刚度矩阵 $\bar{\mathbf{k}}_i$ 和固有频率矩阵 \mathbf{w}_i 之间关系为

$$\mathbf{w}_i = \sqrt{\frac{\bar{\mathbf{k}}_i}{\mathbf{m}_i}} \quad (9)$$

与质量归一化位移振型 $\bar{\boldsymbol{\phi}}_i$ 对应的 $\mathbf{m}_i = \mathbf{I}$, 所以 $\bar{\mathbf{k}}_i = \mathbf{w}_i^2$, 将其代入式(8)得到最终的位移柔度矩阵计算公式为

$$\mathbf{F}^d = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{\boldsymbol{\phi}}_i \bar{\boldsymbol{\phi}}_i^T}{\mathbf{w}_i^2} \quad (10)$$

式中: n 为识别的总模态阶数。

通过式(10)计算得到的柔度矩阵可得

$$\boldsymbol{\Delta} = \mathbf{F}^d \mathbf{f} \quad (11)$$

式中: $\boldsymbol{\Delta}$ 为主梁的模态挠度; \mathbf{f} 为作用于主梁上的集中力形成的矩阵。

2 桥梁有限元模型

选取 16 m 跨径装配式空心板简支桥梁为研究对象,全桥由 9 片预应力空心板组成,空心板桥梁横截面如图 1 所示。板与板之间依靠铰缝进行横向联系,其连接刚性薄弱,因此可假设铰缝仅传递竖向剪力不传递弯矩。采用 ANSYS 有限元软件建立梁格模型,主梁用 Beam4 单元,单元长度为 0.4 m,弹性模量为 3.5×10^{10} Pa,泊松比为 0.2,材料密度为 $2\,500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;主梁间的横向联系采用虚拟横梁,截面形状为“二字形”,相邻横梁间距为 0.8 m,同样为 Beam4 单元,弹性模量为 3.5×10^{10} Pa,泊松比为 0.2,材料密度为 $0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,在每条铰缝位置处通过耦合虚拟横梁单元之间的自由度模拟铰缝,耦合 X、Y、Z 三个方向的平动自由度,将转动自由度全部放松,从而实现铰接;混凝土铺装采用 Shell63 单元,材料类型和主梁相同,厚度为 0.1 m;通过约束桥梁两端的自由度来模拟简支梁的边界条件,桥梁无损有限元模型如图 2 所示。

3 模态参数识别

为模拟冲击激励,在桥梁有限元模型中施加节点冲击荷载,冲击位置为 1[#] 梁四分之一跨节点,冲击荷载为 18 kN,依据主梁振型特点和控制截面位置设计两种测点布置方式,测点布置方式一为在 9

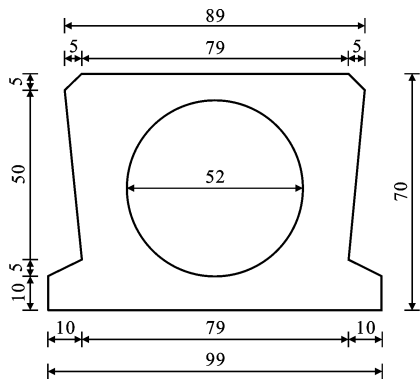


图 1 空心板桥梁横截面(单位:cm)

Fig. 1 Cross section of hollow slab bridge (unit:cm)

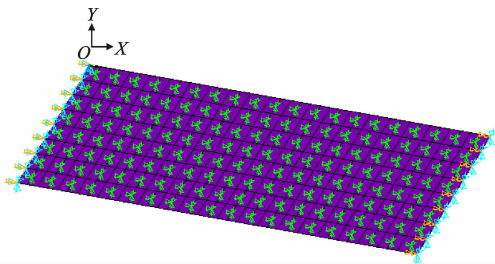


图 2 空心板桥梁无损有限元模型

Fig. 2 Undamaged finite element model of hollow slab bridge

片梁四分之一跨和跨中共布置 18 个测点;测点布置方式二为仅在 9 片梁跨中布置 9 个测点。对于测点布置方式一和测点布置方式二,分别提取冲击荷载作用下桥梁有限元模型各测点的竖向振动加速度时程响应数据,利用随机子空间法等模态参数识别方法识别桥梁的频率和振型,然后采用式(10)计算桥梁的位移柔度矩阵。

4 模态挠度准确性分析

在基于模态测试和等效荷载的装配式简支梁桥刚度快速评估中,通过模态试验获取包含桥梁信息的模态参数,结合等效荷载来计算实际桥梁的模态挠度,通过挠度校验系数便能够准确地评估桥梁的刚度,将动载试验与静载试验的优点有效结合,既能够高效快速地进行实际桥梁的测试,又能够准确地反映桥梁的工作性能。因此模态挠度的准确性和有效性是至关重要的,需考虑模态阶次的选取、测点布置对模态挠度的影响。

4.1 桥梁等效荷载计算

基于原设计无损桥梁有限元模型计算荷载试验的加载效率,确定两种测点布置方式对应的均布等效荷载,根据《公路桥梁荷载试验规程》的规定,加载

效率 η_q 按式(12)计算,宜介于 0.95~1.05 之间。

$$\eta_q = \frac{S_s}{S(1+\mu)}$$
 (12)

式中: S_s 为某一加载试验项目对应的加载控制截面内力或位移的最大计算效应值; S 为控制荷载产生的同一加载控制截面内力或位移的最不利效应计算值; μ 为冲击系数值,当基频 $1.5\text{ Hz} \leq f \leq 14\text{ Hz}$ 时, $\mu=0.176\,711\ln(f)-0.015\,7$ 。

经试算,与测点布置方式一相对应的等效荷载为每个测点施加 66 kN 的集中力,加载效率为 0.98;与测点布置方式二相对应的等效荷载为每个测点施加 112 kN 的集中力,加载效率为 0.98,两者均满足规范要求。

4.2 模态阶次对模态挠度的影响

理论上,如果能够识别到足够多的模态阶次用于计算结构的模态位移,其与静挠度在数值上是一致的。然而由于实际桥梁试验中传感器的布置方式及各种不利因素的影响,导致丢失部分模态信息或者无法准确识别到高阶模态参数,因此在保证模态参数识别精度的情况下,首先应当确定合理的模态阶次。利用测点布置方式一识别不同阶次的模态参数,计算其等效荷载作用下无损桥梁的跨中模态挠度,与有限元静力法得到的理论挠度进行对比,结果如表 1 所示。

表 1 模态挠度与理论挠度偏差

Table 1 Error of modal deflection and theoretical deflection

跨中节点编号	理论挠度/mm	前 3 阶模态挠度/mm	$\sigma_1/\%$	前 4 阶模态挠度/mm	$\sigma_2/\%$
1	7.81	8.16	4.5	8.16	4.5
2	7.81	8.16	4.5	8.16	4.5
3	7.81	8.15	4.4	8.15	4.4
4	7.81	8.14	4.2	8.14	4.2
5	7.81	8.13	4.1	8.13	4.1
6	7.81	8.14	4.2	8.14	4.2
7	7.81	8.16	4.5	8.16	4.5
8	7.81	8.17	4.6	8.17	4.6
9	7.81	8.17	4.6	8.17	4.6

注: σ_1 为前 3 阶模态挠度与理论挠度的偏差; σ_2 为前 4 阶模态挠度与理论挠度的偏差。

由表 1 数据可知,采用前 3 阶识别模态参数和前 4 阶识别模态参数计算的跨中模态挠度相同,且两者偏差均低于 5%,满足工程精度的要求。在实际桥梁动力测试和试验时,由于第 4 阶模态参数对跨中挠度计算的贡献较小,因此仅采用前 3 阶模态参数即可准确地预测等效荷载作用下跨中的模态

挠度。

4.3 测点布置对模态挠度的影响

在桥梁模态参数的获取中,传感器的选取和布置将直接影响后期模态参数的识别和试验的可靠程度。传感器本身作为一个矛盾体,一方面要保证采集的数据能够真实反映桥梁的实际状况,需要在桥面布置尽量多的传感器;另一方面要兼顾经济性和试验的方便快捷,减少对交通的影响,传感器设备又不宜过多,因此,需要合理控制传感器的数量。分别选取两种测点布置方式下识别的前 3 阶模态参数,确定无损桥梁结构的位移柔度矩阵 F^d ,结合等效荷载形成的集中力矩阵 f ,代入式(11),将 9 片板梁跨中的模态挠度与有限元理论挠度进行对比分析,结果如表 2、3 所示。

表 2 测点布置方式一模态挠度与理论挠度偏差

Table 2 Error of mode deflection and theoretical deflection of measuring point arrangement 1

跨中节点编号	理论挠度/mm	模态挠度/mm	偏差/%
1	7.81	8.16	4.5
2	7.81	8.16	4.5
3	7.81	8.15	4.4
4	7.81	8.14	4.2
5	7.81	8.13	4.1
6	7.81	8.14	4.2
7	7.81	8.16	4.5
8	7.81	8.17	4.6
9	7.81	8.17	4.6

表 3 测点布置方式二模态挠度与理论挠度偏差

Table 3 Error of mode deflection and theoretical deflection of measuring point arrangement 2

跨中节点编号	理论挠度/mm	模态挠度/mm	偏差/%
1	7.85	8.18	4.2
2	7.85	8.19	4.3
3	7.85	8.18	4.2
4	7.85	8.16	3.9
5	7.85	8.15	3.8
6	7.85	8.16	3.9
7	7.85	8.18	4.2
8	7.85	8.20	4.5
9	7.85	8.19	4.3

由表 2、3 可知,两种测点布置方式下通过识别模态参数预测的模态挠度与有限元法计算挠度的最大偏差不超过 5%,均满足工程精度的要求,且测点布置方式二的模态挠度偏差相较小,因此,采用测点布置方式二便可较为精确地预测装配式简支梁桥在跨中等效荷载下的跨中测点模态挠度,既能够保证

试验结果的准确性还兼具很好的经济性。

5 有损桥梁的模态参数识别

由于空心板桥梁铰缝处的混凝土刚度普遍较弱,容易产生纵向裂缝,导致“单板受力”,损伤位置处的主梁也往往存在疲劳损伤。为更加贴近实际桥梁的损伤状况,本文通过释放铰缝处相邻虚拟横梁单元的自由度来模拟铰缝损伤,损伤位置为 1[#]-2[#]、3[#]-4[#]、5[#]-6[#] 梁跨中处铰缝,损伤长度为 4 m;将 1[#]~5[#] 主梁跨中弹性模量降低 30%来模拟疲劳损伤,损伤长度为 1.6 m,图 3 为桥梁损伤有限元模型。

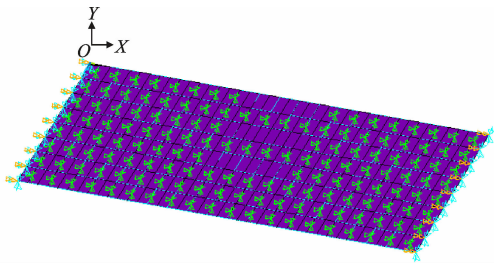


图 3 空心板桥梁损伤有限元模型

Fig. 3 Damage finite element model of hollow slab bridge

分别提取两种测点布置方式下损伤桥梁有限元模型相应测点的加速度时程数据,利用随机子空间法等模态参数识别方法识别损伤桥梁的频率和振型,表 4 为频率识别结果,图 4、5 为振型识别结果。

表 4 识别频率

Table 4 Recognition frequencies

阶次	1	2	3	4
理论频率/Hz	5.967	10.214	17.903	24.286
测点布置方式一识别频率/Hz	5.899	9.884	16.308	20.745
σ_3 /%	1.1	3.2	8.9	14.6
测点布置方式二识别频率/Hz	5.899	9.883	16.307	
σ_4 /%	1.1	3.2	8.9	

注: σ_3 为测点布置方式一识别频率与理论频率的偏差; σ_4 为测点布置方式二识别频率与理论频率的偏差。

观察表 4 中数据,识别频率偏差基本不超过 10%,满足工程精度的要求,两种测点布置方式前 3 阶识别频率几乎相同,但由于布置方式二的测点处于第 4 阶模态节点,而模态节点处的振型值为 0,传感器捕捉不到该阶模态的时域响应,故识别不到第 4 阶模态参数。

为验证识别振型的准确性,利用公式(13)计算理论振型与识别振型的振型相关系数(MAC)值 R 。

$$R(\phi_{iE}, \phi_{iT}) = \frac{|\phi_{iE}^T \phi_{iT}|}{\phi_{iE}^T \phi_{iE} \phi_{iT}^T \phi_{iT}} \quad (13)$$

式中: ϕ_{iE} 为第 i 阶试验模态振型列向量; ϕ_{iT} 为第 i 阶

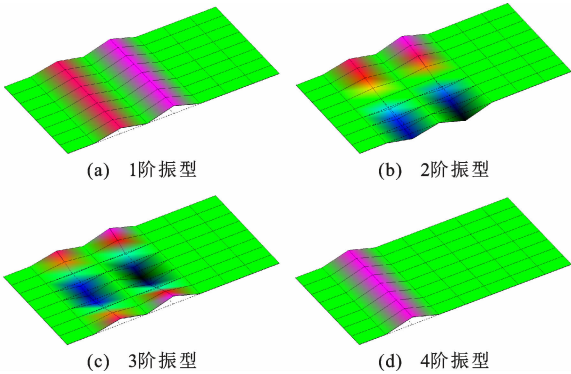


图 4 测点布置方式一前 4 阶识别振型

Fig. 4 The first four orders vibration mode identification of measuring point arrangement 1

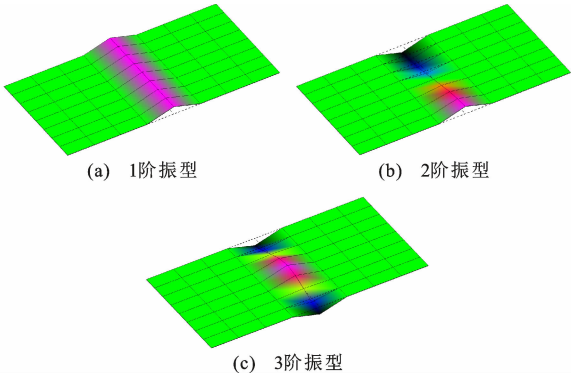


图 5 测点布置方式二前 3 阶识别振型

Fig. 5 The first three orders vibration mode identification of measuring point arrangement 2

有限元理论模态振型列向量。

对于同一阶振型,若 MAC 值等于 1,则表示识别的模态振型向量与有限元模态振型向量完全一致,MAC 值越接近 1,说明识别的振型与理论振型越吻合。若 MAC 值等于 0,则表示两个振型向量是正交的,即识别的模态振型向量和有限元模态振型向量没有线性关系。对于同一阶振型而言,理论振型与识别振型的 MAC 值越接近 0,说明识别的振型精度太差,无法反映结构的实际振动状态。两种测点布置方式下桥梁结构的识别振型与理论振型的相关系数如表 5 所示。

表 5 桥梁振型 MAC 值				
测点布置方式	MAC 值			
	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶
方式一	1.00	1.00	1.00	0.99
方式二	1.00	1.00	1.00	

通过观察两种测点布置方式的振型图,尽管无法显示全桥振型,但从局部的振型形状结合理论振

型,仍能够准确判断振型所属阶次,计算识别振型与有限元理论振型的相关系数,均大于 0.99,说明识别结果可靠。

由于位移柔度矩阵具有快速的模态收敛性,高阶模态参数对位移柔度矩阵的贡献显著减小,所以一般结构只需要用前几阶模态参数就能够得到足够精度的位移柔度矩阵。将识别的振型进行质量归一化后,代入式(10)求得位移柔度矩阵,位移柔度矩阵中的某个元素 δ_{ij} 表示在节点 i 施加单位力时节点 j 产生的静力挠度值,为直观地观察桥梁的柔度矩阵,给出测点布置方式二对应的柔度矩阵三维图,如图 6 所示。

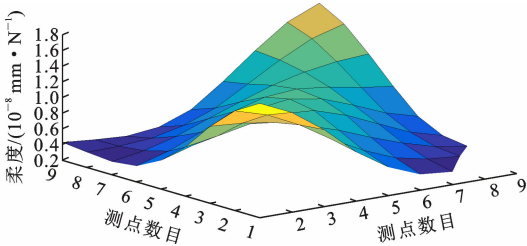


图 6 测点布置方式二的柔度矩阵三维图

Fig. 6 Three-dimensional diagram of compliance matrix of measuring point arrangement 2

6 简支桥梁刚度评估

根据《公路桥梁荷载试验规程》计算两种测点布置方式下损伤桥梁在相应的等效荷载工况下的挠度校验系数,挠度校验系数按照式(14)计算。

$$\eta = \frac{S_c}{S_e} \tag{14}$$

式中: η 为挠度校验系数; S_e 为试验荷载作用下主要测点的实测弹性位移值; S_c 为试验荷载作用下主要测点的理论计算位移值。

测点布置方式一和测点布置方式二在各自对应的等效荷载作用下,损伤桥梁跨中的挠度校验系数计算结果如表 6、7 所示。

由表 6、7 可知,不管是测点布置方式一还是测点布置方式二,在各自对应的等效荷载作用下,损伤桥梁跨中测点对应的挠度校验系数均大于 1,且损伤位置处由于铰缝的开裂和主梁弹性模量的折减,结构各部分连接性能差,安全储备相对较低,校验系数明显大于未损伤位置,因此该损伤桥梁的刚度存在明显的下降,承载力不满足规范要求。

7 结 语

(1)在冲击荷载作用下,利用测点布置方式一和

表 6 测点布置方式一挠度校验系数

Table 6 Deflection check coefficient of measuring point arrangement 1

跨中节点编号	无损桥梁理论 挠度/mm	有损桥梁模态 挠度/mm	挠度校验 系数/%
1	7.81	8.82	113
2	7.81	8.81	113
3	7.81	8.77	112
4	7.81	8.71	112
5	7.81	8.64	111
6	7.81	8.48	109
7	7.81	8.44	108
8	7.81	8.42	108
9	7.81	8.39	107

表 7 测点布置方式二挠度校验系数

Table 7 Deflection check coefficient of measuring point arrangement 2

跨中节点编号	无损桥梁理论 挠度/mm	有损桥梁模态 挠度/mm	挠度校验 系数/%
1	7.85	8.92	114
2	7.85	8.90	113
3	7.85	8.86	113
4	7.85	8.79	112
5	7.85	8.71	111
6	7.85	8.55	109
7	7.85	8.50	108
8	7.85	8.47	108
9	7.85	8.45	108

测点布置方式二识别的模态参数均能得到足够精度的跨中模态挠度,与理论挠度的偏差不超过 5%,因此在实际桥梁测试中,仅跨中布置加速度测点便能够达到试验目的,结合《公路桥梁荷载试验规程》对桥梁刚度进行快速评估,既能够保证试验结果的准确性还兼具可观的经济性。

(2)由于振型节点处的 MAC 值为 0,仅在跨中布置测点,传感器捕捉不到第 2 个纵向竖弯振型对应的时域响应,识别不到该阶模态参数,但是通过研究发现简支梁第 2 个纵向竖弯振型对跨中模态挠度的预测没有贡献,因此采用前 3 阶模态参数即可准确地确定等效荷载作用下桥梁跨中的模态挠度。

(3)通过等效荷载作用下桥梁跨中理论挠度和模态挠度的分析对比,以及无损桥梁和有损桥梁的仿真研究,发现基于模态测试和等效荷载的装配式简支梁桥刚度快速评估方法,不仅结合了模态测试法和静力荷载试验法的优点,还可以快速有效地评估服役桥梁的刚度,具有较好的实际工程应用价值。

参考文献:

References:

[1] 范立础. 桥梁工程[M]. 3 版. 北京:人民交通出版社, 2017.
FAN Lichu. Bridge engineering[M]. 3rd ed. Beijing: People's Communication Press, 2017.

[2] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2014[J]. 中国公路学报, 2014, 27(5): 1-96.
Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*. Review on China's bridge engineering research; 2014 [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(5): 1-96.

[3] 顾 万. 混凝土空心板梁桥铰缝损伤演变规律及评估技术研究[D]. 扬州:扬州大学, 2020.
GU Wan. Research on hinge joint damage evolution rule and evaluation technology of concrete hollow slab girder bridge [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020.

[4] 马 辉. 基于计算智能方法的简支梁桥损伤识别研究[D]. 长春:吉林大学, 2010.
MA Hui. Research on the computational intelligence-based damage identification strategy for simply supported bridge[D]. Changchun: Jilin University, 2010.

[5] LIU H B, JIAO Y B, CHENG Y C, et al. Reduction of uncertainties for damage identification of bridge based on fuzzy nearness and modal data[J]. *Journal of Applied Mathematics*, 2012, 2012: 1-13.

[6] 袁旭东, 周 晶, 黄 梅. 基于静力位移及频率的结构损伤识别神经网络方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(4): 488-490.
YUAN Xudong, ZHOU Jing, HUANG Mei. A method of structural damage identification using neural networks based on static displacements and natural frequencies[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005, 37(4): 488-490.

[7] 张茵涛. 在役预应力混凝土梁桥静载试验[J]. 铁道建筑, 2018, 58(3): 28-30, 38.
ZHANG Yintao. Static load test study on prestressed concrete girder bridge in service[J]. *Railway Engineering*, 2018, 58(3): 28-30, 38.

[8] 亢兴军, 孙绪法, 赵 越, 等. 基于环境激励的连续梁桥挠度评定方法研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(4): 73-79.
QI Xingjun, SUN Xufa, ZHAO Yue, et al. Research on deflection evaluation method of continuous girder bridge based on environmental excitation[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2021, 38(4): 73-79.

- [9] 石永燕,王云莉. 桥梁静荷载试验的安全加载算法[J]. 公路交通技术,2005,21(增):92-94.
SHI Yongyan, WANG Yunli. Safe loading algorithm for bridge static load test[J]. Technology of Highway and Transport,2005,21(S):92-94.
- [10] CATBAS F N, BROWN D L, AKTAN A E. Use of modal flexibility for damage detection and condition assessment: case studies and demonstrations on large structures[J]. Journal of Structural Engineering, 2006,132(11):1699-1712.
- [11] CATBAS F N, BROWN D L, AKTAN A E. Parameter estimation for multiple-input multiple-output modal analysis of large structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004,130(8):921-930.
- [12] 邹兰林. 基于实测数据库修正的板桥动力综合评定系统研究[D]. 西安:长安大学,2008.
ZOU Lanlin. Study on dynamic comprehensive evaluation system of plate bridge based on test data base updating[D]. Xi'an:Chang'an University,2008.
- [13] TIAN Y D. Flexibility identification and deflection prediction of a three-span concrete box girder bridge using impacting test data[J]. Engineering Structures, 2017,146:158-169.
- [14] TIAN Y D. Structural scaling factor identification from output-only data by a moving mass technique[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2019,115:45-59.
- [15] ZHANG J, ZHANG Q Q, GUO S L, et al. Structural identification of short/middle span bridges by rapid impact testing: theory and verification[J]. Smart Materials and Structures,2015,24(6):065020.
- [16] 林贤坤,张令弥,郭勤涛,等. 基于模态挠度法的预应力连续箱梁桥状态评估[J]. 土木工程学报,2010,43(10):83-90.
LIN Xiankun, ZHANG Lingmi, GUO Qintao, et al. Application of modal deflection method for condition assessment of prestressed concrete continuous box-girder bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2010,43(10):83-90.
- [17] 林贤坤,覃柏英,张令弥,等. 基于不中断交通运行模态分析的模态挠度法在桥梁状态评估中的应用[J]. 振动与冲击,2013,32(14):52-57,76.
LIN Xiankun, QIN Boying, ZHANG Lingmi, et al. Application of modal deflection method in condition assessment of a bridge based on operational modal analysis without interrupting traffic[J]. Journal of Vibration and Shock,2013,32(14):52-57,76.
- [18] 阳 洋, MOSALAM K M, 金国芳,等. 基于改进直接刚度法的加州某桥梁结构损伤评估研究[J]. 工程力学,2012,29(1):114-120,140.
YANG Yang, MOSALAM K M, JIN Guofang, et al. Research on damage evaluation of highway bridge structure in California using improved direct stiffness method[J]. Engineering Mechanics,2012,29(1):114-120,140.
- [19] 蒋友宝,刘 扬,张建仁. 既有 RC 拱肋基于全过程刚度变化规律的承载能力预测[J]. 计算力学学报,2012,29(4):532-537.
JIANG Youbao, LIU Yang, ZHANG Jianren. Evaluation of load bearing capacity based on law of stiffness changes in full process for existing RC arch rib[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2012,29(4):532-537.
- [20] 赵发强. 基于荷载试验的装配式简支梁桥工作性能评估研究[D]. 北京:北京交通大学,2019.
ZHAO Faqiang. Research on performance evaluation of prefabricated simply supported beam bridge based on load test[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2019.