

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.126



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 正常交通下大跨斜拉桥主梁刚度评定的 虚拟静载试验方法

亓兴军<sup>1</sup>, 杨洪超<sup>1</sup>, 张斌<sup>2</sup>, 孙鹏<sup>2</sup>, 曹三鹏<sup>1</sup>, 郭冬梅<sup>1</sup>

(1. 山东建筑大学 交通工程学院, 济南 250101; 2. 山东华鉴工程检测有限公司, 济南 250101)

**摘要:**为探究虚拟静载试验方法评定大跨径斜拉桥主梁刚度的可行性,以某大跨斜拉桥为研究对象,对其进行静载试验及环境激励桥梁模态测试试验,测量静载试验主梁跨中截面测点的静力挠度,基于Kriging插值方法对斜拉桥的实测振型进行模态扩展,预测斜拉桥主梁跨中截面在静载试验荷载作用下的模态挠度;设计满足加载效率的虚拟静载试验方案,计算虚拟静载下的挠度校验系数,评估斜拉桥主梁刚度。结果表明:环境激励桥梁模态测试试验可以准确获取桥梁振动信息;仅采用前4阶竖向模态参数即可准确预测斜拉桥的模态挠度,与实测静载挠度的相对误差小于10%,满足工程精度的要求;虚拟静载试验方法与实际静载试验所得挠度校验系数相近,评定结果均小于1.0,表明该斜拉桥主梁承载状况良好,验证了虚拟静载试验方法在正常交通下评定大跨斜拉桥主梁刚度的可行性。

**关键词:**斜拉桥;虚拟静载试验;挠度校验系数;刚度评估;环境激励;Kriging插值

**中图分类号:**U446.1    **文献标志码:**A    **文章编号:**2096-6717(2025)06-0177-08

## Virtual static load test method for stiffness evaluation of main girder of long-span cable-stayed bridge under normal traffic

QI Xingjun<sup>1</sup>, YANG Hongchao<sup>1</sup>, ZHANG Bin<sup>2</sup>, SUN Peng<sup>2</sup>, CAO Sanpeng<sup>1</sup>,  
GUO Dongmei<sup>1</sup>

(1. School of Transportation Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, P. R. China; 2. Shandong  
Huajian Engineering Testing Co. Ltd., Jinan 250101, P. R. China)

**Abstract:** In order to investigate the feasibility of the virtual static load test method for evaluating the stiffness of the main girder of a large-span cable-stayed bridge, a cable-stayed bridge was subjected to a static load test and a modal test under environmental excitation. The static deflection of the measuring points at the mid-span section of the main girder was measured in the static load test. Modal expansion of the measured mode shapes of the cable-stayed bridge was carried out, and the Kriging interpolation method was applied to predict the modal deflection of the mid-span section of the cable-stayed bridge under the static load test. A virtual static load test scheme meeting the loading efficiency requirement was designed, and the deflection calibration coefficient under

收稿日期:2023-05-21

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

作者简介:亓兴军(1974-),男,教授,博士,主要从事桥梁健康监测、桥梁抗震防灾研究,E-mail:qxj123@163.com。

Received: 2023-05-21

**Foundation items:** Science and Technology Plan Project of Shandong Provincial Department of Transportation (No. 2022B06); Enterprise Technology Innovation Project of Shandong Province (Nos. 202250101726, 202160101415)

**Author brief:** QI Xingjun(1974-), professor, PhD, main research interests: bridge health monitoring, bridge earthquake resistance and disaster prevention, E-mail: qxj123@163.com.

virtual static load was calculated to evaluate the stiffness of the main girder of the cable-stayed bridge. The results show that the modal test under ambient excitation can accurately obtain the bridge vibration information; the relative error between the modal deflection predicted by the Kriging interpolation method using only the first four orders of vertical modal parameters and the measured static load deflection is less than 10%, which meets the engineering accuracy requirement; the deflection calibration coefficient obtained by the virtual static load test method is close to that from the static load test, and the evaluation results are less than 1.0, which indicates that the main girder of the cable-stayed bridge is in good bearing condition and verifies the feasibility of the virtual static load test method for evaluating the stiffness of the main girder of a large-span cable-stayed bridge under normal traffic conditions.

**Keywords:** cable-stayed bridge; virtual static load test; deflection calibration factor; stiffness assessment; environmental excitation; Kriging interpolation

桥梁是交通运输中跨越障碍的主要结构,是交通线路的关键节点。随着社会经济的快速发展,人们对基础设施的要求不断提高。斜拉桥以其卓越的跨越能力、美观的造型成为大跨径桥梁最主要的桥型之一,并得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。对于运营中的大跨度斜拉桥来说,自然灾害、人为损坏、材料老化的影响会造成主梁结构损伤和病害<sup>[2]</sup>,致使桥梁整体刚度下降,引发各种事故。因此,准确、快速地对斜拉桥主梁进行刚度评定是亟须解决的关键问题之一。

目前,学者们在桥梁状态评定方面做了大量研究,其中,基于荷载试验的评估方法发展相对完善,评估结果直接有效,成为检验桥梁状态的主要方法之一<sup>[3]</sup>。吕梁等<sup>[4]</sup>对一大跨双塔斜拉桥进行了静载试验,计算了关键截面的应变校验系数和相对残余应变,结果表明,该桥的稳定性及承载能力满足设计要求。但由于荷载试验费时费力,试验过程中需中断交通,于是许多评估桥梁状态的新方法应运而生。王文强<sup>[5]</sup>采用模型修正法,利用动静载试验数据,对一新建斜拉桥进行了贝叶斯有限元模型修正,基于基准模型进行结构承载能力评定;贾布裕等<sup>[6]</sup>通过层次分析法,采用离散动态贝叶斯网络,对某座斜拉桥进行状态评定,验证了该方法的有效性;赵启林等<sup>[7]</sup>利用光纤传感技术,实现了对桥梁承载能力的快速评估;陈志为等<sup>[8]</sup>运用BIM技术,形成了一套新的桥梁承载力评定系统;Zaurin 等<sup>[9]</sup>、Khuc 等<sup>[10]</sup>采用计算机视觉和传感器识别桥梁影响线,评估桥梁承载力;Yang 等<sup>[11]</sup>利用车辆传感技术,采用车桥耦合振动的方式识别桥梁模态参数,评估桥梁的动力特性;Santos 等<sup>[12]</sup>、Padil 等<sup>[13]</sup>基于神经网络对桥梁进行健康监测,利用监测数据评定桥梁承载力;亓兴军等<sup>[14]</sup>采用附加质量的方式预测了混凝土空心板梁单梁的模态挠度,进而证明了基于附加质量计算桥梁模态挠度、继而评估桥梁刚度的可行性。

笔者以一斜拉桥为例,在文献[15]的基础上,依托静载试验实测挠度,验证了模态挠度对于大跨径斜拉桥同样具有适用性,并设计了虚拟静载试验。通过识别实测位移柔度矩阵,评估斜拉桥主梁刚度,探究正常交通下虚拟静载试验方法应用于大跨径斜拉桥的可行性。

## 1 模态挠度计算理论

模态是结构的固有特性,柔度可以表征结构在线弹性状态下的变形能力,利用模态参数可以识别结构的位移柔度矩阵,预测结构在荷载下的位移<sup>[16]</sup>。环境激励下结构的实测振型与结构归一化振型之间存在一定的比例关系。

$$\bar{\varphi}_r = \gamma_r \varphi_r \quad (1)$$

式中: $\bar{\varphi}_r$ 为第  $r$  阶归一化振型; $\varphi_r$  为环境激励下第  $r$  阶实测振型; $\gamma_r$  为第  $r$  阶振型缩放系数。

归一化的振型满足式(2)所示关系。

$$\bar{\varphi}_r^T M \bar{\varphi}_r = 1 \quad (2)$$

式中: $M$  为结构的质量矩阵,由式(1)、式(2)可推导出振型缩放系数为

$$\gamma_r = \frac{1}{\sqrt{\varphi_r^T M \varphi_r}} \quad (3)$$

根据一般阻尼条件的复模态理论,可推导出位移频率响应函数  $H_{d(\omega)}$  的模态分解式

$$H_{d(\omega)} = \left( \frac{\varphi_r \gamma_r}{j\omega - \lambda_r} + \frac{\varphi_r^* \gamma_r^*}{j\omega - \lambda_r^*} \right) \quad (4)$$

式中: $\lambda_r$  为  $r$  阶极点  $\lambda_r = -\xi_r + j\omega_{dr}$ 、 $\xi_r$  和  $\omega_{dr}$  为第  $r$  阶阻尼比和阻尼频率。实际桥梁的阻尼较小,可设为比例阻尼,所以结构的实测模态位移柔度矩阵为

$$H_{d(\omega)} = \sum_{r=1}^n \frac{\varphi_r \varphi_r^T}{(\omega_r^2 - \omega^2) + 2j\xi_r \omega_r \omega} \quad (5)$$

式中: $\varphi_r$  为第  $r$  阶实测振型; $\omega$  为外部激励圆频率。当采用归一化振型时,模态位移柔度矩阵的计算公

式可表示为

$$H_d = \sum_{r=1}^n \frac{\varphi_r \varphi_r^T}{\omega_r^2} \quad (6)$$

式中: $H_d$ 为结构的模态位移柔度矩阵; $\varphi_r$ 为第 $r$ 阶归一化振型; $\omega_r$ 为第 $r$ 阶圆频率。

由结构的模态位移柔度矩阵 $H_d$ 和竖向静荷载 $f$ ,可计算得到结构的竖向挠度 $D$ ,如式(7)所示。

$$D = H_d \cdot f \quad (7)$$

由式(6)可知,随着参与计算的模态阶数增多,结构固有频率随之增大,对位移柔度矩阵的贡献减小,故只需前几阶模态参数参与计算便可得到满足精度要求的模态位移<sup>[17]</sup>。

## 2 斜拉桥静力试验与模态测试

### 2.1 工程概况

某斜拉桥是一座双塔双斜索面5跨连续的预应力混凝土斜拉桥,采用墩塔固结,全漂浮体系。桥长704 m,宽30 m,跨径组合为(42+120+380+120+42)m,主跨380 m,边跨设辅助墩,桥梁总体图如图1所示。桥主梁截面为带悬臂的双边主梁断面形式,悬臂端顶至梁底高2.10 m,悬臂长1.75 m,在桥塔处主梁去掉悬臂,桥宽减为26.38 m,桥面板厚度0.3 m;边跨内每4.4 m设置一道横隔梁,其余区段每7.5 m设置一道横隔梁。桥塔为A字形,采用单箱双室断面,塔高124.8 m,斜拉索在边跨主梁上的锚固间距为4.4 m,其余区段主梁上锚固间距为7.5 m,桥塔中心线两侧各15.5 m处补设第一对拉索,全桥共计196根斜拉索,主梁横断面图如图2所示。



图1 桥梁总体图

Fig.1 General drawing of the bridge

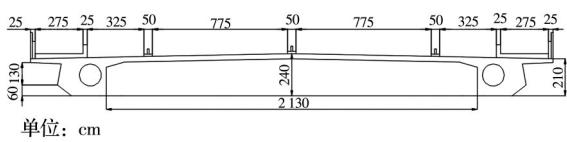


图2 主梁横断面图

Fig.2 Cross section of the main beam

### 2.2 建立有限元模型

依据斜拉桥竣工图纸建立有限元模型,主梁、横隔梁和桥塔均采用BEAM4单元模拟,桥面板采用SHELL63单元模拟,斜拉索采用LINK8单元模

拟,沥青铺装,人行道、非机动车道栏杆等采用质量单元MASS21附加到桥面节点上。建立的斜拉桥有限元模型如图3所示。



图3 斜拉桥有限元模型

Fig.3 Finite element model of the cable-stayed bridge

### 2.3 斜拉桥静载试验

根据主桥现场实际情况,结合结构受力及构造特点,选择主梁跨中控制截面按最不利布载进行静载试验,测点的选取通过计算和规范给出。依据规范设计中载和偏载2个试验工况,截面测点布置如图4所示,A1~A3为测点位置。试验共使用20辆28.14~31.66 t的三轴车进行加载,分为中载和偏载2个工况,中载①~⑩号加载车一次性加载,偏载采用分级加载的方法,1级加载采用①~⑥号车进行加载,2级加载采用①~⑩号车进行加载,3级加载采用①~⑯号车进行加载,4级加载采用①~⑳号车进行加载,共分为4级加载,各级加载完成后需进行卸载,加卸载时间间隔应满足结构反应稳定的时间要求。应在前一级荷载阶段内结构反应相对稳定、进行了有效测试及记录后方可进行下一级荷载试验,分级加载的稳定时间应不少于5 min。各级加载示意图如图5所示。

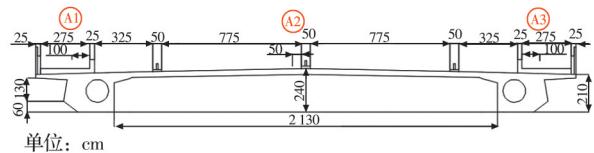


图4 跨中截面测点布置

Fig.4 Layout of measuring points at the midspan section

中载和各级偏载下的主梁跨中截面测点挠度如表1、表2所示。

### 2.4 斜拉桥模态试验

基于环境激励,在不中断交通的情况下对斜拉桥进行竖向模态测试试验。在斜拉桥左右两侧各布置37个竖向测点,全桥共设置74个测点,为保证数据采集的准确性,每侧设置2个参考点,参考点选取时应避免振型的主要节点(如2分点、4分点等),采集74个测点的速度时程数据,测点布置图6所

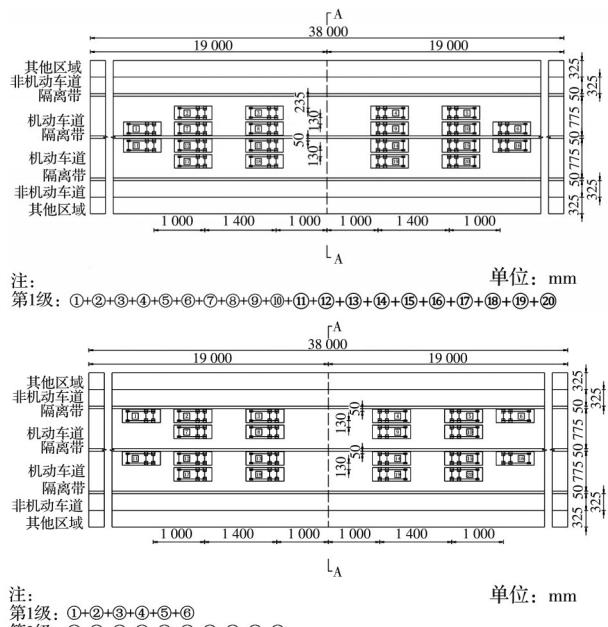


图5 加载示意图  
Fig. 5 Loading diagram

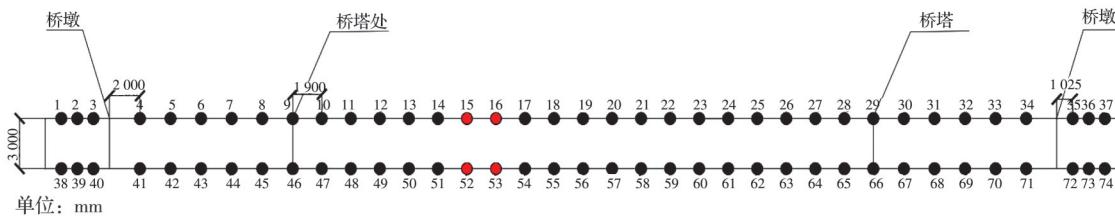


图6 测点布置图  
Fig. 6 Layout of measuring points

采用随机子空间法(SSI)、增强频域分解法(EFDD)等模态参数识别方法对采集到的速度时程数据进行模态识别,识别的前5阶振型与有限元理论竖向振型对比如图7所示,有限元计算频率和实

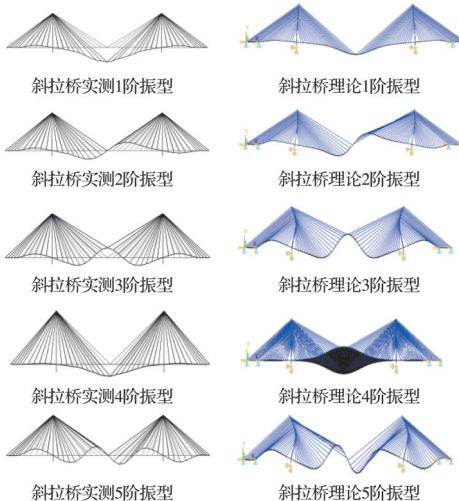


图7 斜拉桥振型

Fig. 7 Vibration mode of cable-stayed bridge

表1 中载挠度

Table 1 Deflection under medium load

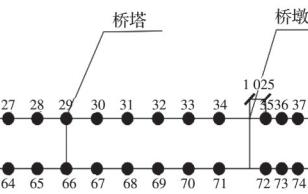
测点	挠度/mm
A1	113.82
A2	115.72
A3	111.37

表2 偏载挠度

Table 2 Deflection under eccentric load

测点	1级偏载挠度/mm	2级偏载挠度/mm	3级偏载挠度/mm	4级偏载挠度/mm
A1	39.13	70.51	102.97	116.36
A2	32.71	62.32	91.42	114.79
A3	32.94	55.12	85.60	104.49

示,其中红色点为参考点位置(15、16和52、53号点)。试验共分为左右2个工况,每个工况分为6批次进行采集,每批次包括6个移动测点和2个参考点,共8个通道,测量过程中参考点位置处的传感器不能移动。现场测试时采样频率设置为50 Hz,每批次采样时间为60 min。



测频率如表3所示。

表3 斜拉桥频率

Table 3 Frequency of cable-stayed bridge

模态阶次	实测频率/Hz	理论频率/Hz	振型描述
1	0.375	0.365	1阶竖向振动
2	0.477	0.459	2阶竖向振动
3	0.667	0.590	3阶竖向振动
4	0.714	0.671	1阶对称扭转
5	0.816	0.691	4阶竖向振动

### 3 模态挠度计算

#### 3.1 模态阶次选择

将车轮力按照轴重等效为集中荷载施加到有限元模型上,计算理论静力挠度。试算采用不同模态阶次下的斜拉桥理论模态挠度,对比分析误差,选择满足工程精度要求的最低模态阶次,减少后续实测计算时的难度。表4、表5为中载和4级偏载下理论静力挠度与分别采用前3、4、5阶理论模态参数计算的理论模态挠度对比。

由表4、表5可知,中载和偏载作用下,与静力挠

表4 中载作用下挠度对比

Table 4 Deflection comparison under medium load

测点号	静力挠度/mm	3阶/mm	4阶/mm	5阶/mm
A1	141.81	141.42	141.49	141.49
A2	147.77	143.87	143.87	143.87
A3	141.56	141.41	141.34	141.34

表5 4级偏载作用下挠度对比

Table 5 Deflection comparison under level 4 eccentric load

测点号	静力挠度/mm	3阶/mm	4阶/mm	5阶/mm
A1	147.41	141.59	145.99	145.99
A2	147.40	140.92	143.66	143.66
A3	135.96	143.69	136.46	136.46

度相比,采用前3阶理论模态参数预测的模态挠度误差较大;采用前4阶理论模态参数预测的模态挠度与前5阶相同,且与静力挠度相近,故仅采用前4阶模态参数便可准确预测该桥模态挠度。

### 3.2 模态振型扩展技术

对桥梁结构进行模态测试试验时,模态参数识别的精度与测点布置的数量息息相关,特别是对大跨径桥梁的试验分析,一般来说,测点布置的数量越多,测试结果越精确。但受试验经济性和效率要求的制约,测点数量布置较少,因此,促进了模态振型扩展技术的发展<sup>[18-19]</sup>,目前Kriging方法因仅用少量样本点即可获得良好的插值拟合效果得到广泛应用<sup>[20]</sup>。

进行静载试验时,采用了20辆加载车进行加载,但在进行模态测试试验时,受传感器数量、行车环境等因素的限制,无法对全部20辆加载车的桥面加载点进行模态测试,因此,需要基于Kriging方法对其进行模态扩展。

### 3.3 Kriging插值原理

Kriging方法是依据协方差函数对随机场进行空间建模和预测插值的回归算法,在特定的随机过程,通过加权线性组合方法求出待计算目标处的具体值。假设 $\{(x_1), (x_2) \dots (x_n)\}$ 为预测区域上的观测点,其对应的观测值分别为 $\{Z(x_1) \dots Z(x_n)\}$ 。预估点 $x_0$ 对应的预估值 $z(x_0)$ 可以采用线性表达式

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (8)$$

式中: $\lambda_i$ 为观测点对应加权值,以估计方差最小原则为标准,对 $\lambda_i$ 进行求解

$$\sigma_{k\min}^2 = E[(z^*(x_0) - z(x_0))^2] \quad (9)$$

式中: $\sigma_k$ 为Kriging估计方差,应用拉格朗日乘数法求 $\sigma_k$ 的条件极值,推出Kriging方程组的变分函数。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \bar{\gamma}(x_i - x_j) \lambda_i - \mu = \bar{\gamma}(x_0 - x_j), j = 1, 2 \dots n \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (10)$$

求解 $\lambda_i$ 后可利用式(11)、式(12)求出Kriging估计方差

$$\sigma^2 = C(x_i - x_0) + \mu - \sum_{i=1}^n \lambda_i C(x_i - x_0) \quad (11)$$

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i - x_0) + \mu - \gamma(x_i - x_0) \quad (12)$$

### 3.4 模态挠度预测

以斜拉桥前4阶实测振型为拟合对象,以斜拉桥实测的74个测点为原始样本,采用Matlab工具箱,依据Kriging插值法对20辆加载车的120个轮载点以及主跨中截面的中间测点进行插值,插值得到的前4阶车辆轮载点的振型如图8所示。

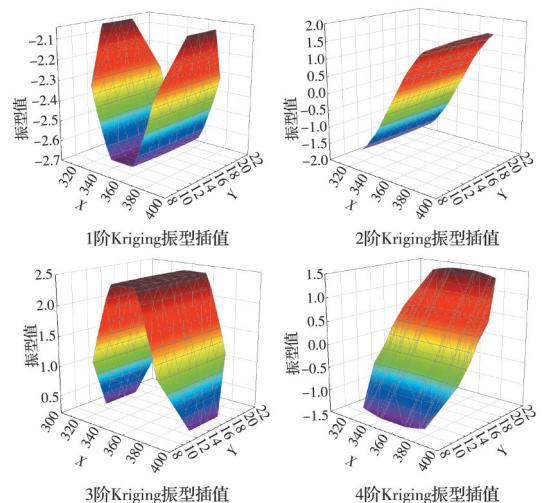


图8 Kriging插值振型图

Fig. 8 Kriging interpolation vibration mode diagram

利用实测74个测点和基于Kriging插值法扩展出的121个测点的振型值,结合前4阶实测频率,识别主梁的位移柔度矩阵。根据车辆轴重,将车辆荷载等效为集中力分配到斜拉桥主梁测点上,预测中载和各级偏载下的主梁实测模态挠度。

预测的车辆荷载作用下模态挠度如表6、表7所示。

表6 中载模态挠度

Table 6 Modal deflection under medium load

测点	挠度/mm
A1	117.54
A2	119.48
A3	117.43

表7 各级偏载模态挠度

Table 7 Modal deflection under eccentric loads at all levels

测点	1级偏载模态 挠度/mm	2级偏载模态挠度/mm	3级偏载模态挠度/mm	4级偏载模态挠度/mm
A1	39.86	66.34	99.18	120.46
A2	34.73	59.58	94.45	119.01
A3	28.69	51.22	87.10	114.21

### 3.5 模态挠度与静力挠度对比

为验证斜拉桥实测模态挠度的精度是否满足工程应用,对比分析中载和各级偏载工况下预测的跨中截面模态挠度与实测静载挠度的相对误差,分析结果如表8所示。

表8 模态挠度与静力挠度相对误差

Table 8 Relative error between modal deflection and static deflection

测点 编号	中载误 差/%	1级偏载 误差/%	2级偏载 误差/%	3级偏载 误差/%	4级偏载 误差/%
A1	3	2	-6	-4	4
A2	3	6	-4	3	4
A3	5	-13	-7	2	9

由表8可以看出,与实测静力挠度相比,预测的中载和各级偏载模态挠度中载作用下相对误差均在5%以下,偏载作用下最大误差为13%,其余相对误差在5%左右。误差主要来源于参与模态挠度预测的斜拉桥模态参数的截取,表明预测的模态挠度满足工程精度要求,可以用来评定斜拉桥主梁刚度。

## 4 虚拟静载试验设计

计算结果表明,基于模态参数预测的模态挠度满足工程精度要求,可以用来评定斜拉桥主梁刚度。在此基础上,设计一种虚拟静载试验方法,仅利用斜拉桥74个实测测点的模态参数,识别斜拉桥主梁位移柔度矩阵,预测虚拟静载下的模态挠度,在不中断交通的情况下快速评定斜拉桥刚度。

按照《公路桥梁荷载试验规程》中对静载试验的要求,对斜拉桥跨中截面设计中载和偏载下的虚拟静载试验。静载试验效率为试验荷载作用下控制截面内力计算值与控制荷载作用下该截面的最不利内力的比值,按式(13)计算,静载试验加载效率在0.85~1.05之间。

$$\eta_q = \frac{S_s}{S(1 + \mu)} \quad (13)$$

式中: $\eta_q$ 为加载效率; $S_s$ 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; $\mu$ 为按规范使用的冲击系数数值,按照计算取0.023。

该桥设计荷载为汽车-20级,依据设计荷载设计主梁跨中截面虚拟静载试验,设计荷载下跨中截面弯矩值为 $1.545 \times 10^4 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ,虚拟荷载下跨中弯矩值为 $1.580 \times 10^4 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ,计算中载虚拟设计荷载值为850 kN,计算偏载虚拟设计荷载值为1100 kN。设计荷载以集中力的形式施加在跨中截面测点上,虚拟中载施加到2片主梁跨中测点(19和56号测点),虚拟偏载仅施加到左侧主梁跨中测点(19号测点),加载效率0.98,满足《公路桥梁荷载试验规程》中加载效率的要求。

## 5 斜拉桥主梁刚度评估

根据《公路桥梁承载能力检测评定规程》,结构校验系数是指桥梁荷载试验过程中主要测点实测(应力、挠度)与理论计算值(应力、挠度)的比值,用 $\xi$ 表示,计算式为

$$\xi = \frac{S_e}{S_s} \quad (14)$$

式中: $S_e$ 为试验荷载作用下主要测点的实测弹性变位值; $S_s$ 为试验荷载作用下主要测点的理论计算变位值。 $\xi < 1$ 表明桥梁当前受力性能良好,结构的安全储备充足; $\xi > 1$ 表明桥梁受力性能较差,结构的安全储备不足。

### 5.1 静载试验下斜拉桥主梁刚度评估

根据《公路桥梁承载能力检测评定规程》,结合静载试验数据和有限元计算的理论挠度值,计算中载和4级偏载作用下斜拉桥主跨跨中截面的挠度校验系数,进行斜拉桥主梁刚度评估。中载和4级偏载工况下的挠度校验系数如表9、表10所示。

表9 中载工况下静载试验挠度校验系数

Table 9 Deflection calibration coefficient under medium load condition

测点	理论挠度/mm	静载试验挠度/mm	校验系数
A1	141.81	113.82	0.80
A2	141.56	111.37	0.79
A3	147.77	115.72	0.78

表10 4级偏载工况下静载试验挠度校验系数

Table 10 Deflection calibration coefficient under level 4 eccentric load condition

测点	理论挠度/mm	静载试验挠度/mm	校验系数
A1	147.41	116.36	0.79
A2	147.40	114.79	0.78
A3	135.96	104.49	0.77

由表9、表10可以看出:中载工况下挠度校验系数在0.78~0.80之间,偏载工况下挠度校验系数在0.77~0.79之间,静载试验作用下,计算的挠度校验系数均小于1.0,表明斜拉桥主梁刚度满足要求,且具有一定的安全储备。

## 5.2 虚拟静载试验下斜拉桥主梁刚度评估

计算虚拟静载试验下中载和偏载工况的跨中截面挠度校验系数,验证虚拟静载试验方法在评估桥梁刚度方面的适用性。表11、表12为虚拟静载试验下斜拉桥主梁跨中截面校验系数。

**表11 虚拟中载校验系数**

**Table 11 Virtual medium load check coefficient**

测点	理论挠度/mm	虚拟静载试验挠度/mm	校验系数
A1	139.97	105.78	0.76
A2	139.97	105.78	0.76

**表12 虚拟偏载校验系数**

**Table 12 Virtual partial load calibration coefficient**

测点	理论挠度/mm	虚拟静载试验挠度/mm	校验系数
A1	131.84	88.28	0.71
A3	49.29	37.46	0.76

表11、表12表明:虚拟中载试验下,跨中截面校验系数为0.76,偏载试验下校验系数为0.71和0.76,虚拟静载试验下校验系数与静载试验结果计算的挠度校验系数接近,证明虚拟静载评定大跨斜拉桥刚度的可行性。

## 6 结论

以某大跨径斜拉桥为例,对其进行静载试验和环境激励下的模态测试,评估斜拉桥主梁刚度,得到以下结论:

1)环境激励下的模态测试可以在正常交通下采集大跨径斜拉桥的速度时程信息,通过模态参数识别方法准确获取桥梁的动力特性。

2)采用模态参数识别结构模态柔度矩阵预测结构的模态挠度,仅采用低价模态参数便可达到精度要求,对该斜拉桥来说,仅采用前4阶竖向模态参数,便可对主梁的模态挠度进行预测。

3)利用Kriging插值方法可对实测振型值进行模态扩展,基于实测和扩展的模态参数可以识别主梁的模态柔度矩阵。预测结构在静载试验下模态挠度,将模态挠度与静载挠度对比,误差均小于10%,满足工程精度的要求,可以将模态挠度应用于评估斜拉桥主梁刚度。

4)设计虚拟静载试验进行斜拉桥刚度评定,结合传统静载试验和动载试验的优点,在正常交通下

对桥梁结构进行模态测试,获取结构的模态参数,识别结构柔度矩阵,预测结构在虚拟设计荷载下的模态挠度。与静载试验下的校验系数相比,计算校验系数相差较小,均小于1.0。说明该斜拉桥承载状况良好,采用虚拟静载试验方法评定结果同样准确,因此,可以使用虚拟静载试验方法,以达到快速评定大跨斜拉桥主梁刚度的目的。

## 参考文献

- [1] 吕文高,何政.竖向荷载作用下漂浮体系斜拉桥极限承载能力与失效模式分析[J].工程力学,2022,39(5):145-158.
- LV W G, HE Z. Analysis on ultimate load-carrying capacity and failure modes of long-span cable-stayed bridges with floating systems under the action of vertical loads [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(5): 145-158. (in Chinese)
- [2] 胡银鹏.大跨径混凝土斜拉桥成桥荷载试验与极限承载能力分析[D].合肥:合肥工业大学,2020.
- HU Y P. Load test and ultimate bearing capacity analysis of long-span concrete cable-stayed bridge [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [3] 肖永勇.大跨度预应力混凝土连续刚构桥荷载试验研究[D].四川绵阳:西南科技大学,2020.
- XIAO Y Y. Experimental study on load of long-span prestressed concrete continuous rigid frame bridge [D]. Mianyang, Sichuan: Southwest University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [4] 吕梁,贾毅,纪云涛,等.基于荷载试验的双塔部分斜拉桥承载能力评估[J].建筑科学与工程学报,2019,36(3):101-109.
- LYU L, JIA Y, JI Y T, et al. Bearing capacity evaluation of extradosed cable-stayed bridge with double towers based on load tests [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2019, 36(3): 101-109. (in Chinese)
- [5] 王文强.基于静动载试验的钢混组合塔斜拉桥承载能力评定[D].合肥:合肥工业大学,2021.
- WANG W Q. Evaluation of bearing capacity of steel-concrete composite tower cable-stayed bridge based on static and dynamic load test [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [6] 贾布裕,余晓琳,颜全胜.基于离散动态贝叶斯网络的桥梁状态评估方法[J].桥梁建设,2016,46(3):74-79.
- JIA B Y, YU X L, YAN Q S. Method of bridge condition assessment based on discrete dynamic Bayesian networks [J]. Bridge Construction, 2016, 46(3): 74-79. (in Chinese)
- [7] 赵启林,姚冰,李志刚.基于光纤传感技术的桥梁承载力快速评定法[J].解放军理工大学学报(自然科学版),

- 2006, 7(6): 574-579.
- ZHAO Q L, YAO B, LI Z G. Rapid evaluation of bridge carrying capability based on optical fiber sensing technology [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2006, 7(6): 574-579. (in Chinese)
- [8] 陈志为, 陈宇, 吴焜, 等. BIM 技术在桥梁承载力评定中的应用 [J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(5): 101-108.
- CHEN Z W, CHEN Y, WU K, et al. Application of BIM technology in bridge bearing capacity evaluation [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(5): 101-108. (in Chinese)
- [9] ZAURIN R, CATBAS F N. Integration of computer imaging and sensor data for structural health monitoring of bridges [J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(1): 015019.
- [10] KHUC T, CATBAS F N. Structural identification using computer vision-based bridge health monitoring [J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(2): 04017202.
- [11] YANG Y B, LI Z, WANG Z L, et al. A novel frequency-free movable test vehicle for retrieving modal parameters of bridges: Theory and experiment [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 170: 108854.
- [12] SANTOS A, FIGUEIREDO E, SILVA M F M, et al. Machine learning algorithms for damage detection: Kernel-based approaches [J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 363: 584-599.
- [13] PADIL K H, BAKHARY N, HAO H. The use of a non-probabilistic artificial neural network to consider uncertainties in vibration-based-damage detection [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 83: 194-209.
- [14] 元兴军, 孙绪法, 王珊珊, 等. 基于附加质量块的桥梁模态挠度预测方法研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(19): 104-113.
- QI X J, SUN X F, WANG S S, et al. Research on prediction method of bridge modal deflection based on additional mass block [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(19): 104-113. (in Chinese)
- [15] 元兴军, 孙绪法, 周广利, 等. 基于模态测试的装配式简支梁桥等效荷载试验方法研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2022, 42(4): 61-69.
- QI X J, SUN X F, ZHOU G L, et al. Study on equivalent load test method of assembled simply supported beam bridge based on modal test [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(4): 61-69. (in Chinese)
- [16] 元兴军, 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 X J, SUN X F, ZHAO Y, 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. (in Chinese)
- [17] 元兴军, 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 X J, ZHAO Y, ZHAO Q. 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. (in Chinese)
- [18] CHEN H P, MAUNG T S. Regularised finite element model updating using measured incomplete modal data [J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(21): 5566-5582.
- [19] BRINCKER R, SKAFTE A, LÓPEZ-AENLLE M, et al. A local correspondence principle for mode shapes in structural dynamics [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 45(1): 91-104.
- [20] 陈宇轩. 基于 Kriging 方法的大跨度拱桥模态扩展及有限元模型修正 [D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- CHEN Y X. Modal expansion and finite element model updating of long-span arch bridge based on Kriging method [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)