

# Load Test Research and Bearing Capacity Evaluation of Straight Web Box Girder with Wings

Yu Duan<sup>1</sup> Baobing Wang<sup>2</sup>

1. Zhaotong Management Office of Yunnan Communications Investment & Construction Group Co., Ltd., Zhaotong, Yunnan, 657000, China

2. Yunnan Tongqu Engineering Testing Co., Ltd, Kunming, Yunnan, 650000, China

## Abstract

In order to evaluate the mechanical condition and working performance of K111+409.5 bridge of highway from Zhaoyang to Yongshan reconstruction project of S101 provincial highway, the bridge is a new type of structure, its upper structure is a straight web box girder with wings, which has certain scientific research and experimental. Through the static and dynamic load test to study the real stress condition, the static load test is to distribute the load reasonably according to the test load efficiency in the corresponding test section and test the stress and displacement of the corresponding test points of each section of the main beam; the dynamic load test is to test the natural frequency, damping ratio and impact coefficient of the bridge through the modal test and sports car test. The results show that the main tensile strain calibration coefficient, deflection and strain calibration coefficient of the bridge are all within the standard allowable value of 1, the actual performance of the bridge is very good, the maximum relative residual strain and residual deflection are 9.36% and 2.21% respectively, and they are within the standard allowable value of 20%, the whole bridge is in the elastic deformation stage; under the dynamic load, the first vertical natural frequency of the bridge is 4.883, The damping ratio is 0.005%, the impact coefficient of strain test is between 1.07 ~ 1.26, the frequency of vertical measurement is greater than the theoretical calculation frequency, and the overall structural rigidity of the bridge meets the design requirements.

## Keywords

straight web box girder; load test; check coefficient; dynamic load

# 直腹板带翼箱梁桥荷载试验研究与承载力评定

段宇<sup>1</sup> 王保兵<sup>2</sup>

1. 云南省交通投资建设集团有限公司昭通管理处, 中国·云南 昭通 657000

2. 云南通衢工程检测有限公司, 中国·云南 昆明 650000

## 摘要

为评价中国省道 S101 线昭阳至永善公路改建工程 K111+409.5 桥的受力状况与工作性能, 该桥是一种新型结构形式桥, 其上部结构为直腹板带翼箱梁, 具有一定的科研试验性。通过静动载试验研究其真实受力状况, 静载试验是在相应的测试截面按照试验荷载效率合理布载并测试主梁各截面相应测点应力和位移; 动载试验是通过模态试验和跑车试验来测试该桥的固有频率、阻尼比和冲击系数。结果表明: 该桥主拉应变校验系数、挠度和应变校验系数均未超出标准容许值 1, 桥梁实际工作性能很好, 相对残余应变和残余挠度最大值分别为 9.36% 和 2.21%, 都未超出标准容许值 20%, 桥梁整体处于弹性变形阶段; 在动力荷载作用下, 桥梁第 1 阶竖向自振频率为 4.883, 阻尼比为 0.005%, 应变测试所得冲击系数在 1.07~1.26 之间, 竖向实测的频率大于理论计算频率, 桥梁整体结构刚度满足设计要求。

## 关键词

直腹板箱梁; 荷载试验; 校验系数; 动力荷载

## 1 引言

随着中国经济的快速增长, 道路交通行业得到飞速的发展, 桥梁作为交通运输的咽喉, 其使用功能的正常与否直接关系到整条公路的运行。为保证箱梁桥成桥后的正常运营, 需要对箱梁桥进行荷载试验与承载力评定来确定桥梁的真实受力状况。

目前, 全球许多的学者已对箱梁桥荷载试验研究与承载力评定研究, 并取得了一定的研究成果。Demeke B. Ashebo<sup>[1]</sup> 对斜交小箱梁动力特性试验分析; Khalim, Mohse<sup>[2]</sup> 等对中间隔板多室箱梁桥的荷载试验与横向荷载分布系数的研究; Dereck J. Hodson<sup>[3]</sup> 对箱梁桥进行了荷载试验和有限元模拟分析的研究; 钱寅泉<sup>[4]</sup> 对装配式小箱梁桥荷载横向分布数值分

析与荷载试验的分析研究；杨美良、石恩崇等<sup>[5]</sup>对组合式小箱梁桥基于荷载试验对荷载横向分布的研究；周勇军<sup>[6]</sup>对箱梁桥荷载试验和加载车辆的研究。但是目前国内针对直腹式带翼箱梁桥的荷载试验研究却鲜有文献提及。因此，开展此课题的研究具有应用价值。

论文以 K111+409.5 中桥为依托工程，该桥位于省道 S101 线昭阳至永善公路改建工程项目莲峰至黄华丫口段。上部结构是 30m+16 m 的预应力混凝土带翼箱梁，下部结构包括的桥墩为双圆柱式墩、其基础设有钻孔灌注桩；两岸桥台均为重力式桥台，设计荷载为公路-II级。桥面宽度：2x0.5m(护栏)+8m(行车道)=9m，R=800m 的右偏圆曲线位于桥平面上，桥面设有 2% 的双向横坡，纵断面设有 4% 的纵坡；墩台径向布置；全桥有 2 个伸缩缝。

利用 MIDAS/Civil 建立该桥梁格模型模拟公路-II级荷载并进行分析，在静力荷载下测试上部结构每个截面测点的应力和位移值，分析和对比各测试面相应测点的应力和位移值是否符合设计规范。

## 2 桥梁静载试验

### 2.1 静载试验原则

静载试验主要测试桥梁上部主体结构各控制截面测点的应变、位移、卸载完的残余应变和残余变形<sup>[7]</sup>，综合评价桥梁主体结构性能。采用汽车荷载模拟设计荷载，在主体结构控制截面内力影响线最不利位置加载，使其试验荷载效率系数在 0.85~1.05 之间。根据计算分析确定该桥静载试验需 2 辆 45T 双后轴特重车，试验车满载时轴重、轴距如图 1 所示。

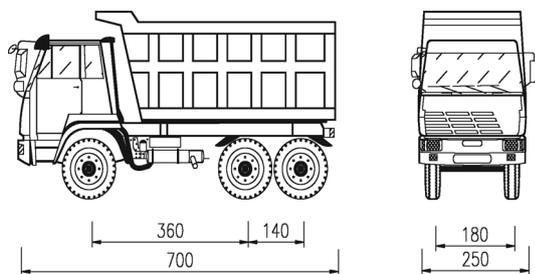


图 1 试验车

应变测试：应变片布于相应测试面的箱梁底部和箱梁腹板，其电阻为 120Ω，灵敏度系数为 2.08，标距为 10cm，运用 DH3819 无线静态应变测试仪采集并分析试验数据。

挠度测试：在各控制截面箱梁底部，采用悬挂钢丝+吊

锤+百分表的方法，既在测试截面梁底部中间设置挂钩，在挂钩上悬挂钢丝，钢丝底部悬吊重锤，重锤下面架设百分表，重锤通过固定支架来约束，如图 2 所示。

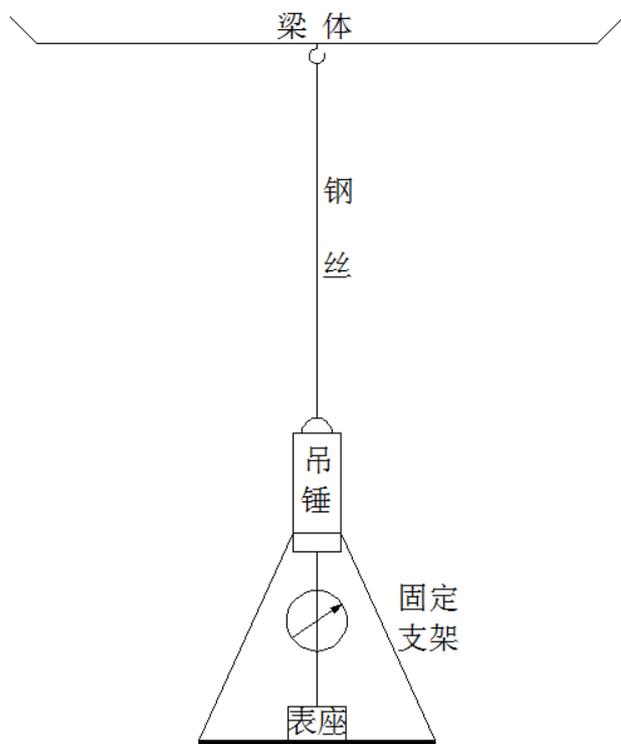


图 2 挠度测试装置示意

### 2.2 测试截面及测点布置

根据受力最不利的原理，选 1# 跨作为测试跨，主要测试 1# 跨 J1、J2 和 J3 截面各主梁的应力以及变形情况，测试截面布置如图 3 所示；在每个控制面梁的底部和侧面布设相应的应变点，沿大里程方向，从左往右，J1 断面布设 14 个应变点、J2 断面布设 8 个应变点，其中 J2 断面腹板没有应变点、梁端剪力 J3 断面布设 4 个应变点，具体布置如图 4 所示。

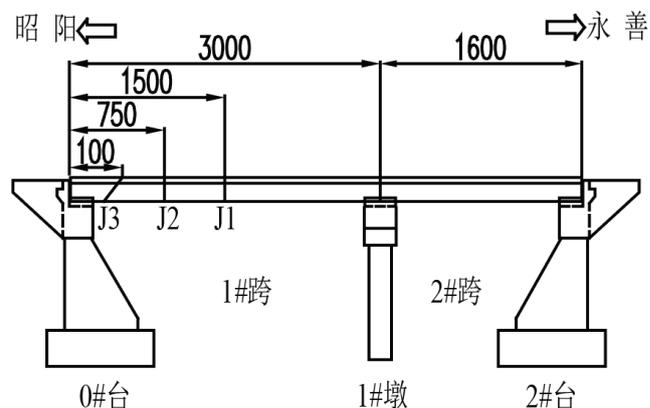
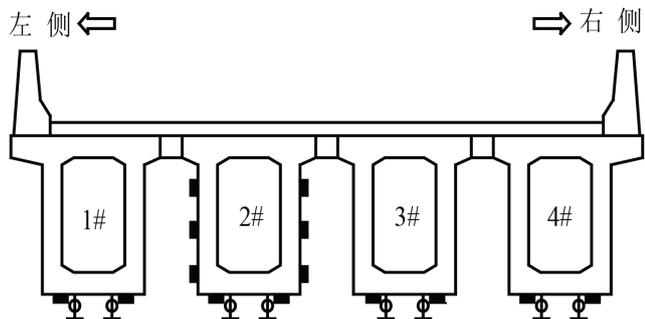
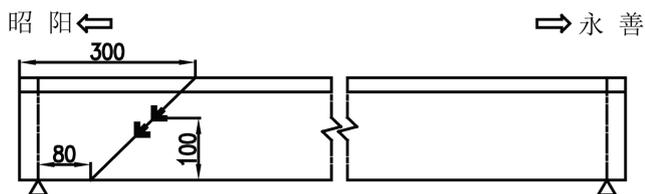


图 3 测试面布置图 (单位: cm)



(a) J1、J2 测试面应变和挠度测点布置图



(b) J3 测试面应变测点横向布置图

注：“■”表示应变测点、“Φ”表示挠度测点

图 4 测试面应变和挠度测点布置图 (单位: cm)

### 2.3 荷载布置与测试工况

在 1# 跨的 J1、J2 和 J3 三个截面依次进行加载, 每一截面加载车沿横向布置 2 辆车, 加载方式分为中载和偏载, 其中梁端剪力截面加载方式为偏载。结构计算按特载 45T 在最不利位置布载, 取控制截面最大正弯矩和梁端最大剪力作为加载截面的控制值, 荷载流程详见表 1。

表 1 荷载试验流程

荷载工况	控制截面	加载方式	测试内容
工况 1	J1 截面	偏载	挠度与应变
工况 2	J1 截面	中载	挠度与应变
工况 3	J2 截面	偏载	挠度与应变
工况 4	J2 截面	中载	挠度与应变
工况 5	J3 截面	偏载	应变

### 2.4 静载试验效率

为了满足设计荷载效应的要求, 试验车的数量和轴重是根据控制内力等效原则来选择, 使得静载效率  $\eta_q$  介于 0.85~1.05, 测试前对试验车辆进行称重。按式 (1) [7] 计算:

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

在试验加载分析时, 考虑 2 车道荷载, 设计荷载中已考虑了冲击系数, 但不考虑横向折减。通过加载位置、加载吨位等调整控制静载效率  $\eta_q$  介于 0.85~1.05, 该桥静载效率值详见表 2。

表 2 静荷载效率系数

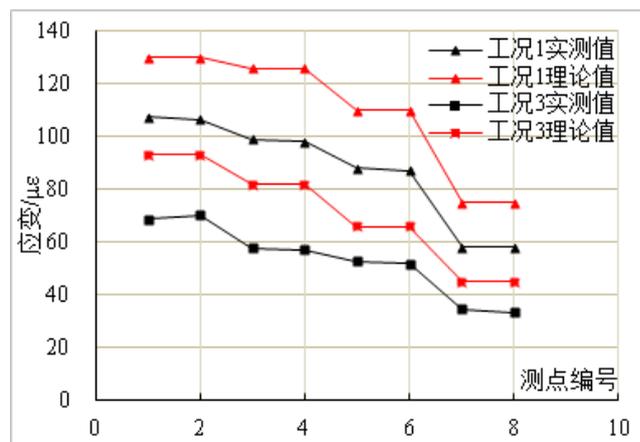
工况	$M_s / (kN \cdot m)$	$M_t / (kN \cdot m)$	$\eta_q$
工况 1	1420.1	1417.32	1.00
工况 2	1360.9	1404.2	1.03
工况 3	1075.6	986.5	0.92
工况 4	1041.2	1024.3	0.98
工况 5	292/kN	278/kN	0.95

### 2.5 试验结果分析

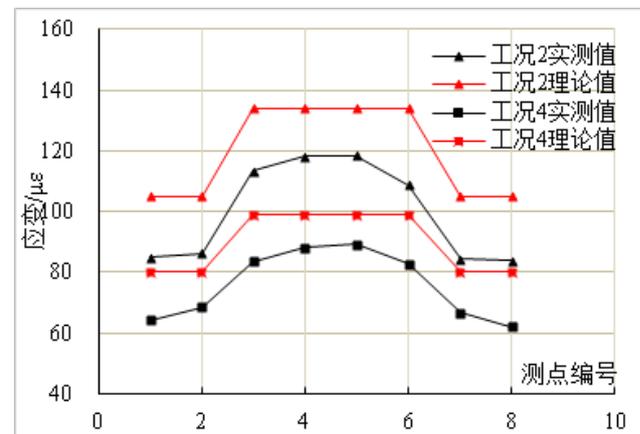
#### 2.5.1 应变测试结果分析

在试验荷载作用下, 应变校验系数在 0.70~0.90 之间, 表明桥梁结构强度是符合设计要求, 桥梁整体工作性能良好; 相对残余应变值小于 9.36%, 小于文献 [7] 规定的 20%, 说明该桥整体刚度有一定余度, 上部结构处于弹性变形; 在受力作用下各测试截面无异常, 桥梁整体处于正常受力状况。

根据应变测试的结果, 将每个测试点的弹性应变与理论弹性应变绘制成图 5 所示。



(a) 工况 1 和工况 3 应变值



(b) 工况 2 和工况 4 应变值

图 5 各工况下理论与实测弹性应变对比曲线

从图5可知,在试验荷载下,各测试面的实测应变值与理论计算值沿桥横向变化规律是一致的,且测试值均小于理论计算值,说明该桥横向力传递正常,桥梁整体刚度分布相对均匀。

### 2.5.2 梁体侧面应变测试结果

在试验荷载下,2#梁腹板的应变数据如表4所示,根据测试应变沿梁高度的分布,分析2#梁体中性轴的高度及工作状态,如图6所示。

表3 梁体侧面实测应变-梁高比较

梁号	测点位置	测点高/(cm)	实测应变值/( $\mu\epsilon$ )
2#	左腹板上	130	-21
	左腹板中	75	26
	左腹板下	20	69
	平均值	0	87
	右腹板上	130	-15
	右腹板中	75	26
	右腹板下	20	35

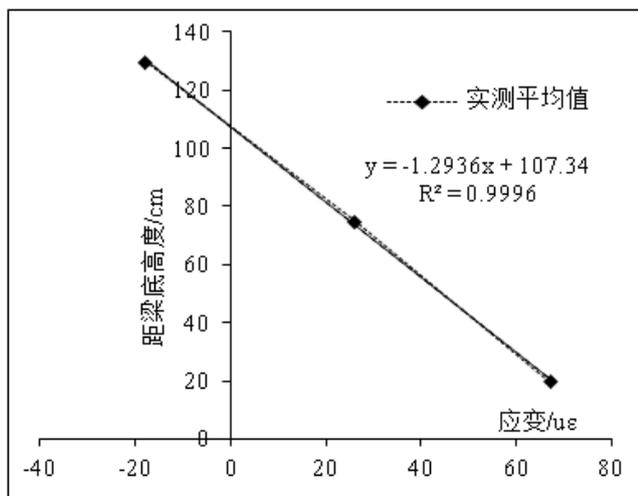


图6 实测弹性应变-梁高分布图

由图6分析可得,2#梁体测试应变值沿梁高的变化具有良好的线性关系,梁腹板截面的变形符合平面假设,说明2#梁在车辆荷载下处于弹性变形阶段。根据线性回归方程可得,2#梁体的实测中和轴距梁底距离为107.34cm,理论中和轴高度为99.6cm,出现偏差的原因是桥面铺装、混凝土护栏等参与受力有关,属于正常现象。

### 2.5.3 梁端抗剪截面测试结果

在各荷载作用下,J3测试面2#梁每个测试点主拉应变测试值与理论计算值的比较如表4所示。

表4 实测主拉应变值与理论值的比较

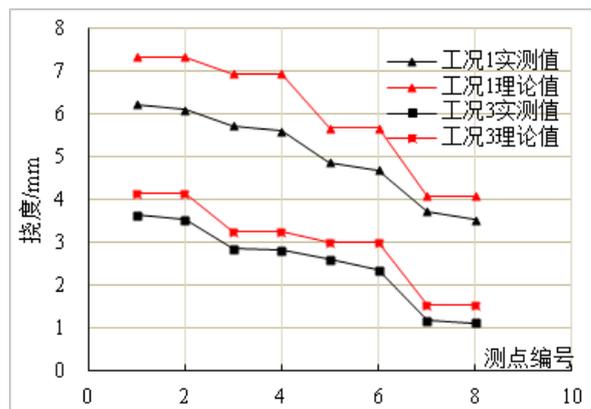
工况	测点编号	主拉应变实测值/( $\mu\epsilon$ )	主拉应变计算值/( $\mu\epsilon$ )	校验系数/ $\eta$
工况1	1#	17.3	28.0	0.63
	2#	13.1	28.0	0.48
5	3#	14.6	32.0	0.45
	4#	17.7	32.0	0.54

由表4可见,2#梁的J3剪力截面4个应变测试点的主拉应变校验系数介于0.45~0.63,满足文献<sup>[7]</sup>中校验系数 $< 1$ 的要求;在试验过程中,对各测试截面附近进行肉眼观察,未发现肉眼可见裂缝,说明梁端抗剪承载力满足设计要求。

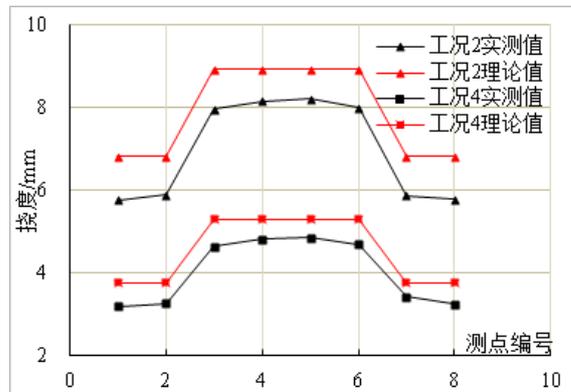
### 2.5.4 挠度测试结果分析

在各工况下,挠度校验系数介于0.73~0.92之间,挠度实测值的最大变形为8.21mm,为计算跨径(29.40m)的1/3581,表明结构的刚度有一定冗余度;大部分测量点的残余变形值都为0,表明该桥变形恢复较好,少数测量点具有残余变形,最大相对残余变形为2.21%,整体结构处于弹性阶段和正常受力状况。

根据挠度测试结果,将各测点的测试弹性挠度值与理论弹性挠度值绘制成图7所示。



(a) 工况1和工况3挠度值



(b) 工况2和工况4挠度值

图7 各工况下实测与理论弹性挠度对比曲线

从图 7 看出,在各工况下,测试的弹性挠度值与理论弹性挠度值沿桥横向变化基本一致,且实测弹性挠度均小于理论弹性挠度,表明结构整体的横向传力正常,刚度分配相对均匀。

### 3 桥梁动载试验

#### 3.1 试验内容

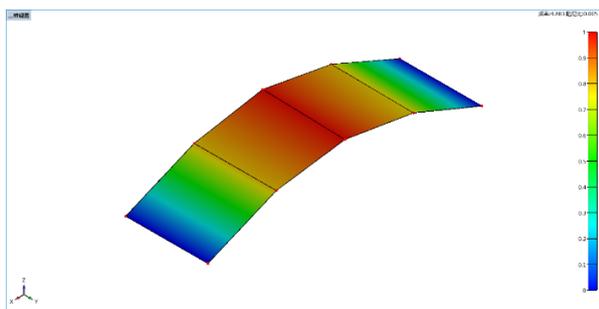
本次动力荷载试验主要包括是模态试验和跑车试验<sup>[7]</sup>。模态测试是用 DH5907N 无线模态测试仪来测试桥梁自振特性;跑车试验是用 DH5908 动态信号测试仪来收集和分析动应变;用 1 辆 450kN 的试验车以 10~30km/h 速度沿行车道中央匀速过桥来测试桥梁上部结构的动应变。

#### 3.2 自振特性结果和分析

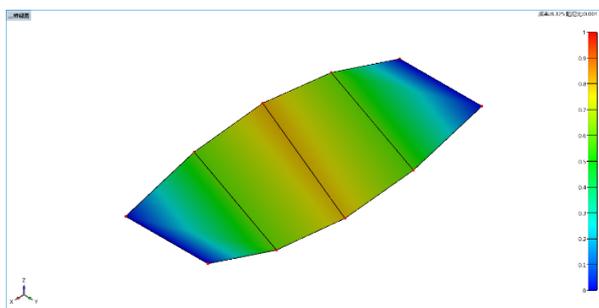
根据环境激振下桥梁的动态响应信号和跑车试验的余振信号,可以得出该桥自振特性和阻尼比,则测试值与理论值见表 5,各阶实测模态振型如图 8 所示。

表 5 脉动试验结果

阶数	理论基频 / (Hz)	实测基频 / (Hz)	实测阻尼比 / (%)	实测频率 / 理论频率
1 阶	3.921	4.883	0.005	1.245
2 阶	6.140	8.325	0.004	1.356



(a) 一阶竖弯实测振型



(b) 二阶竖弯实测振型

图 8 一阶和二阶实测振型

#### 3.3 冲击系数结果和分析

跑车试验选 1# 跨 J1 截面和 J2 截面的 2# 梁、3# 梁,

在行驶车辆荷载作用下测试桥梁上部结构的动态应变。根据跑车试验中动态应变的峰值和谷值来计算应变冲击系数,如表 6 所示。根据理论计算基频,试验桥梁理论计算冲击系数  $\mu=0.32$ 。

表 6 冲击系数测试值

测试截面	行车速度 / (km·h <sup>-1</sup> )	最大动应变 / ( $\mu\epsilon$ )	冲击系数 / (1+ $\mu$ )
J1	10	23	1.07
	20	26	1.15
	30	31	1.21
J2	10	17	1.14
	20	21	1.19
	30	24	1.26

由表 6 可知,随着行车速度不断的增加,所对应的冲击系数呈明显递增的趋势,其增加量变化很小,动应变随时间的变化曲线较好,试验测得最大动力系数为 1.26,相应的动应变增值为 0.26,小于理论计算值 0.32,表明桥面行车舒适。

### 4 结语

(1) 在各工况下,静载效率介于 0.92~1.03,在规范允许值 0.85~1.05 范围内,说明静载试验成立。

(2) 在不同工况下,挠度校验系数介于 0.73~0.92,应变校验系数介于 0.70~0.90,主拉应力校验系数介于 0.45~0.63 之间,表明桥梁整体刚度大且具有一定富余度,梁端剪切力满足设计规范。

(3) 在不同工况下,每个测点的相对残余变形和残余应变值均为 0,其中相对残余应变和残余变形最大值分别为 9.36% 和 2.21%,都未超出 20% 的规范极限值,表明该桥整体处在弹性状况,整体刚度较大。

(4) 动力测试结果表明,竖向一阶、二阶振动实测频率与理论频率比值分别为 1.245 和 1.356,满足规范中  $\geq 0.9$  的要求;在跑车试验中,动态应变增值为 0.26,小于理论计算值 0.39,表明桥面行车舒适。

### 参考文献

[1] Demeke B, Tommy H.T. Evaluation of dynamic loads on a skew box girder continuous bridge[J]. Engineering Structures, 2006, (29):1052-1063.  
[2] Khalim, Mohseni, et al. Effect of intermediate diaphragm on lateral load distribution factor of multicell box-girder bridges[J]. KSCE

- Journal of Civil Engineering,2014,18(7):2128–2137.
- [3] Dereck J. Hodson. Live Load Test and Finite Element Analysis of a Box Girder Bridge for the Long Term Bridge Performance Program. [J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2010,27(3):2016–2200.
- [4] 钱寅泉,周正茂. 装配式小箱梁桥荷载横向分布数值分析与试验 [J]. 公路交通技术,2012,(29):86–90.
- [5] 杨美良,石恩崇. 先简支后连续斜交小箱梁桥荷载横向分布研究 [J]. 中外公路,2014,34(5):142–146.
- [6] 周勇军,于明策. 中小跨径箱梁桥荷载试验加载车辆研究 [J]. 中外公路,2014,34(3):105–109.
- [7] JTG/T J21–2011. 公路桥梁承载能力检测评 [S]. 中华人民共和国交通运输部.2011