

亓圣,施晓,亓兴军,等.基于局部测点模态测试的简支梁桥承载刚度评定试验研究[J].地震工程学报,2024,46(3):593-601.  
DOI:10.20000/j.1000-0844.20220617004

QI Sheng, SHI Xiao, QI Xingjun, et al. Experimental study on the load-bearing stiffness assessment of simply supported girder bridges based on modal tests of local measurement points[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(3): 593-601. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20220617004

## 基于局部测点模态测试的简支梁桥 承载刚度评定试验研究

亓圣<sup>1</sup>, 施晓<sup>2</sup>, 亓兴军<sup>3</sup>, 王宁宁<sup>2</sup>, 曹三鹏<sup>3</sup>, 王珊珊<sup>4</sup>

(1. 山东省交通科学研究院, 山东 济南 250102; 2. 济南金日公路工程有限公司, 山东 济南 250101;  
3. 山东建筑大学 交通工程学院, 山东 济南 250101; 4. 山东高速集团有限公司, 山东 济南 250098)

**摘要:** 快速可靠地检测服役桥梁的承载刚度对保障道路交通线路的安全运营具有重要意义。文章提出一种基于局部测点模态测试的简支梁桥承载刚度评定方法,并以某实际工程中一座简支梁桥为试验对象,对所提方法的可行性和准确性进行验证。设计传统桥梁荷载试验的中载和偏载加载方案,测得各工况下简支梁桥跨中截面的实测静挠度,基于环境激励进行联合测点模态试验和局部测点模态试验,预测简支梁桥跨中截面的模态挠度,并结合桥梁理论挠度计算结构挠度校验系数。结果表明:中载、偏载工况下联合测点模态试验预测的跨中截面模态挠度与静载试验跨中截面实测静挠度的相对误差最大不超过5.7%,基本满足工程精度的要求;联合跨中截面测点和桥面加载点测点的联合测点模态试验能够准确评估桥梁的承载刚度;仅在跨中截面布置传感器的局部测点模态试验预测的模态挠度基本等价于联合测点模态试验预测的模态挠度,两者的相对误差小于2%,局部测点模态试验预测的跨中截面挠度校验系数与静载试验的实测挠度校验系数相比具有很好的一致性。

**关键词:** 模态试验; 局部测点; 简支梁桥; 承载刚度; 校验系数; 静载试验

中图分类号: U441.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-0844(2024)03-0593-09

DOI:10.20000/j.1000-0844.20220617004

## Experimental study on the load-bearing stiffness assessment of simply supported girder bridges based on modal tests of local measurement points

QI Sheng<sup>1</sup>, SHI Xiao<sup>2</sup>, QI Xingjun<sup>3</sup>, WANG Ningning<sup>2</sup>, CAO Sanpeng<sup>3</sup>, WANG Shanshan<sup>4</sup>

(1. Shandong Transportation Research Institute, Jinan 250102, Shandong, China;

2. Jinan Kingyue Highway Engineering Co., Ltd., Jinan 250101, Shandong, China;

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

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

**Abstract:** Ensuring the safe operation of road traffic routes primarily depends on the fast and reli-

收稿日期:2022-06-17

基金项目:山东省交通运输厅科技计划项目(2022B06,2020B69);山东省企业技术创新项目(202250101726,202160101415)

第一作者简介:亓圣(1997-),男,硕士,主要从事桥梁快速评估与健康监测研究。E-mail:835662566@qq.com。

通信作者:亓兴军(1974-),男,博士,教授,主要从事桥梁快速评估与健康监测研究。E-mail:qxj123@163.com。

able testing of the load-bearing stiffness of service bridges. This paper presents a load stiffness assessment method for simply supported girder bridges based on a modal test of local measurement points. An actual, simply supported girder bridge is used as the test object to verify the feasibility and accuracy of the proposed method. The schemes of symmetric and eccentric loads used in conventional bridge load tests were designed, and the measured static deflection of the mid-span section of the simply supported girder bridge under each condition was obtained. Modal tests of joint and local points were conducted based on the ambient excitation to predict the modal deflection of the mid-span section of the simply supported girder bridge, and the calibration coefficient of structural deflection was calculated with the theoretical deflection. Results show that under symmetric and eccentric loads, the maximum relative error between the modal deflection of the mid-span section predicted by the modal test of joint points and that measured in the static load test is less than 5.7%. The load-bearing stiffness of the bridge can be accurately assessed using the modal test of joint points on the mid-span section and the bridge deck. The modal deflection predicted by the modal test of local measuring points with sensors only in the mid-span section is equivalent to that predicted by the modal test of joint measuring points, and the relative error between them is less than 2%. The deflection calibration coefficient of the mid-span section predicted by the modal test of local measuring points is in good agreement with the measured value from the static load test.

**Keywords:** modal test; local measuring point; simply supported girder bridge; load-bearing stiffness; calibration coefficient; static load test

## 0 引言

材料力学性能退化是结构抗力衰变的重要原因。从桥梁结构的全寿命周期来看,随着材料老化、环境侵蚀、荷载的长期效应、疲劳效应以及车辆严重超载等因素的耦合作用,将不可避免地导致结构的损伤积累,从而使桥梁抵御荷载的能力大大降低,严重威胁桥梁的安全运营<sup>[1-4]</sup>。对在役桥梁的承载状态做出科学准确的评估,明确结构的实际安全储备,才能够有效地避免桥梁在营运过程中发生灾难性的后果。

传统的评估桥梁承载状态的方法主要有荷载试验法、基于可靠度的分析方法和影响线法等<sup>[5-7]</sup>。曾德礼<sup>[8]</sup>以长江大桥的成桥荷载试验为基础,对大跨度桥梁承载能力鉴定进行研究总结,针对测试项目、加载效率、结构校验系数等提出了合理的建议;Wang等<sup>[9]</sup>提出一种基于影响线的移动荷载试验方法来快速评估桥梁的承载能力,利用移动车辆激励下的桥梁动力响应提取实际影响线,以影响线最大幅值和影响线总面积为指标,进行桥梁承载力评估,并对该方法的准确性进行了验证。在传统的评估方法中,荷载试验法是最为准确和客观的一种方法,在桥梁的安全维护中起着重要作用,但由于试验规模大,需要长时间进行交通管制,经济性相对较差,对

于目前数量众多的病旧桥梁难以形成规模化的检测评估。

随着科学技术的进步,基于各类先进传感器的结构模态测试评估技术在近年来得以充分发展。李伟钊等<sup>[10]</sup>提出了一种以动代静的桥梁快速评估方法,利用桥梁的一阶竖弯频率校验系数与静载试验跨中挠度校验系数的关系来间接反映简支梁桥的刚度;Tian等<sup>[11-12]</sup>利用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,研究表明结构的预测挠度与计算挠度吻合较好;周云等<sup>[13-14]</sup>提出一种子结构模态振型拼接方法计算结构的位移柔度矩阵,利用多参考点脉冲锤击法的输入输出动力信号获取结构的模态柔度,大大提高了模态测试的试验效率;亓兴军等<sup>[15-16]</sup>对桥梁结构的模态测试进行了深入研究,基于环境激励下桥梁的振动响应进行模态分析,预测结构的模态挠度,结合现行规范实现桥梁的承载状态评估,并通过实桥试验对所提方法进行了验证。相比于传统的静载试验来说,模态试验不需要中断交通,也无需在桥面上布置加载车,减少了检测时间和降低了试验成本,提高了检测效率。对于桥梁模态试验而言,传感器数量和位置将直接影响桥梁检测的效率和试验结果的准确性,如何优化传感器的布置方案,准

确、快速地实现桥梁承载状态的检测评估是目前亟需解决的共同课题。

结构刚度是评定桥梁承载力的一项重要指标。本文提出了一种基于局部测点模态测试的简支梁桥承载刚度快速测试评定方法,通过在桥梁跨中布置少量传感器,采集结构在环境激励下的振动响应,经模态分析识别桥梁的前三阶模态参数,从而预测跨中控制截面的模态位移,计算挠度校验系数,结合规范评估桥梁的承载刚度。以实际工程中一座装配式简支箱梁桥为研究对象,分别进行局部测点模态试验(仅桥梁跨中测点布置传感器)、联合测点模态试验(桥梁跨中测点与静载试验桥面加载点联合布置传感器)和传统静载试验,将跨中截面挠度和校验系数等试验结果进行详细对比分析,探讨基于局部测点模态测试以最少数量传感器快速评估简支梁桥承载刚度的适用性和准确性。

## 1 基本理论

振型反映的是结构的固有特性,表示结构在各阶模态下的模态位移比值。根据振型的正交性<sup>[17-18]</sup>:

$$\begin{cases} \text{diag}(\mathbf{M}_i) = \boldsymbol{\phi}^T \mathbf{M} \boldsymbol{\phi} \\ \text{diag}(\mathbf{C}_i) = \boldsymbol{\phi}^T \mathbf{C} \boldsymbol{\phi} \\ \text{diag}(\mathbf{K}_i) = \boldsymbol{\phi}^T \mathbf{K} \boldsymbol{\phi} \end{cases} \quad (1)$$

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, $\boldsymbol{\phi} = \boldsymbol{\phi}_1, \boldsymbol{\phi}_2, \boldsymbol{\phi}_3, \dots$ ,  $\boldsymbol{\phi}_i$  为对应的第  $i$  阶振型向量。

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) 或者式(3) 所示进行对角化:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\phi}^T \mathbf{M} \boldsymbol{\phi} = \text{diag}(\mathbf{M}_i) \\ \boldsymbol{\phi}^T \mathbf{K} \boldsymbol{\phi} = \text{diag}(\mathbf{K}_i) \end{cases} \quad (2)$$

或者

$$\begin{cases} \boldsymbol{\phi}_i^T \mathbf{M} \boldsymbol{\phi}_i = \mathbf{M}_i \\ \boldsymbol{\phi}_i^T \mathbf{K} \boldsymbol{\phi}_i = \mathbf{K}_i \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3, 4, \dots, n) \quad (3)$$

对第  $i$  阶模态,当存在位移振型  $\overline{\boldsymbol{\phi}}_i$ , 满足  $\overline{\boldsymbol{\phi}}_i^T \mathbf{M} \overline{\boldsymbol{\phi}}_i = \mathbf{M}_i = 1$  时,称  $\overline{\boldsymbol{\phi}}_i$  为归一化位移振型。

结构模态分析识别的某阶位移振型  $\boldsymbol{\phi}_i$  不一定刚好就是归一化的位移振型,其与对应的归一化位移振型  $\overline{\boldsymbol{\phi}}_i$  之间存在比例系数  $a_i$ ,如式(4) 所示:

$$\overline{\boldsymbol{\phi}}_i = \frac{\boldsymbol{\phi}_i}{a_i} \quad (4)$$

将其代入  $\overline{\boldsymbol{\phi}}_i^T \mathbf{M} \overline{\boldsymbol{\phi}}_i = 1$ , 可以求得振型归一化比例系数  $a_i$ :

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

将归一化的位移振型矩阵代入式(2) 得:

$$\begin{cases} \overline{\boldsymbol{\phi}}^T \mathbf{M} \overline{\boldsymbol{\phi}} = \text{diag}(\overline{\mathbf{M}}_i) = \mathbf{I} \\ \overline{\boldsymbol{\phi}}^T \mathbf{K} \overline{\boldsymbol{\phi}} = \text{diag}(\overline{\mathbf{K}}_i) \end{cases} \quad (6)$$

在  $\overline{\boldsymbol{\phi}}^T$  为方阵且满秩的情况下,可对式(6) 的第二式两边同时左乘  $(\overline{\boldsymbol{\phi}}^T)^{-1}$ , 右乘  $\overline{\boldsymbol{\phi}}^{-1}$  得到结构的刚度矩阵为:

$$\mathbf{K} = (\overline{\boldsymbol{\phi}}^T)^{-1} \text{diag}(\overline{\mathbf{K}}_i) \overline{\boldsymbol{\phi}}^{-1} \quad (7)$$

结构的位移柔度矩阵  $\mathbf{F}^d$  是刚度矩阵的逆矩阵,如式(8) 所示:

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

式中: $d$  为该参数属于位移。

固有频率  $w_i$  和模态质量  $\overline{\mathbf{M}}_i$ 、模态刚度  $\overline{\mathbf{K}}_i$  之间关系为:

$$w_i = \sqrt{\frac{\overline{\mathbf{K}}_i}{\overline{\mathbf{M}}_i}} \quad (9)$$

与归一化位移振型  $\{\overline{\boldsymbol{\phi}}_i\}$  对应的  $\overline{\mathbf{M}}_i = 1$ , 因此  $\overline{\mathbf{K}}_i = w_i^2$ , 将其代入式(8) 得到最终的位移柔度矩阵计算公式为:

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

式中: $\overline{\boldsymbol{\phi}}_i$  为第  $i$  阶归一化位移振型; $w_i$  为第  $i$  阶固有频率; $n$  为识别的总的模态阶数。

将式(10) 计算得到的柔度矩阵代入式(11) 中,得到模态位移:

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

式中: $\boldsymbol{\Delta}$  为结构的模态位移; $\mathbf{f}$  为施加在结构上的静荷载向量。

## 2 工程实例

### 2.1 遥墙大桥工程概况

遥墙大桥桥面宽 12.9 m, 斜度  $-18^\circ$ ; 上部结构形式为  $6 \times 30$  m 的装配式预应力混凝土简支小箱梁, 横向布设 4 片梁; 下部结构形式为埋置式桥台、多柱式桥墩和桩基础; 桥面铺装为沥青混凝土结构, 采用板式橡胶支座和异型钢单缝式伸缩缝。选取现场具备良好检测工作面的北侧第一跨作为试验跨, 试验桥梁如图 1 所示。

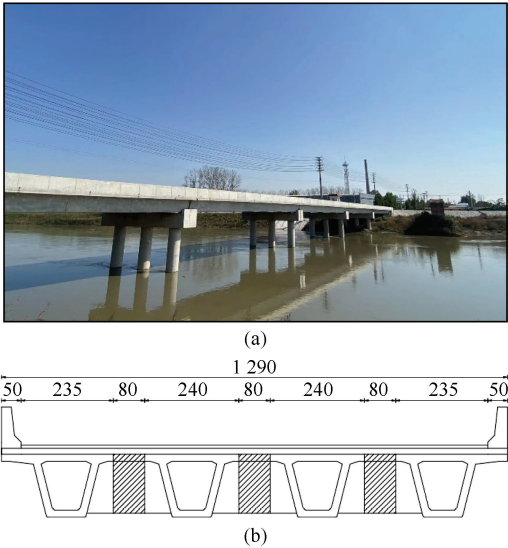


图1 试验桥梁(单位:mm)

Fig.1 The studied bridge (Unit:mm)

### 2.2 桥梁有限元模型

利用有限元软件 ANSYS 建立桥梁三维梁格模型。主梁、实横梁、防撞护栏均采用 Beam4 单元,弹性模量为  $3.5 \times 10^{10}$  Pa,泊松比为 0.2,材料密度  $2500 \text{ kg/m}^3$ 。主梁横向联系采用虚拟横梁,同样为 Beam4 单元,弹性模量为  $3.5 \times 10^{10}$  Pa,泊松比为 0.2,材料密度  $0 \text{ kg/m}^3$ 。桥面混凝土调平层采用 Shell63 单元,材料类型与主梁相同,厚度为 0.12 m。沥青层简化为集中质量并入到桥梁主体,采用 Combin14 单元模拟梁端支座的竖向支承作用。桥梁三维有限元模型如图 2 所示,桥梁前三阶理论振型如图 3 所示。

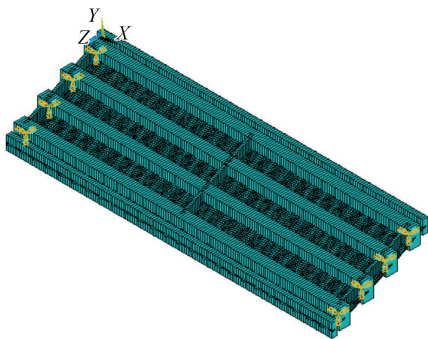


图2 桥梁有限元模型

Fig.2 Finite element model of bridge

### 3 桥梁静载试验

为使静载试验能够充分反映结构的受力特点,在进行桥梁试验之前,需要根据《公路桥梁荷载试验规程》<sup>[19]</sup> 计算静载试验的加载效率。加载效率  $\eta_q$

按式(12)计算:

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

式中: $S_s$  为静载试验荷载作用下,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; $\mu$  为冲击系数值,当基频  $1.5 \text{ Hz} \leq f \leq 14 \text{ Hz}$  时,  $\mu = 0.17671 \ln f - 0.0157$ 。

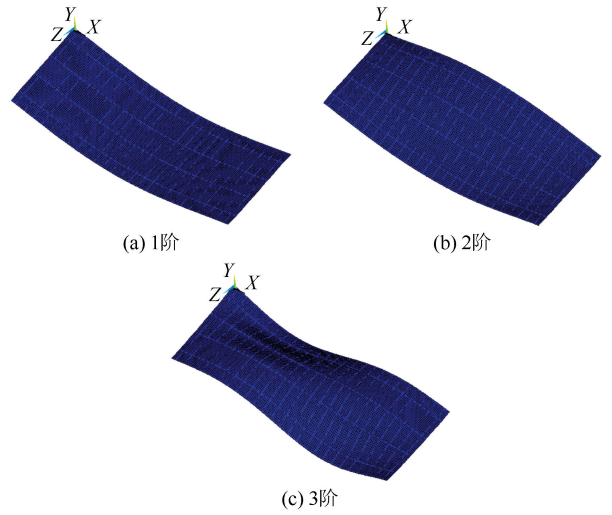


图3 前三阶理论振型

Fig.3 The first three theoretical modes

根据规范要求,满足该桥梁加载效率在 0.95 ~ 1.05 之间,需要采用两辆 45 t 重的三轴加载车,偏载和中载工况下加载车辆平面布置如图 4 所示。

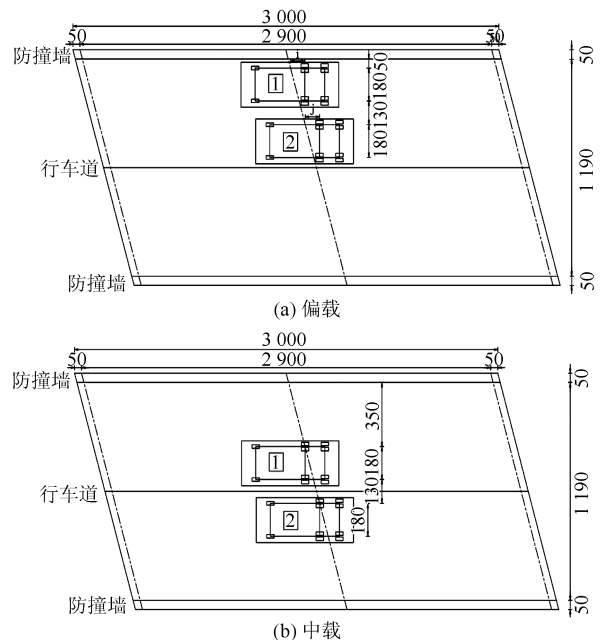


图4 车辆加载位置(单位:cm)

Fig.4 Vehicle loading position (Unit:cm)



在桥下搭设支架安装位移计测量主梁控制截面的挠度, 中载和偏载工况下, 遥墙大桥主梁跨中截面实测挠度值如表 1 所列。

表 1 中载和偏载控制截面挠度值

Table 1 Deflection values of control section under eccentric and symmetric loads

跨中测点编号	偏载挠度/mm	中载挠度/mm
CN1	4.75	3.22
CN2	4.28	4.04
CN3	2.76	3.82
CN4	1.85	3.17

注: CN1~CN4 为 4 片主梁跨中对应的控制测点

### 4 联合测点模态试验

随着传感器灵敏度的提高及互联网技术的发展, 环境振动测试法在桥梁模态试验被广泛应用, 其主要依靠地脉动、风荷载、车辆荷载及其他环境激励使桥梁产生振动, 通过高灵敏度振动传感器、数据采集系统及计算机记录桥梁的振动响应, 利用峰值拾取法、经验模态分解法、随机子空间法 (Stochastic Subspace Identification, SSI)<sup>[20-21]</sup> 等模态分析方法, 识别桥梁结构的模态参数。

根据静载试验加载车轮载的作用位置, 并联合主梁跨中控制截面挠度测点确定传感器的布置, 联合测点模态试验的测点数为 20 个, 包括跨中截面梁底的 8 个测点和桥面的 12 个加载车车轮位置测点。为充分获取桥梁结构的振动响应, 将采样时间设置为 20~30 min, 采样频率为 500 Hz。桥梁现场测试如图 5 所示, 需要说明的是, 桥梁现场模态测试时桥面交通正常运营, 并没有中断交通。联合测点模态试验的测点布置如图 6 所示。

采用随机子空间法识别该简支箱梁桥的模态参数。频率识别结果如表 2 所列, 前三阶识别振型如图 7 所示。

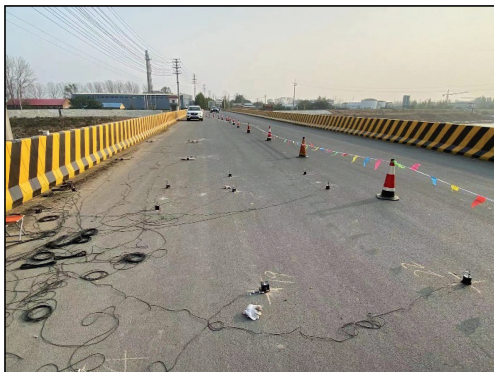
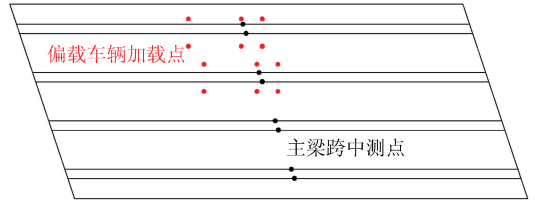
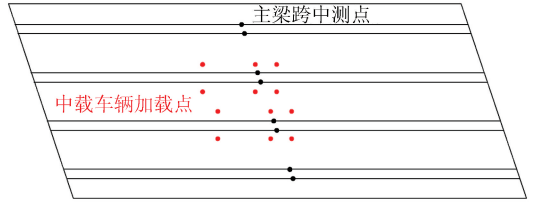


图 5 模态测试现场图

Fig.5 Field diagram of modal test



(a) 偏载



(b) 中载

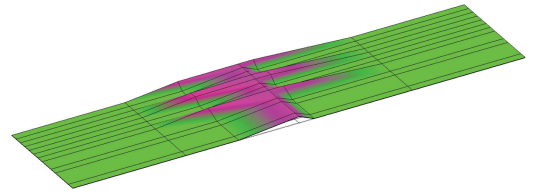
图 6 联合测点布置图

Fig.6 Layout of joint measuring points

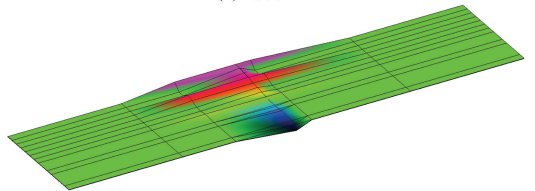
表 2 频率识别结果

Table 2 Frequency identification results

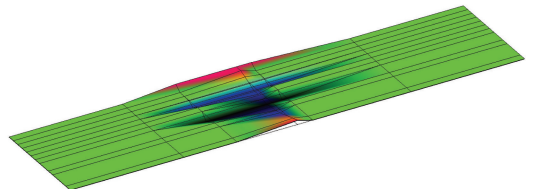
模态阶次	1 阶	2 阶	3 阶
理论频率/Hz	3.685	6.833	12.636
识别频率/Hz	4.453	6.857	13.778



(a) 1阶振型



(b) 2阶振型



(c) 3阶振型

图 7 前三阶识别振型

Fig.7 The first three vibration modes

为验证识别振型的准确性, 利用式(13)计算理论振型与实测振型的振型相关系数值 (Modal Assurance Criterion, MAC)。

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

式中:  $\{\phi_{iE}\}$  为第  $i$  阶试验模态振型列向量;  $\{\phi_{iT}\}$  为第  $i$  阶有限元理论模态振型列向量;  $\{\phi\}^T$  振型列向

量的转置向量。

对于同一阶振型,若  $MAC = 1$ ,则表示试验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,说明构建的有限元模型越逼近桥梁的真实情况,能够反映桥梁结构的实际振动状态。若  $MAC = 0$ ,则表示两个振型向量是正交的,即试验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,理论振型与实测振型的 MAC 值越接近 0,说明有限元模型与实际桥梁严重不符,或模态试验中识别的振型精度太差,无法反映结构的实际振动状态。

联合测点模态试验下遥墙大桥实测振型与理论振型的相关系数如表 3 所列。

表 3 振型相关系数

Table 3 Correlation coefficient of vibration mode

模态阶次	1 阶	2 阶	3 阶
偏载 MAC 值	0.998 9	0.997 0	0.917 6
中载 MAC 值	0.998 7	0.992 3	0.963 3

观察表 3 可知,无论是中载工况还是偏载工况,识别振型的相关性系数(MAC)均大于 0.90,且前两阶振型 MAC 值接近 1,一方面说明此次模态试验识别的振型精度较高,另一方面也说明所建立的有限元模型与实际桥梁结构十分吻合。

结构柔度是表征工程结构实际服役状况的关键参数,与刚度互为倒数,可以表征结构在线弹性状态下的变形能力<sup>[22-23]</sup>。利用桥梁有限元模型对已识别的前三阶振型进行质量归一化处理,结合实测频率代入式(10),求得桥梁结构的位移柔度矩阵,位移柔度矩阵中的元素  $\delta_{ij}$ ,表示在节点  $j$  施加单位力,节点  $i$  产生的挠度值。将遥墙大桥的实测位移柔度矩阵以及静载试验中加载车轮载对应的荷载向量代入式(11),分别计算与桥梁静载试验偏载和中载对应的实测模态挠度,然后与静载试验的实测静挠度进行误差对比分析,结果如表 4 和表 5 所列。

表 4 偏载实测模态挠度与实测静挠度误差

Table 4 Error between measured modal deflection and measured static deflection under eccentric load

跨中测点 编号	实测模态 挠度/mm	实测静载 挠度/mm	相对误差 /%
CN1	4.86	4.75	2.3
CN2	4.12	4.28	3.7
CN3	2.87	2.76	4.0
CN4	1.93	1.85	4.3

通过表 4、表 5 数据可知,对于该简支梁桥,利用环境激励下测得的前三阶模态参数预测的桥梁跨

中模态挠度与静载试验实测的跨中挠度值吻合较好,两者的相对误差最大为 5.7%且绝大部分误差低于 5%,满足工程精度的要求。

表 5 中载实测模态挠度与实测静挠度误差

Table 5 Error between measured modal deflection and measured static deflection under symmetric load

跨中测点 编号	实测模态 挠度/mm	实测静载 挠度/mm	相对误差 /%
CN1	3.23	3.22	0.3
CN2	4.02	4.04	0.5
CN3	4.01	3.82	5.0
CN4	3.35	3.17	5.7

为反映桥梁结构的实际工作状态,评估桥梁的承载刚度,利用实测模态挠度计算挠度校验系数  $\eta$ 。根据《公路桥梁荷载试验规程》<sup>[19]</sup> 挠度校验系数按照式(14)计算:

$$\eta = \frac{S_e}{S} \quad (14)$$

式中: $\eta$  为挠度校验系数; $S_e$  为试验荷载作用下主要测点的实测模态弹性位移值; $S$  为试验荷载作用下主要测点的理论计算位移值。

将各个加载工况对应的实测模态挠度以及理论静载挠度代入式(14),计算桥梁跨中控制截面的挠度校验系数如表 6 和表 7 所示。

表 6 偏载工况挠度校验系数

Table 6 Deflection check coefficient under eccentric load

跨中测点 编号	实测模态 挠度/mm	理论静载 挠度/mm	挠度校验 系数
CN1	4.86	6.27	0.78
CN2	4.12	5.69	0.72
CN3	2.87	4.32	0.66
CN4	1.93	3.69	0.52

表 7 中载工况挠度校验系数

Table 7 Deflection check coefficient under symmetric load

跨中测点 编号	实测模态 挠度/mm	理论静载 挠度/mm	挠度校验 系数
CN1	3.23	4.80	0.67
CN2	4.02	5.25	0.77
CN3	4.01	5.19	0.77
CN4	3.35	4.72	0.71

表中结果表明,利用实桥模态测试得到的预测模态挠度计算桥梁挠度校验系数,进行桥梁刚度验算,遥墙大桥的控制截面挠度校验系数均小于 1,桥梁刚度满足设计要求。说明在环境激励下,联合加载车轮载作用位置和主梁跨中控制截面测点布设传感器进行桥梁的模态试验,可以有效代替传统的静载试验来评估桥梁的实际承载刚度,且模态试验过

程无需中断交通,极大地降低了人力、物力,具有很好的实际工程应用价值。

### 5 局部测点模态试验

在桥梁模态参数的测试过程中,传感器的数量和位置将直接影响后期模态参数的识别精度和试验的可靠程度,而传感器设置本身作为一个“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。为探究传感器的数量以及布置位置对评估桥梁承载刚度准确性的影响,对遥墙大桥进行局部测点模态试验(仅桥梁跨中测点模态测试),并与联合测点模态试验(桥梁跨中测点与桥面加载车轮载点联合测点模态测试)进行比较分析。

局部测点模态试验仅在跨中梁底布置 8 个传感器,采样时间设置为 20~30 min,采样频率为 500 Hz,测点布置如图 8 所示。

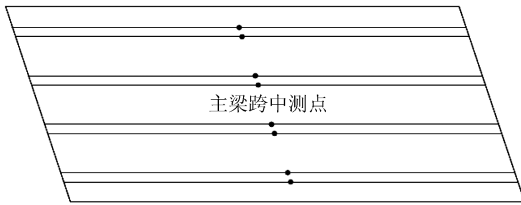


图 8 局部测点布置图

Fig.8 Layout of local measuring points

利用 SSI 识别方法对跨中测点采集的桥梁振动信息进行模态分析,频率识别结果如表 8 所列,振型识别结果如图 9 所示,振型相关系数如表 9 所列。

表 8 频率识别结果

Table 8 Frequency identification results

模态阶次	1 阶	2 阶	3 阶
识别频率/Hz(局部测点模态试验)	4.481	6.879	13.798
识别频率/Hz(联合模态试验)	4.453	6.857	13.778
误差/%	0.6	0.3	0.1

从表 8 中数据可以看出,局部测点模态测试与联合测点模态测试的频率识别结果几乎完全相同,仅在跨中布置测点便可以准确识别装配式简支梁桥的前三阶固有频率。观察表 9 中数据,局部测点模态试验的前三阶识别振型与桥梁理论振型的相关性系数(MAC)接近 1,说明仅在跨中布置测点识别的桥梁局部振型也十分精确。因此进行桥梁的局部测点模态试验能够获取足够精度的模态参数,满足桥梁承载刚度评估的先决条件。

由于局部测点模态测试仅在跨中布置传感器,

因此将静载试验的车辆荷载转换成虚拟集中力作用在相应主梁的跨中测点位置处,偏载工况的虚拟集中力作用于 1#、2# 号梁跨中测点,中载工况的虚拟集中力作用与 2#、3# 号梁跨中测点,计算在虚拟集中试验荷载作用下局部测点模态试验跨中测点的模态挠度,以及联合测点模态试验跨中测点的模态挠度,计算结果如表 10 和表 11 所列。

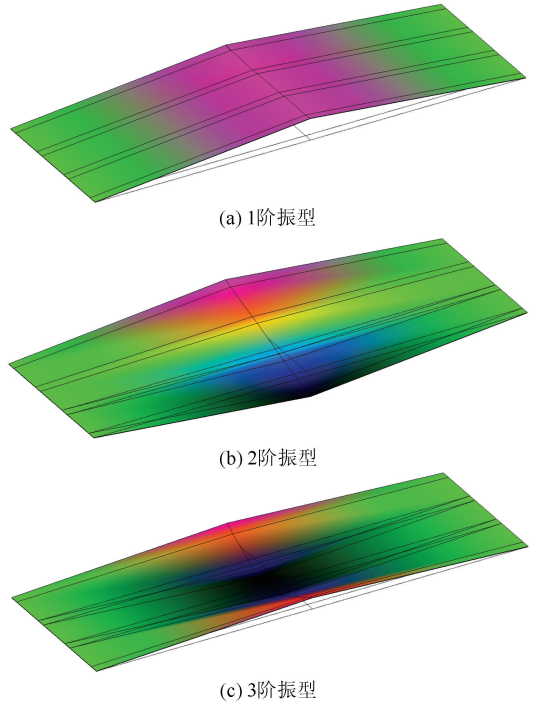


图 9 前三阶识别振型

Fig.9 The first three vibration modes

表 9 振型相关系数

Table 9 Correlation coefficient of vibration mode

模态阶次	1 阶	2 阶	3 阶
MAC 值	0.999 3	0.998 3	0.985 4

表 10 偏载工况挠度对比

Table 10 Deflection comparison under eccentric load

跨中测点编号	模态挠度(联合模态试验)/mm	模态挠度(局部测点模态试验)/mm	相对误差/%
CN1	4.86	4.82	0.78
CN2	4.12	4.08	0.92
CN3	2.87	2.84	0.98
CN4	1.93	1.97	2.00

表 11 中载工况挠度对比

Table 11 Deflection comparison under symmetric load

跨中测点编号	模态挠度(联合模态试验)/mm	模态挠度(局部测点模态试验)/mm	相对误差/%
CN1	3.23	3.20	0.89
CN2	4.02	3.95	1.66
CN3	4.01	3.94	1.67
CN4	3.35	3.28	1.99



从表10、表11中的数据能够看出,在虚拟集中试验荷载作用下,局部测点模态试验的跨中模态挠度与联合测点模态试验的跨中模态挠度相比,两者误差小于2%,说明仅在跨中布置传感器的局部测点模态试验预测的跨中模态挠度基本等价于联合模态试验预测的跨中模态挠度,因此,基于局部测点模态测试进行在役装配式简支梁桥承载状态的评估不仅可以节省传感器的使用数量,减少对交通的影响,降低试验成本,还可以保证桥梁跨中截面模态挠度的精确性。

## 6 桥梁承载刚度的评估

为进一步研究局部测点模态测试在桥梁承载刚度评估中的应用效果,将虚拟荷载作用下遥墙大桥局部测点模态试验预测的跨中模态挠度与虚拟荷载作用下桥梁理论静载挠度代入式(14),计算遥墙大桥在虚拟荷载作用下跨中控制截面的挠度校验系数,并于静载试验的挠度校验系数进行对比,结果如表12和表13所列。

表12 偏心工况挠度校验系数

Table 12 Deflection check coefficient under eccentric load

跨中测点 编号	实测模态 挠度/mm	理论静载 挠度/mm	模态挠度 校验系数	静载挠度 校验系数
CN1	4.82	6.18	0.78	0.76
CN2	4.08	5.59	0.73	0.75
CN3	2.84	4.12	0.69	0.64
CN4	1.97	3.72	0.53	0.50

表13 中载工况挠度校验系数

Table 13 Deflection check coefficient under symmetric load

跨中测点 编号	实测模态 挠度/mm	理论静载 挠度/mm	模态挠度 校验系数	静载挠度 校验系数
CN1	3.20	4.78	0.67	0.67
CN2	3.95	5.00	0.79	0.77
CN3	3.94	5.12	0.77	0.72
CN4	3.28	4.62	0.71	0.67

通过模态挠度校验系数来评估桥梁的实际承载刚度是否满足服役要求,若挠度校验系数 $\eta < 1$ ,则说明桥梁结构实际承载刚度有一定安全储备,满足安全运营的要求;若 $\eta > 1$ ,则说明桥梁的实际承载刚度偏低,需要及时采取维修、加固措施来确保桥梁结构的使用性能。从表12、表13中的数据能够看出,局部测点模态测试的模态挠度校验系数与传统静载试验的静载挠度校验系数在数值上非常接近,应用局部测点模态测试方法可以准确评估简支梁桥的实际承载刚度,这也充分说明遥墙大桥在静载试验过程中处于弹性工作状态。无论是中载工况还是偏心工况,基于局部测点模态试验预测遥墙大桥的模态

挠度校验系数均小于1,说明该桥的实际承载刚度满足设计要求,且与静载试验结果得出结论一致。

## 7 结论

(1) 联合桥面加载点与跨中截面测点共同布置传感器进行联合测点模态试验,预测桥梁在静载试验方案中对应的跨中模态挠度,与传统静载试验实测的跨中挠度相比,相对误差基本小于6%,联合测点模态试验测得的模态挠度具有很高的准确性。因此,基于联合测点的模态试验能够有效代替传统静载试验评估既有桥梁的承载刚度。

(2) 仅在跨中截面测点布置传感器进行局部测点模态试验,预测桥梁在虚拟集中荷载作用下的跨中模态挠度,与联合测点模态试验预测的跨中模态挠度相比,相对误差小于2%,局部测点模态试验测得的跨中模态挠度同样具有很高的准确性。因此在桥梁模态测试中,局部测点模态试验不仅能明显地减少传感器的使用数量,降低试验成本,还能够使试验结果基本等价于联合测点模态试验结果,以保证试验的测试精度。

(3) 利用局部测点模态试验预测的跨中模态挠度,计算模态挠度校验系数,与传统静载试验的实测挠度校验系数基本一致。因此,基于局部测点模态试验并结合《公路桥梁荷载试验规程》可以实现对桥梁承载刚度的快速评估,保证了试验结果的准确性和可靠性。

(4) 基于环境激励的局部测点模态测试法评估装配式简支梁桥的承载刚度,结合了传统静载试验和环境激励模态试验的优点,可以在不中断交通的条件下采集运营桥梁的振动信息,能够以最少数量的传感器方便快捷地识别预测简支梁桥的模态挠度,其测试精度相对于静载试验也比较准确,该方法具有很好的实际工程应用价值和广泛的应用前景。

## 参考文献(References)

- [1] 张方,张开权,邓捷超,等.桥梁评估与加固2020年度研究进展[J].土木与环境工程学报,2021,43(增刊1):152-166.  
ZHANG Fang, ZHANG Kaiquan, DENG Jiechao, et al. Research progress of bridge evaluation and reinforcement in 2020 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 201, 43 (Suppl01): 152-166.
- [2] 吕湘.既有混凝土桥梁的检测及承载能力评估[D].成都:西南交通大学,2017.  
LÜ Xiang. The detection and assessment of bearing capacity of existing concrete bridges [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.



- [3] ZHANG Y F, ZHU J S. Damage identification for bridge structures based on correlation of the bridge dynamic responses under vehicle load[J]. Structures, 2021, 33: 68-76.
- [4] LIANG Y Z, XIONG F. Measurement-based bearing capacity evaluation for small and medium span bridges[J]. Measurement, 2020, 149: 106938.
- [5] 李闯, 赵素锋. 桥梁结构快速检测鉴定方法的研究[J]. 公路交通技术, 2004, 20(6): 60-65, 85.  
LI Chuang, ZHAO Sufeng. Study on rapid test and identification of bridge structures [J]. Technology of Highway and Transport, 2004, 20(6): 60-65, 85.
- [6] 李东平, 唐新葵, 王宁波. 基于实际影响线的桥梁快速检测方法[J]. 桥梁建设, 2019, 49(1): 42-46.  
LI Dongping, TANG Xinkui, WANG Ningbo. Bridge rapid detection method based on actual influence lines[J]. Bridge Construction, 2019, 49(1): 42-46.
- [7] SASMAL S, RAMANJANEYULU K. Condition evaluation of existing reinforced concrete bridges using fuzzy based analytic hierarchy approach [J]. Expert Systems with Applications, 2008, 35(3): 1430-1443.
- [8] 曾德礼. 大跨度桥梁承载能力鉴定研究[J]. 桥梁建设, 2018, 48(5): 43-47.  
ZENG Deli. Study on identification of load bearing capacity of long span bridge[J]. Bridge Construction, 2018, 48(5): 43-47.
- [9] WANG N B, SHEN W, GUO C R, et al. Moving load test-based rapid bridge capacity evaluation through actual influence line [J]. Engineering Structures, 2022, 252: 113630.
- [10] 李伟钊, 王宗林, 李荣达, 等. 简支梁桥承载力以动代静快速评估方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(增刊 1): 191-195.  
LI Weizhao, WANG Zonglin, LI Rongda, et al. Rapid evaluation method of bearing capacity of simply supported beam bridge by replacing static with dynamic[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2012, 34(Suppl01): 191-195.
- [11] TIAN Y D, ZHANG J, XIA Q, et al. Flexibility identification and deflection prediction of a three-span concrete box girder bridge using impacting test data[J]. Engineering Structures, 2017, 146: 158-169.
- [12] TIAN Y D, ZHANG J, HAN Y X. Structural scaling factor identification from output-only data by a moving mass technique[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 115: 45-59.
- [13] 周云, 易伟建, 蒋运忠, 等. 多参考点脉冲锤击法识别桥梁模态柔度的实践[J]. 中国公路学报, 2015, 28(9): 46-56.  
ZHOU Yun, YI Weijian, JIANG Yunzhong, et al. Practice of bridge modal flexibility identification using multiple-reference impact test [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(9): 46-56.
- [14] 周云, 蒋运忠, 易伟建, 等. 基于模态柔度理论的结构损伤诊断试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(5): 36-45.  
ZHOU Yun, JIANG Yunzhong, YI Weijian, et al. Experimental research on structural damage detection based on modal flexibility theory [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(5): 36-45.
- [15] 亓兴军, 孙绪法, 王珊珊, 等. 基于模态参数识别的简支梁桥模态挠度预测试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(5): 129-137.  
QI Xingjun, SUN Xufa, WANG Shanshan, et al. Experimental research on modal deflection prediction of simply supported girder bridge based on modal parameter identification [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(5): 129-137.
- [16] 亓兴军, 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.
- [17] 郭双林. 基于冲击振动的位移柔度和应变柔度识别方法[D]. 南京: 东南大学, 2015.  
GUO Shuanglin. Structure flexibility identification through impact testing [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [18] 田永丁. 基于环境振动的桥梁结构柔度识别与性能评估[D]. 南京: 东南大学, 2016.  
TIAN Yongding. Flexibility identification and performance assessment of bridge structures from ambient vibration test data [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [19] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁荷载试验规程: JTG/T J21-01—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2016.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Load test methods for highway bridge: JTG/T J21-01—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2016.
- [20] 陈永高, 钟振宇. 基于改进 EEMD 算法的桥梁结构模态参数识别[J]. 公路交通科技, 2018, 35(4): 49-57.  
CHEN Yonggao, ZHONG Zhenyu. Modal parameter identification of bridge structure based on improved EEMD algorithm [J]. Journal of highway and transportation science and technology, 2018, 35(4): 49-57.
- [21] 车泽鑫, 黄勇, 杨振宇, 等. 平行索面悬索桥多阶段有限元模型修正[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(2): 213-224.  
CHE Zexin, HUANG Yong, YANG Zhenyu, et al. Multi-stage finite element model updating of parallel cable-plane suspension bridge [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(2): 213-224.
- [22] 夏琪. 基于冲击振动的桥梁快速测试方法与理论创新[D]. 南京: 东南大学, 2017.  
XIA Qi. Rapid testing method of bridge and theoretical innovation through impact vibration [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [23] 亓兴军, 赵越, 赵奇. 基于模态挠度的斜交桥静载试验数值方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(3): 55-62.  
QI Xingjun, ZHAO Yue, ZHAO Qi. Numerical method of static load test for skew bridge based on modal deflection [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(3): 55-62.