

文章编号:1673-2049(2017)04-0105-07

# 大跨连续刚构桥荷载试验研究

贾毅<sup>1</sup>, 白伦华<sup>1</sup>, 纪云涛<sup>2</sup>, 李均进<sup>2</sup>, 袁冬梅<sup>3</sup>

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031;

2. 云南省公路科学技术研究院, 云南 昆明 650000; 3. 四川良友建设咨询有限公司, 四川 成都 610041)

**摘要:**以龙陵至瑞丽高速公路上某大跨连续刚构桥为工程背景,基于现场荷载试验方法,对其在运营状态下的承载力及动力性能进行了研究。首先,详细介绍了试验过程中应变、挠度及振动模态测点的布置方式;然后,根据荷载效应等效原则确定试验设计荷载,针对连续刚构桥结构内力分布特点,选取典型截面最不利正负弯矩的活载布置方式,确定静力加载工况,同时制定了考虑不同车速及行车方式影响的动载试验方案,通过脉动试验提取模态测点数据,利用相关仪器中快速傅里叶变换(FFT)分析得出模态结果;最后,将实测结果与有限元结果进行对比分析。结果表明:静载试验的应变和挠度实测值均小于计算值,满足规范要求;动载影响下,冲击系数对行车方式更为敏感,表现为当车速为 $20\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,主跨跨中截面跳车时冲击系数(0.25)较匀速跑车(0.05)增大5倍;桥梁结构整体承载能力及刚度满足设计荷载(公路-I级)正常使用要求。

**关键词:**荷载试验;连续刚构桥;效率系数;自振特性;校验系数;承载能力

**中图分类号:**U448.21

**文献标志码:**A

## Study of Load Tests for Long-span Continuous Rigid Frame Bridge

JIA Yi<sup>1</sup>, BAI Lun-hua<sup>1</sup>, JI Yun-tao<sup>2</sup>, LI Jun-jin<sup>2</sup>, YUAN Dong-mei<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. Yunnan Research Institute of Highway Science and Technology, Kunming 650000, Yunnan, China;

3. Sichuan Good Friendship Construction Consultation Co., Ltd, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** Based on a long-span continuous rigid frame bridge in Longling to Ruili highway, the bearing capacity and dynamic performance of the operating state were studied by field load test method. Firstly, arrangements of the strain, deflection and modal measuring point were introduced; then, test design load was determined based on load equivalent principle, and according to internal force distribution characteristics, the live load layout method of the most unfavorable positive and negative moments of the typical section was selected, and the static loading cases were determined, meanwhile dynamic load test program considering the influence of different speeds and running modes was established. Through the environmental excitation method, the modal results were obtained by using fast Fourier transform (FFT) in relevant instruments. Finally, the measured results and the finite element results were compared and analyzed. The results show that the static load test measured values of strain and deflection are less than the calculated values, and they can meet requirements of specifications; the dynamic load under the influence of impact coefficient is more sensitive to the traffic way, as when the

收稿日期:2016-12-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51308471);昆明市科学基金项目(2015-1-G-01089);昆明市官渡区科技基金项目(2015G06)

作者简介:贾毅(1988-),男,四川巴中人,工学博士研究生,E-mail:jiayi0715vip@sina.com。

speed is  $20\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , impact coefficient of the main span of cross section is jumping to 0.25 compared with that of the uniform velocity 0.05, increased about 5 times; the overall load-carrying capacity and stiffness of bridge structure meet the requirements of normal use under design load (highway-grade I).

**Key words:** load test; continuous rigid frame bridge; efficiency coefficient; natural vibration characteristic; calibration coefficient; load-carrying capacity

0 引言

无论是既有桥梁,还是新建桥梁,基于荷载试验进行性能评估是确保其能正常安全地投入运营状态的必要技术手段。近些年,随着中国桥梁建设事业的发展,对各种桥梁结构体系,如斜拉桥<sup>[1]</sup>、悬索桥<sup>[2-3]</sup>、拱桥<sup>[4-5]</sup>及梁桥<sup>[6-8]</sup>的荷载试验研究较为广泛。同时,现场荷载试验的实测数据也是验证及修正计算模型的直接依据<sup>[9]</sup>。

1988 年,广东番禺洛溪大桥成功建成<sup>[10]</sup>,预应力混凝土连续刚构桥随后在公路交通建设中得到广泛的发展及应用,其施工技术、计算理论及耐久性养护方法等方面的研究也取得了不少成果。将合理的成桥状态作为其后续相关研究的基准状态十分重要,但是此类桥型为超静定结构,对温度效应、支座沉降等敏感;施工过程工序繁多,并伴有结构体系的转化;常用的箱梁截面空间效应显著。若采用计算方法完全考虑上述因素,往往因漏掉施工误差、现场环境随机因子影响,而不能真实反映其成桥状态。因此,在桥梁建成时,以理论分析结合荷载试验的方法对其成桥状态是否合理进行判定十分必要,并已发展为常用的桥检方法。

本文以龙陵至瑞丽高速公路上某大跨连续刚构桥为工程背景,结合相关规范中的指标要求,如静载效率系数、动力冲击系数及振动模态参数等,开展了该桥的静载、动载及振动试验。根据理论分析与结构特点,合理布置测点位置,将测试结果与相应有限元结果进行对比,对该桥的强度、刚度及动力特性等进行评价,检验桥梁设计与施工质量,验证桥梁结构设计理论和设计方法的合理性。

1 工程概况

本文以龙陵至瑞丽高速公路上某跨径布置为  $90\text{ m}+160\text{ m}+90\text{ m}$  的预应力混凝土连续刚构桥为工程背景。该桥分左、右幅,桥宽各为  $12\text{ m}$ 。该桥平面主要位于直线,只有瑞丽岸桥台位于缓和曲线,立面位于坡度为  $-2.5\%$  的纵坡上。截面采用单箱

单室直腹板箱梁,箱梁顶板宽  $12\text{ m}$ ,底板宽  $6.5\text{ m}$ ,箱梁根部梁高  $10\text{ m}$ ,跨中及端部梁高  $3.5\text{ m}$ ,梁高按 1.6 次方抛物线变化;主桥箱梁采用纵向、竖向双向预应力结构,纵向预应力采用大吨位群锚体系,竖向预应力采用精轧螺纹钢钢筋锚固体体系。桥梁总体布置如图 1 所示。

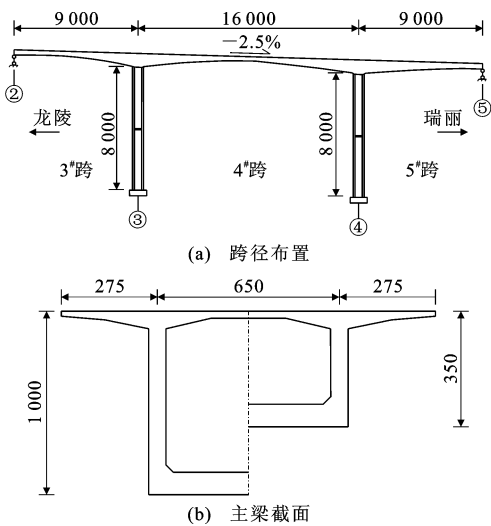


图 1 全桥总体布置(单位:cm)

Fig. 1 General Arrangement of Bridge (Unit:cm)

2 荷载试验及有限元模型

2.1 试验依据及评定指标

本文主要参照交通部颁布的相关规范、桥梁荷载试验专著<sup>[11-12]</sup>和工程竣工图、变更图及其他相关文件数据,确定了本次试验内容及指标,该桥的荷载试验评定指标见表 1。

表 1 荷载试验评定指标

Tab. 1 Evaluation Indexes of Load Test

试验类型	评定指标
静载试验	荷载效率系数、应力、挠度
动载试验	动应变、冲击系数
振动模态测试	振动频率

2.2 测点布置及采集设备

根据该桥上部箱梁结构特点,选取边跨最大正弯矩截面、墩顶(箱梁悬臂根部)负弯矩截面、中跨

$L/4, L/2, 3L/4$  ( $L$  为跨径) 截面共计 9 个截面布设 37 个应变测点, 动应变测点布设于中跨  $L/2$  截面; 选取边跨支点、墩顶支点截面, 边跨最大正弯矩截面, 中跨  $L/4, L/2, 3L/4$  截面共计 9 个截面布设 17

个挠度测点; 纵桥向设置 15 个测试截面 (按边跨四分之一点、中跨八分点设置), 沿桥面中线布置。测点布置具体情况如图 2 所示。表 2 为静载试验工况测试项目及试验荷载效率。

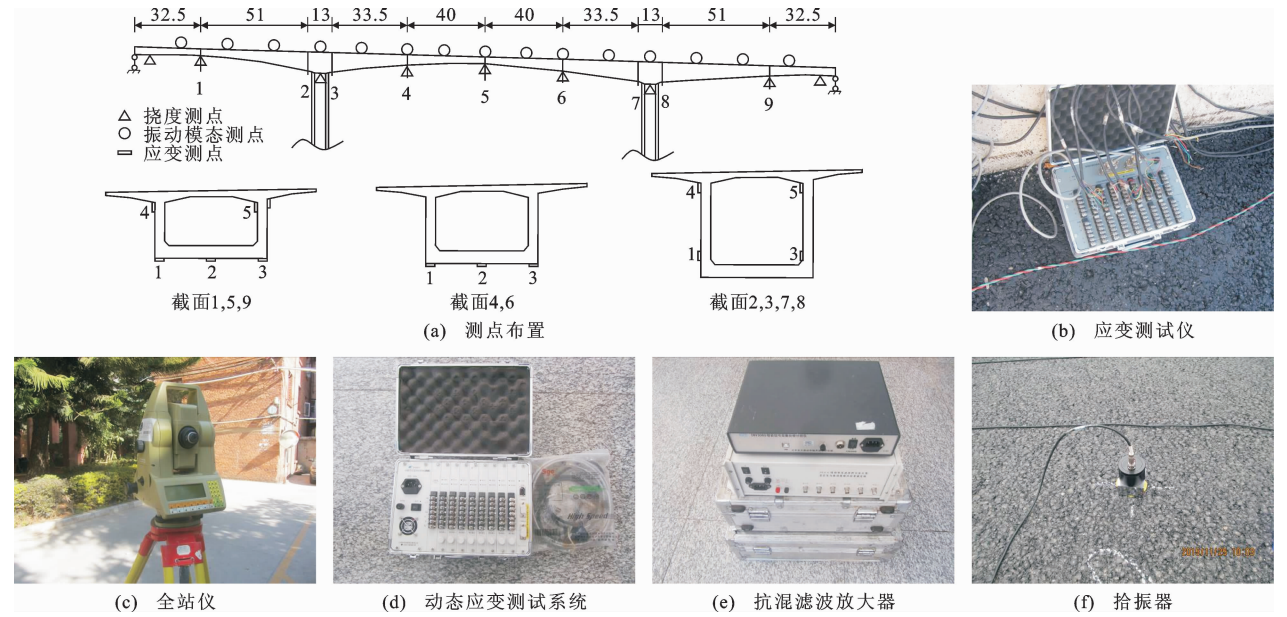


图 2 测点布置及测试仪 (单位:m)

Fig. 2 Arrangements of Measuring Points and Measuring Instruments (Unit:m)

表 2 静载试验工况测试项目及试验荷载效率

Tab. 2 Items of Static Load Test Cases and Load Efficiencies

测试截面位置	测试项目	工况编号	布载方式	设计荷载计算值 $S'/(kN \cdot m)$	试验荷载效应值 $S_s/(kN \cdot m)$	试验荷载效率 $\eta_1$
3# 跨截面 1	截面 1 最大正弯矩 $M_{max}$	1	中载	20 856	21 707	1.04
		2	偏载			
3# 主墩墩顶截面 3	截面 3 最大负弯矩 $M_{min}$	3	中载	-73 315	-72 511	0.99
		4	偏载			
3# 跨跨中截面 5	截面 5 最大正弯矩 $M_{max}$	3	中载	19 925	20 880	1.05
		4	偏载			
4# 主墩墩顶截面 7	截面 7 最大负弯矩 $M_{min}$	3	中载	-72 809	-73 624	1.01
		4	偏载			
5# 跨截面 9	截面 9 最大正弯矩 $M_{max}$	5	中载	20 880	21 683	1.04
		6	偏载			

应变采用东华 DH3815N 静态应变测试系统, 结合 BX120-100AA 型电阻应变片进行测试; 挠度采用 TCA1800 新型徕卡全站仪进行测量, 该仪器角度测量精度为  $1'$ , 距离测量精度为  $1\text{ mm} + 2\text{ ppm}$ 。动应变采用东华 DH3817 动态应变测试系统, 结合 BX120-100AA 型电阻应变片进行测试。振动信号采用 DLF-6 抗混滤波放大器及 INV306U 智能信号采集处理分析仪, 结合 941B 型拾振器进行测试。

2.3 静载试验方案

静载试验是通过试验荷载加载检验结构截面应力状态及整体的变形情况, 其试验荷载及加载工况的确定尤为重要。依据计算分析, 获得结构关键截面最不利内力情况下的荷载及加载位置。充分考虑各关键截面内力最不利工况作为试验工况的参考, 根据荷载效应等效原则设计试验荷载, 同时满足试验荷载效率系数在  $0.95 \sim 1.05$  范围内。该桥静载试验需 10 辆 36 t (车重 + 荷重) 双后轴汽车加载。试验车辆荷载如图 3 所示。为检验箱梁截面的整体

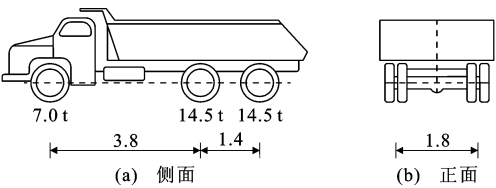


图 3 试验车辆荷载 (单位:m)

Fig. 3 Test Vehicle Load (Unit:m)

性及抗扭性能,考虑中载及偏载 2 种典型布载方式,如图 4 所示。

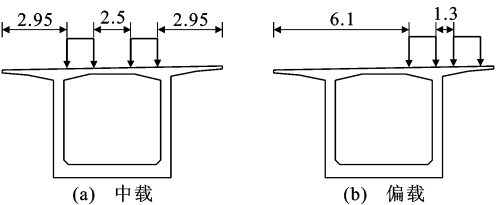


图 4 试验车辆横向布置 (单位:m)

Fig. 4 Lateral Arrangement of Test Vehicles (Unit:m)

2.4 动载试验方案

动载试验是通过测试桥跨结构在动荷载作用下的动态响应,分析桥梁结构在特定荷载作用下的冲击系数或动态增量,进一步评价桥梁结构的工作性能,其试验过程中需要区分无障碍行车及有障碍行车。障碍物设置于主跨跨中位置。

根据桥梁结构受力特点,选取中跨进行动载试验。试验时采用 1 辆汽车作为试验荷载,动载试验工况见表 3。

表 3 动载试验工况

Tab. 3 Dynamic Load Test Cases

试验类型	工况编号	车速/(km·h <sup>-1</sup> )
无障碍行车(跑车)试验	1-1	20
	1-2	30
	1-3	40
有障碍行车(跳车)试验	2-1	20
	2-2	30
	2-3	40

(1)动应变测试:测试截面混凝土表面布设长标距混凝土应变片(100 mm×3 mm,电阻为 120.1 Ω±0.1 Ω),采用东华 DH3817 动态应变测试与分析系统测取各工况下测点的动应变时程曲线。

(2)活载冲击系数计算:根据实测动应变时程曲线计算得出。

2.5 振动模态测试

结构的振动模态参数也称动力特性参数或自振特性参数,主要包括结构的自振频率、阻尼比和振型,它们都是由结构形式、材料性能等结构所固有的

特性所决定的,与外荷载无关。对于大跨度桥梁结构而言,模态测试也间接验证了计算模型的准确性,因此,振动模态测试十分重要。测定其自振特性参数通常采用脉动试验<sup>[4]</sup>。自振特性参数测试方法是测试环境随机荷载激振而引起的桥跨结构微幅振动响应,通过计算机记录并进行 FFT 信号处理,分析出频域响应结果。在测试过程中需封闭交通,以减少周期性振动信号对测试结果的影响。桥梁结构振动模态测试流程如图 5 所示。

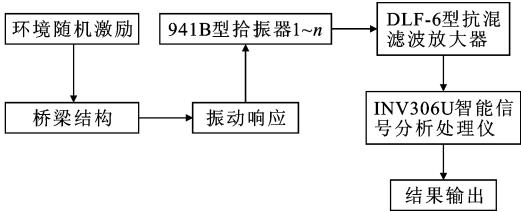


图 5 振动模态测试流程

Fig. 5 Flow of Vibration Modal Test

(1)振动信号测试:采用抗混滤波放大器、智能信号采集处理分析仪,结合 941B 型拾振器进行测试。

(2)结构振动模态参数分析:根据各测点实测振动信号,应用 Coinv DASP 软件系统进行分析。

2.6 有限元模型

桥梁结构采用桥梁通用有限元软件 MIDAS/Civil 进行计算分析。主梁与桥墩通过梁单元进行模拟,主梁与墩顶节点采用弹性连接中的刚性连接,过渡墩约束采用一般支承模拟。试验荷载采用集中荷载的方式施加,连续刚构桥桥面线形通过变截面梁单元截面偏移模拟,墩底为固接,约束 3 个平动自由度与 3 个转动自由度。主桥结构模型如图 6 所示。通过移动活载影响线分析选择试验方案,关注截面的最不利内力对应活载布置情况,为试验加载提供理论依据,并提取不同工况下结构应力变形情况用以对比实际测试结果,完善试验-理论分析方法。

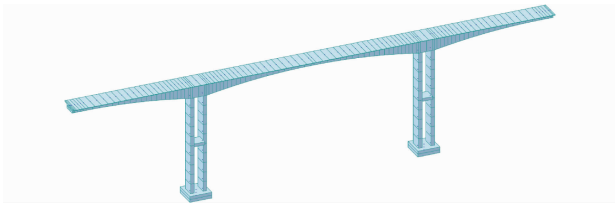


图 6 主桥结构模型

Fig. 6 Structural Model of Main Bridge

3 结果分析

3.1 应力测试结果

限于篇幅,选取边跨跨中截面、墩顶截面及主跨

跨中截面(对应截面 1,3,5)3 类典型截面在偏载及中载情况下的应力分布情况进行汇总。以实测应力为基础,对比理论计算结果,从相对残余应变对截面的静载效应进行分析。应力结果如图 7 所示,相对残余应变结果如图 8 所示。

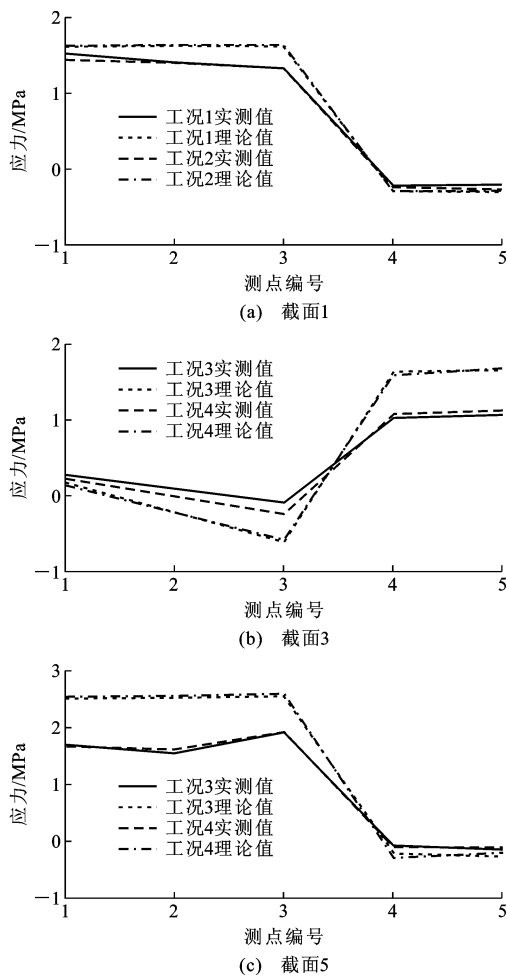


图 7 各截面应力分布

Fig. 7 Stress Distribution of Each Section

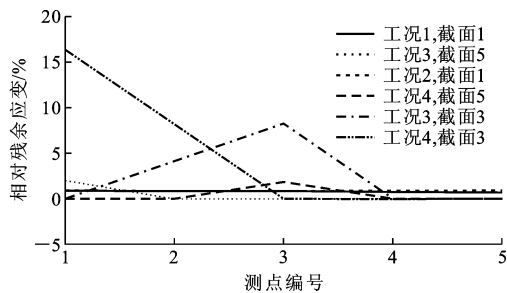


图 8 各截面相对残余应变

Fig. 8 Relative Residual Strain of Each Section

由图 7 可知,在中载与偏载试验工况下,截面各测点的实测应变值均小于理论计算值,进一步说明了结构由偏载作用产生的翘曲效应并不显著,截面的抗扭、抗翘曲性能较好,有利于结构的受力。由图

8 可知,工况 4 作用下截面 3 位置的测点 1 相对残余应变最大,其最大值为 16.4%,小于规范允许值(20%),而其余相对残余应变接近 0。

### 3.2 挠度测试结果

各截面的挠度实测结果与理论计算结果如图 9 所示。挠度校验系数及相对残余挠度计算结果见表 4。由于挠度测点沿横桥向布置 2 个或 3 个测点,挠度在横桥向有一点变化,本节给出的相关数据以各箱梁截面测点所得数据进行加权,没有考虑挠度沿横桥向的变异性。

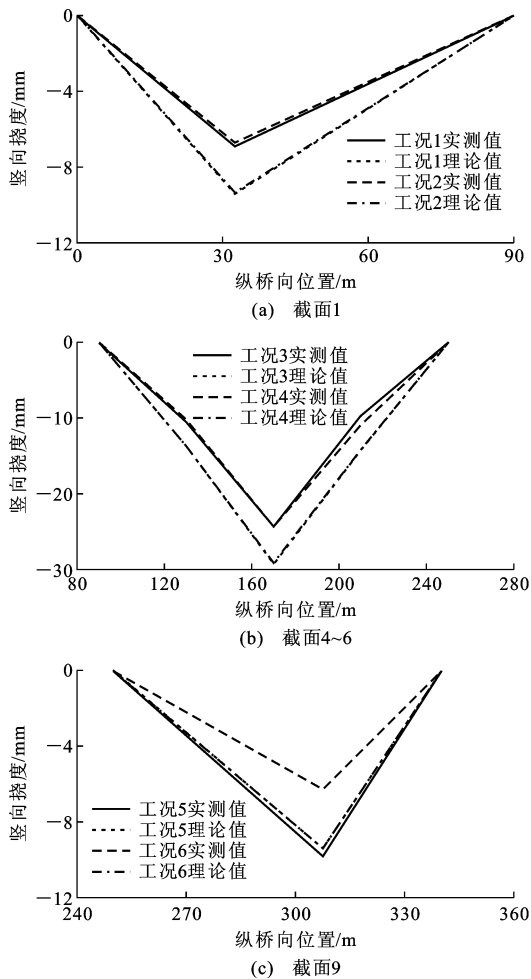


图 9 各截面挠度

Fig. 9 Deflection of Each Test Section

挠度校验系数在 0.63~0.90 之间,各截面均出现了残余变形,相对残余变形最大为 13.8%。在试验荷载作用下,箱梁最大挠度为-29.6 mm,相应的挠跨比为  $L/5\ 405$ ,远小于《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)规定的限值  $L/600$ 。

### 3.3 动力响应测试

在测试截面混凝土表面布设长标距混凝土应变

表 4 各截面挠度校验系数及相对残余变形  
Tab. 4 Deflection Check Coefficient and Relative Residual Deformation of Each Section

截面编号	工况编号	挠度校验系数 $\zeta$	相对残余变形 $S_p'/\%$
1	1	0.65	10.17
	2	0.69	3.30
4	3	0.72	5.05
	4	0.72	3.15
5	3	0.83	0.13
	4	0.76	7.47
6	3	0.63	7.85
	4	0.72	6.20
9	5	0.90	13.83
	6	0.65	3.27

片(100 mm×3 mm,电阻为 120.1 Ω±0.1 Ω),采用东华 DH3817 动态应变测试与分析系统测取各工况下测点的动应变时程曲线。主跨跨中截面 5 测点 5 的应变时程曲线如图 10,11 所示。

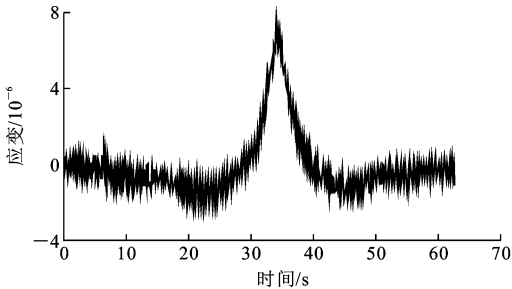


图 10 工况 1-1 典型动应变时程曲线  
Fig. 10 Typical Dynamic Strain Time History Curve Under Case 1-1

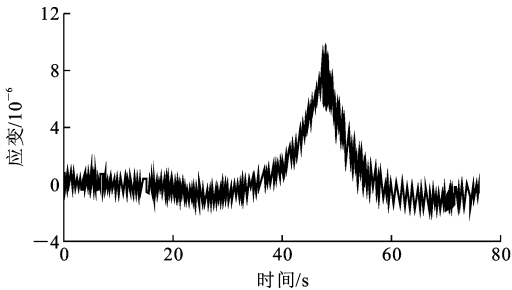


图 11 工况 2-1 典型动应变时程曲线  
Fig. 11 Typical Dynamic Strain Time History Curve Under Case 2-1

通过对各工况实测动应变数据进行分析,得出各试验工况下桥梁结构冲击系数  $\mu$ ,详见表 5。

桥梁结构在无障碍行车(匀速跑车)工况下冲击系数  $\mu$  在 0.05~0.08 之间;有障碍行车(跳车)工况下冲击系数  $\mu$  在 0.11~0.25 之间。匀速跑车工况下冲击系数与行车速度之间无明显相关性。桥梁结

表 5 各动载试验工况下的实测冲击系数  
Tab. 5 Measured Impact Coefficients Under Different Dynamic Load Test Cases

工况编号	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3
冲击系数	0.05	0.08	0.08	0.25	0.18	0.11

构在有障碍行车(跳车)工况下冲击系数比无障碍行车(匀速跑车)工况下冲击系数明显增大。这表明桥面铺装不平整或局部缺陷会给桥梁结构的工作状况带来不利的影响,保持桥面平整度对改善桥梁结构的受力行为极为重要。

3.4 自振特性

通过对各测点实测信号进行频谱、相位分析,得出该桥(左幅)主桥振动模态参数,详见表 6。

表 6 实测振动模态参数  
Tab. 6 Measured Vibration Modal Parameters

模态阶次	计算频率/ Hz	实测频率/ Hz	实测阻尼 比/%	振型
1	0.266	0.275	9.43	正对称横弯
2	0.597	0.488	3.54	反对称横弯
3	0.912	1.038	1.52	正对称竖弯
4	1.202	0.763	5.04	二阶正对称横弯
5	1.830	2.045	0.89	反对称竖弯

由表 6 可知:桥梁结构横向一阶振动频率为 0.275 Hz,对应阻尼比为 9.43%;竖向一阶振动频率为 1.038 Hz,对应阻尼比为 1.52%,该桥一阶竖弯自振频率实测值(1.038 Hz)大于理论计算值(0.912 Hz),表明桥梁结构的整体刚度正常。

从实测振动模态参数可知,该桥一阶振动以横向振动为主,与其桥墩较高、柔性较大的特点相吻合。该桥结构振动特性为低频、小阻尼振动,其值在同类桥梁结构中属正常范围,桥梁结构整体刚度正常。

4 结 语

(1)该桥试验荷载效率系数介于 0.99~1.05 之间,满足《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21—2011)中试验荷载效率系数 0.95~1.05 的规定。各测点挠度校验系数为 0.63~0.90,表明桥梁结构刚度具有一定的富余度,结构实际工作性能良好。各测点应变校验系数均未超出规范允许值,表明该结构强度具有一定的富余度。应变受偏载、中载影响较小,箱梁结构抗扭性能较好。

(2)选取的典型工况卸载后相对残余应变和变形最大值分别为 16.4%,13.83%,未超出规范限值(20%),说明该桥在试验荷载作用下处于弹性工作

状态。

(3)该桥自振测试结果显示,其一阶竖向频率为1.038 Hz,阻尼比为1.52%,匀速跑车试验下冲击系数为0.05~0.08,跳车试验下冲击系数为0.11~0.25,能够满足行车舒适性要求。

(4)综合分析可知,通过模拟设计荷载作用效应进行短期加载试验,该大桥(左幅)主桥上部箱梁测试截面的应力、挠度未出现异常;该桥梁结构动载试验参数、振动模态参数在正常范围。试验结果表明该桥梁结构处于正常受力状态,桥梁结构整体承载能力满足设计荷载(公路-I级)正常使用要求。

## 参考文献:

## References:

- [1] 蔡东升,刘荣桂,许飞,等.国内首座CFRP索斜拉桥荷载试验及有限元建模[J].江苏大学学报:自然科学版,2010,31(2):235-239.  
CAI Dong-sheng, LIU Rong-gui, XU Fei, et al. Load Experiments and Finite Element Modeling of CFRP Cable Stayed Bridge First in China[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2010, 31(2):235-239.
- [2] 柯红军,李传习,刘建.平胜大桥自锚式悬索桥静载试验与评价[J].公路交通科技,2009,26(2):53-59, 72.  
KE Hong-jun, LI Chuan-xi, LIU Jian. Static Loading Test and Assessment of Pingsheng Self-anchored Suspension Bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(2):53-59, 72.
- [3] 张劲泉,赵仲华,花迎春.虎门悬索桥交工验收静力荷载试验与评价[J].公路交通科技,2000,17(5):31-34.  
ZHANG Jin-quan, ZHAO Zhong-hua, HUA Ying-chun. Static Loading Test and Assessment for Completion Acceptance of Humen Suspension Bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2000, 17(5):31-34.
- [4] 李万恒,沈红军.西塘大桥主桥静、动荷载试验[J].公路交通科技,2004,21(9):60-63.  
LI Wan-heng, SHEN Hong-jun. Dynamic and Static Load Experiment of Xitang Bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(9):60-63.
- [5] 刁砚,钱永久,陈远久.刚架拱桥震后加固及荷载试

验对比分析[J].四川建筑科学研究,2011,37(1):133-136.

DIAO Yan, QIAN Yong-jiu, CHEN Yuan-jiu. Post-earthquake Reinforcement and Load Test Comparison of Rigid Frame Arch Bridge[J]. Sichuan Building Science, 2011, 37(1):133-136.

- [6] 黄少新,赵文秀.连续刚构桥梁荷载试验分析[J].桥梁建设,2006,36(增1):137-139.

HUANG Shao-xin, ZHAO Wen-xiu. Analysis of Load Tests for a Continuous Rigid-frame Bridge[J]. Bridge Construction, 2006, 36(S1):137-139.

- [7] 李克银.连续梁桥荷载试验梁格法分析[J].铁道工程学报,2011(6):25-28.

LI Ke-yin. Analysis of Load Tests for Continuous Girder Bridge with Grillage Theory[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011(6):25-28.

- [8] 朱坤宁,万水.GFRP-钢组合梁桥的荷载试验[J].公路交通科技,2011,28(11):48-54.

ZHU Kun-ning, WAN Shui. Experiment of Load Test of GFRP-steel Composite Girder Bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(11):48-54.

- [9] 邓苗毅,任伟新.基于静力荷载试验的连续箱梁桥结构有限元模型修正[J].福州大学学报:自然科学版,2009,37(2):261-266.

DENG Miao-yi, REN Wei-xin. Continuous Box-girder Bridge Structure Finite Element Model Updating Based on Static-load Testing[J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2009, 37(2):261-266.

- [10] 杨高中,李扬海,孙国柱,等.广东洛溪大桥主桥设计[J].土木工程学报,1990,23(1):65-76.

YANG Gao-zhong, LI Yang-hai, SUN Guo-zhu, et al. Design of the Main Bridge of Luoxi Bridge in Guangdong Province[J]. China Civil Engineering Journal, 1990, 23(1):65-76.

- [11] 谌润水,胡剑芳.公路桥梁荷载试验[M].北京:人民交通出版社,2003.

CHEN Run-shui, HU Zhao-fang. Loading Test of Highway Bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2003.

- [12] 宋一凡.公路桥梁荷载试验与结构评定[M].北京:人民交通出版社,2002.

SONG Yi-fan. Load Tests and Structural Evaluation of Highway Bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2002.