

高墩大跨连续刚构桥静动载试验

贾毅¹,赵人达¹,李友河²,王永宝³

(1. 西南交通大学土木工程学院桥梁工程系,四川 成都 610031;2. 云南省公路科学技术研究院,云南 昆明 650000;3. 太原理工大学建筑与土木工程学院,山西 太原 030024)

摘要 目的 评价高墩大跨连续刚构桥在试验荷载作用下的承载能力与工作性能,为此类桥型的设计施工和运营养护提供参考. 方法 以云南省沾益至会泽高速公路牛栏江大桥为工程背景,荷载试验包括静载试验、动载试验,分别测试静载工况下各控制截面的应力状态和整体挠度,动载工况下桥梁的动态响应和振动模态参数. 结果 截面各测点的实测应力值、挠度值均小于理论计算值,桥梁的实际状况要好于理论情况. 部分截面均出现了残余变形,相对残余变形小于20%. 桥梁在无障碍行车工况下冲击系数在0.10~0.14;有障碍行车工况下冲击系数在0.20~0.29,说明桥面不平整时冲击效应较为明显. 竖向一阶振动频率大于横向一阶振动频率,说明该桥竖向刚度强于横向刚度;同时该桥自振频率试验值均大于计算值. 结论 桥梁结构的整体刚度满足《公路桥梁荷载试验规程》(JTG/T J21-01-2015)的规定. 桥梁结构承载力及变形满足公路一级设计荷载正常使用要求.

关键词 连续刚构桥;荷载试验;效率系数;校验系数

中图分类号 TU997;U446.1

文献标志码 A

Static and Dynamic Load Tests for High-Pier Long Span Continuous Rigid Frame Bridge

JIA Yi¹, ZHAO Renda¹, LI Youhe², WANG Yongbao³

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, China, 610031; 2. Yunnan Research Institute of Highway Science and Technology, Kunming, China, 650000; 3. College of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, China, 030024)

Abstract: The bearing capacity and working performance of the long-span continuous rigid frame bridge with high pier under test load were evaluated to provide reference for the design, construction, operation and maintenance. Taking Niulanjiang Bridge on Zhanyi-Huize Expressway in Yunnan Province as the engineering background, static load test and dynamic load test were carried out. The stress state and overall deflection of each control section were tested under static load condition, and the dynamic response and vibration mode parameters of the bridge under dynamic load

收稿日期:2017-11-26

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB1200401);国家自然科学基金项目(51308471)

作者简介:贾毅(1988—),男,博士研究生,主要从事大跨度桥梁抗震、现代桥式及桥梁结构等方面研究.

condition. The results show that the measured stress value and deflection value of each section are smaller than the theoretical calculation value, and the actual situation of the bridge is better than the theoretical situation. The residual deformation occurs in some sections, and the relative residual deformation is less than 20%. The impact coefficient μ of the bridge under the barrier-free driving condition is 0.10 ~ 0.14; the impact coefficient μ under the barrier driving condition is 0.20 ~ 0.29, which shows that the impact effect is obvious when the deck is not smooth. The first-order vertical vibration frequency is greater than the first-order horizontal vibration frequency, which indicates that the vertical rigidity of the bridge is stronger than the lateral rigidity. At the same time, the measured frequency is greater than the calculated frequency, indicating that the overall stiffness of the bridge structure meets the design requirements of load testing specifications for highway bridges(《load test methods for highway bridge》JTG/T J21-01—2015). The overall bearing capacity and rigidity of the bridge structure meet the normal requirements of the design load.

Key words: continuous rigid frame bridge; loading tests; efficiency coefficient; calibration coefficient

随着我国桥梁数量的迅猛增长,一些大跨径悬索桥、斜拉桥、拱桥、连续刚构桥受到使用荷载、环境以及结构本身缺陷等因素的影响,部分桥梁开始出现结构使用性能衰退、安全和耐久性降低等问题.因此需要使用先进、适用、有效的方法对桥梁结构开展合理的试验检测从而进行诊断判定.荷载试验就是对桥梁结构进行加载试验,得出桥梁结构在试验荷载作用下的应力、挠度、自振特性等数据,进而评定桥梁结构的状况^[1].荷载试验是检验桥梁性能及工作状态最直接有效的方法^[2],并应用于各类形式的桥梁(斜拉桥、悬索桥、拱桥和梁桥)的荷载试验研究^[3-7].近年来,随着西南地区交通的发展,高墩大跨度连续刚构桥得到了广泛的应用,由于其独特的结构形式,高墩大跨连续刚构桥与常规简支梁桥荷载试验有所不同^[8-16].笔者以云南省沾益至会泽高速公路牛栏江大桥主桥为工程背景,通过对该桥进行荷载试验,包括静载试验和动载试验,得出该桥的强度、刚度、动力特性等方面数据,评价该桥在试验荷载作用下的状况.

1 工程概况及有限元模型

1.1 工程概况

笔者以沾益至会泽高速公路牛栏江特大

桥为工程背景.该桥为预应力混凝土连续刚构桥,跨径布置为(85+160+85)m,分左、右两幅,桥面宽度均为12.25 m.主桥横断面为单箱单室直腹板箱梁,箱梁顶板宽为12.25 m,底板宽为7.05 m,梁高为3.3~10 m.沾益侧桥墩高102.6 m,会泽侧桥墩高99 m.桥梁总体布置如图1所示.

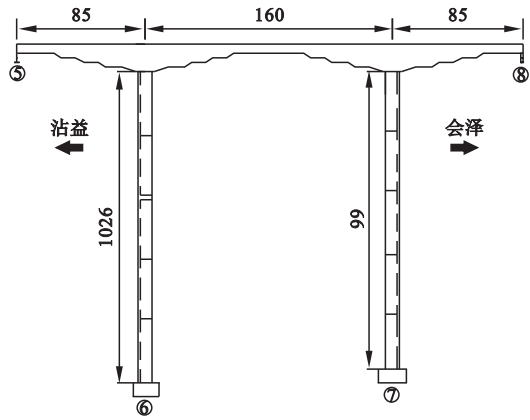


图1 主桥立面图

Fig.1 Elevation of the bridge

1.2 有限元模型

采用大型有限元软件 Midas Civil 建立有限元模型,主桥结构模型如图2所示.试验荷载采用集中荷载的方式施加,通过移动活载影响线分析后,提取桥梁关键截面所受最不利内力时所对应的荷载布置情况,为试验加载提供理论依据^[11].根据交通部颁布的《公路桥梁荷

载试验规程》(JTG/T J21 - 01—2015)、《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21—2011)、《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21—2011) 检验各项指标。

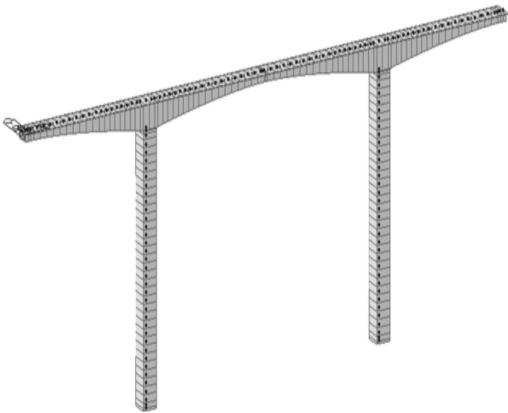


图2 主桥有限元模型图

Fig. 2 Finite element model of the bridge

2 静载试验

2.1 静载试验内容与方法

为评价牛栏江特大桥主桥上部结构在设

计荷载作用下的承载能力和使用状况,对桥梁进行静载试验^[17]. 根据软件计算分析结果在对应截面的最不利内力位置布载,并且试验荷载效率 η_q 需要满足《公路桥梁荷载试验规程》(JTG/T J21 - 01—2015) 中“ $0.95 \leq \eta_q \leq 1.05$ ”的要求,具体工况如图 3、表 1 所示. 试验车辆采用载重汽车,根据计算结果,静载试验需要 10 辆双后轴汽车加载,每辆车重加上荷重共 36t,试验车辆如图 4 所示. 同时考虑中载和偏载作用下的结构受力状况(见图 5),现场试验如图 6 所示.

根据牛栏江特大桥主桥箱梁结构特点,应变、挠度测点分别设 9 个控制截面,计 37 个应变测点,17 个挠度测点. 测点布置如图 3 所示. 在箱梁控制截面混凝土表面布设长标距混凝土应变片,采用 DH3819N 静态应变测试系统得出各工况下相应测点的应变值. 在箱梁控制截面下缘安装棱镜,采用 TCA1800 全站仪进行观测,得出各测点的挠度.

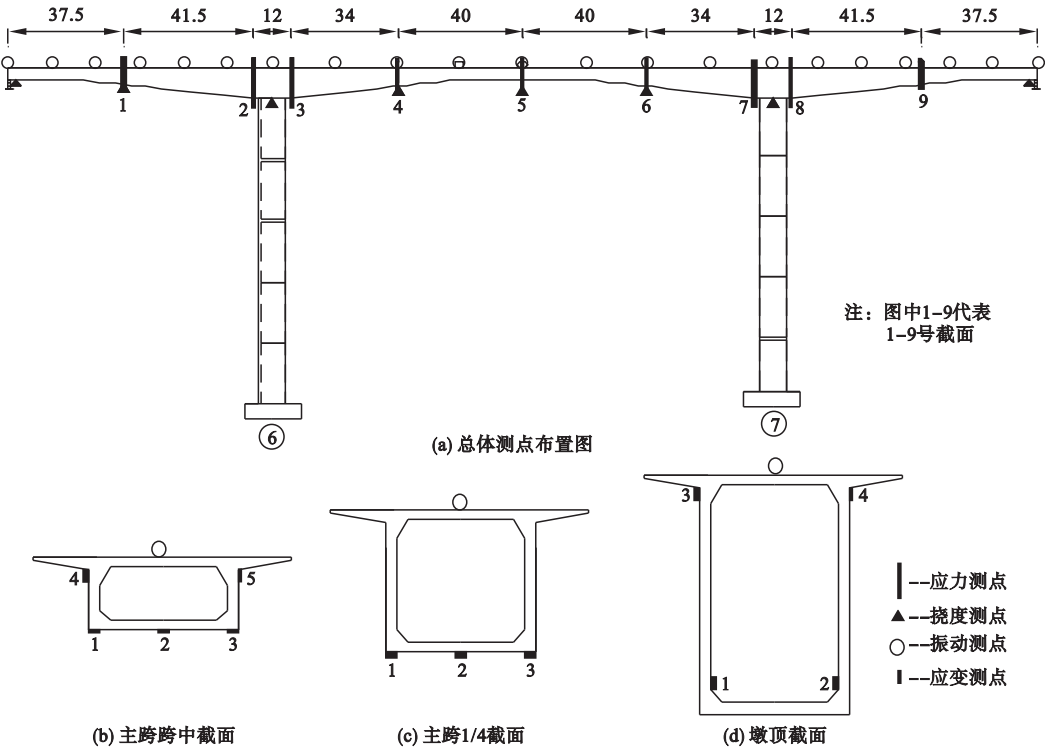


图3 测点布置图

Fig. 3 Measuring points layout

表 1 静载试验项目及荷载效率

Table 1 Items of static load test and load efficiency

试验项目	测试位置	试验荷载效率
左边跨最大正弯矩	1 号截面	1.04
6#墩墩顶最大负弯矩	2 号截面	0.97
	3 号截面	0.95
中跨跨中最大正弯矩	5 号截面	1.05
7#墩墩顶最大负弯矩	7 号截面	0.96
	8 号截面	0.97
右边跨最大正弯矩	9 号截面	1.01

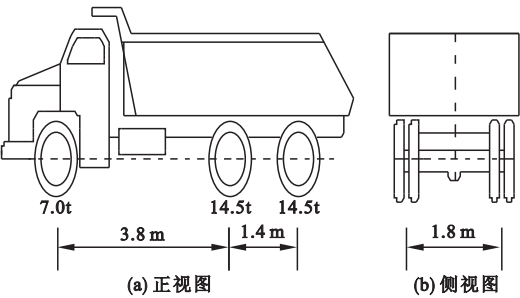


图 4 试验车辆
Fig. 4 The vehicle for test

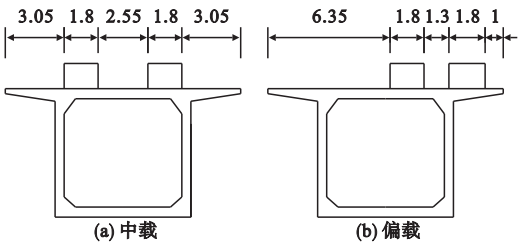


图 5 试验车辆横向布置

Fig. 5 Lateral layout of test vehicles



图 6 现场试验
Fig. 6 Field test

2.2 静载试验评定标准

(1)结构校验系数. 结构校验系数 ζ 是用来对比实际状况和理论状况,当结构校验系数 $\zeta < 1$ 时,代表结构实际状况优于理论状况. ζ 计算式为

$$\zeta = \frac{S_e}{S_s} \tag{1}$$

式中: S_e 为实测的弹性应变或位移; S_s 为理论计算的应变或位移.

(2)相对残余应变. 相对残余应变 ΔS 越小,说明结构越处于弹性工作中,规范要求 $\Delta S \leq 20\%$. ΔS 计算为

$$\Delta S = \frac{S_p}{S_t} \times 100\% \tag{2}$$

式中: S_p 为实测的残余应变或位移; S_t 为理论计算得出的应变或位移.

2.3 应力测试结果

静载试验的结构校验系数和相对残余应变如表 2、表 3 所示. 根据桥梁结构的对称性,选取左边跨跨中截面、左墩顶左右两个截面、中跨 1/4 截面和中跨跨中截面,对应 1 号至 5 号截面,分别得出中载及偏载下的实测应力和理论应力(见图 7). 由图 7 可知,同一截面水平位置各测点的应力值相差不大,说明结构抗扭性能较好. 由表 2 可知,相对残余

表 2 相对残余应变

Table 2 Relative residual deformation

截面号	荷载位置	相对残余应变/%				
		测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5
1	中载	0.00	0.00	5.56	0.00	0.00
	偏载	0.00	4.76	0.00	0.00	0.00
2	中载	0.00	0.00	0.00	0.00	—
	偏载	0.00	0.00	0.00	0.00	—
3	中载	0.00	0.00	0.00	0.00	—
	偏载	0.00	0.00	0.00	0.00	—
4	中载	-5.26	0.00	0.00	—	—
	偏载	-4.00	0.00	0.00	—	—
5	中载	0.00	2.33	2.17	0.00	-7.69
	偏载	0.00	4.35	4.44	0.00	-8.33

表3 结构校验系数

Table 3 Check coefficient of structure		结构校验系数				
截面号	荷载位置	测点1	测点2	测点3	测点4	测点5
1	中载	0.89	0.8	0.72	0.57	0.64
	偏载	0.87	0.84	0.91	0.4	0.38
2	中载	0.68	0.68	0.67	0.77	—
	偏载	0.77	0.28	0.77	0.87	—
3	中载	0.4	0.26	0.84	0.89	—
	偏载	0.33	0.26	0.79	0.79	—
4	中载	0.64	0.58	0.58	—	—
	偏载	0.82	0.78	0.63	—	—
5	中载	0.91	0.85	0.91	0.58	0.48
	偏载	0.91	0.89	0.88	0.55	0.43

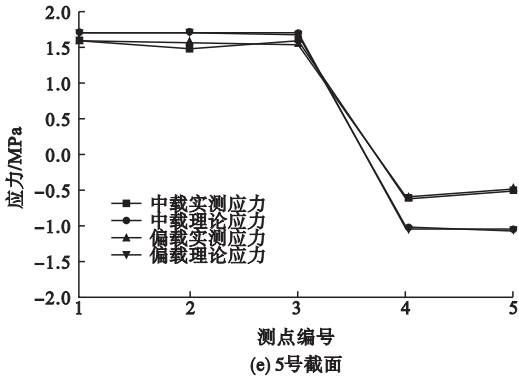
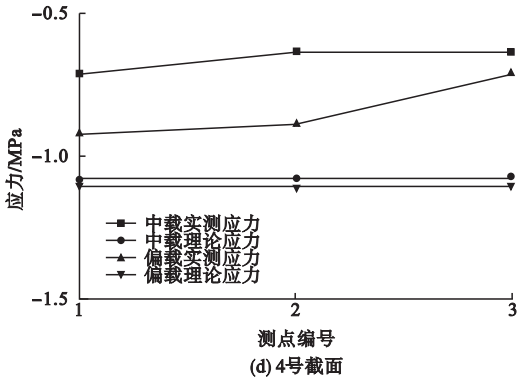
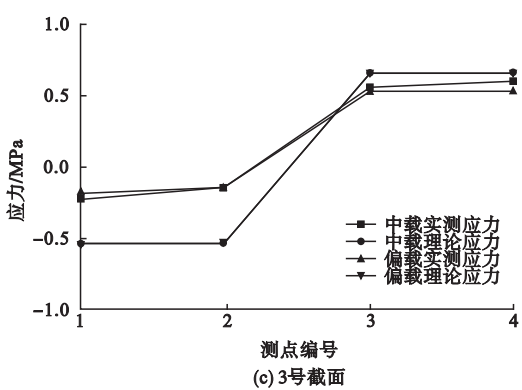
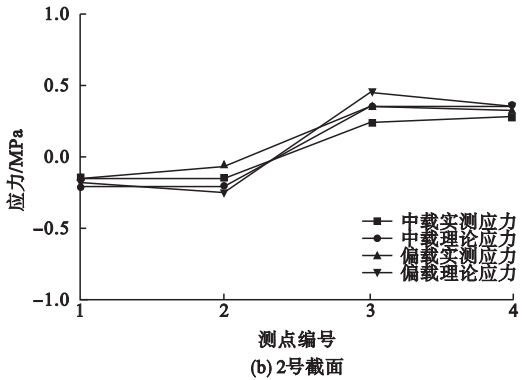
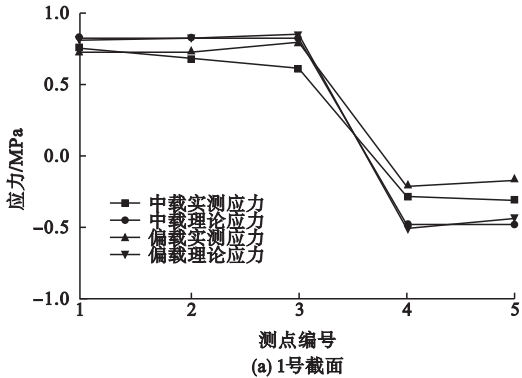


图7 关键截面应力分布结果

Fig. 7 Stress distribution of typical section
应变最大为 8.33%,位于偏载作用下截面 5 位置的测点 5,小于规范允许值 20%. 由表 3 可知,各关键截面各测点在中载与偏载下的实测应力值均小于理论值,箱梁测试截面实测应力校验系数为 0.26~0.91,说明桥梁的实际情况要好于理论情况.

2.4 挠度测试结果

箱梁挠度测试在控制截面底部布设 3 个测点,分别位于左侧、中间和右侧,对应 1 号至 3 号测点. 各截面竖向挠度实测值与理论值如图 8 所示. 不同工况下各截面挠度校验系数及相对残余变形如表 4 所示. 由图 8 可知,各工况下挠度的实测值均小于理论值,实测箱梁最大挠度为 -18.7 mm,满足规范要求. 中载情况下,挠度沿桥梁横向相差不大;偏载情况下,由于在桥面右侧布载,因此 3 号测点挠度较大. 由表 4 可知,挠度校验系数为 0.59~0.85,部分截面均出现了残余变形,相对残余变形最大为 4.17%,小于 20%,说明结构刚度性能良好.

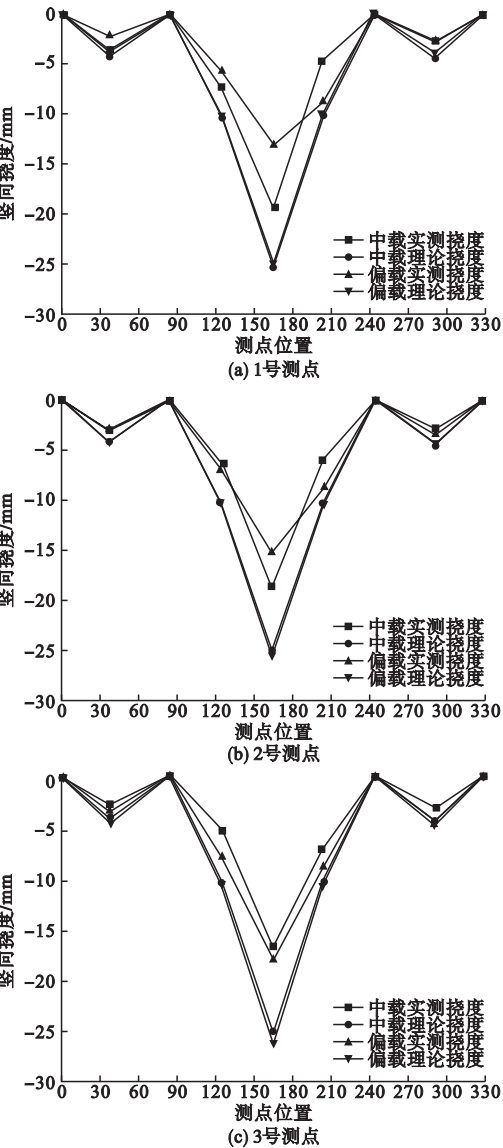


图8 各工况挠度结果

Fig. 8 Deflection results of each working condition

表4 各工况校验系数及相对残余变形
Table 4 Check coefficient and relative residual deformation of each working condition

截面号	荷载位置	校验系数	相对残余变形/%
1	中载	0.75	0.00
	偏载	0.70	0.00
4	中载	0.60	3.38
	偏载	0.64	2.50
5	中载	0.74	0.34
	偏载	0.59	0.37
6	中载	0.59	0.00
	偏载	0.85	0.00
9	中载	0.69	0.00
	偏载	0.76	4.17

3 动载试验

3.1 动载试验内容与方法

动载试验是通过测试桥梁结构在动荷载作用下的响应,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^[18]. 根据桥梁结构特点,选取中跨进行动载试验. 动载试验主要包括行车激振试验和自振特性测试. 其中行车激振试验分为有障碍行车试验和无障碍行车试验^[19];自振特性测试是测试结构的自振频率、阻尼比和振型. 行车激振试验在中跨 L/2 截面布设测点,情况同静载试验一致. 采用 DH3817 动态应变测试系统,结合 BX120 - 100AA 型电阻应变片,测取各工况下测点的动应变时程曲线,计算得出活载冲击系数. 动载试验工况如表 5 所示.

表5 动载试验工况

Table 5 Cases of dynamic test

工况编号	试验类型	车速/(km·h ⁻¹)
I	无障碍行车(跑车)试验	20
II	无障碍行车(跑车)试验	30
III	无障碍行车(跑车)试验	40
IV	有障碍行车(跳车)试验	20
V	有障碍行车(跳车)试验	30
VI	有障碍行车(跳车)试验	40

对于大跨度桥梁结构,测定其自振特性参数通常采用脉动法^[20]. 脉动指的是微小且不规则的振动,引起的脉动的因素包括车辆,风荷载,地震等,脉动法就是通过这种微小振动来确定桥梁结构的动力特性^[21]. 通过多个拾振器、微振采集分析仪和 DASP 采集分析系统得到结构的自振特性^[17]. 桥梁结构自振特性测试流程如图 9 所示.

在有限元分析的基础上,根据桥梁的结构特点,在纵桥向设定了 18 个测试截面,分别是边跨 1/6 处和中跨 1/8 处的位置,沿箱梁表面中心布置如图 3 所示. 振动信号采用微振采集分析仪,结合 941B 型拾振器进行测试.

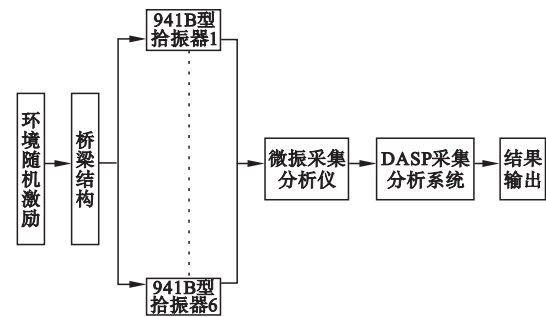


图 9 自振特性测试流程

Fig. 9 Flow chart of natural vibration characteristics test

3.2 动载试验评定标准

(1)活载冲击系数. 活载冲击系数 μ 综合反映荷载对桥梁的动力作用,采用动应变或动挠度时程曲线计算.

$$\mu = \frac{y_{d \max}}{y_{j \max}} - 1 = \frac{y_{d \max}}{\frac{y_{d \max} + y_{d \min}}{2}} - 1. \quad (3)$$

式中: $y_{d \max}$ 为最大动应变(或动挠度)幅值; $y_{j \max}$ 为波形振幅中心轨迹的顶点值; $y_{d \min}$ 为与 $y_{d \max}$ 对应的波谷值.

(2)自振频率. 桥梁结构自振频率一般根据脉动试验测记的测点随机振动信号经频谱分析而得.

(3)阻尼比. 桥梁结构阻尼比采用半功率带宽法计算根据频谱分析得出的测点自功率谱图.

$$D_r = \frac{B_i}{2f_i}. \quad (4)$$

式中: B_i 为第 i 阶自振频率对应的半功率点带宽,即 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 倍功率谱峰值所对应的频率差;

f_i 为第 i 阶自振频率.

(4)振型. 通过相位函数对振动信号进行相位分析,根据自功率谱的峰值和互功率谱的相位,得到振型曲线^[1].

3.3 动力响应测试结果

选取中跨进行动载试验,测取得到动应变时程曲线,进而计算各工况下桥梁结构的冲击系数(见表 6).

表 6 动载试验各工况实测冲击系数

Table 6 Impact coefficient of actual measurement in each working condition

工况编号	冲击系数
I	0.14
II	0.10
III	0.12
IV	0.29
V	0.20
VI	0.26

由表 5、表 6 可知,桥梁结构在无障碍行车工况下冲击系数为 0.10~0.14,最大值出现在 20 km/h 时,其值为 0.14,冲击系数数值相对较小,说明当桥面平整度好的时候,车辆对桥梁的冲击效应较小;有障碍行车工况下冲击系数为 0.20~0.29,最大值出现在 20 km/h 时,其值为 0.29,冲击系数数值相对较大,说明桥面不平整时冲击效应较为明显. 因此在施工和运营时应注意桥面的平整度. 典型动应变时程曲线如图 10 所示.

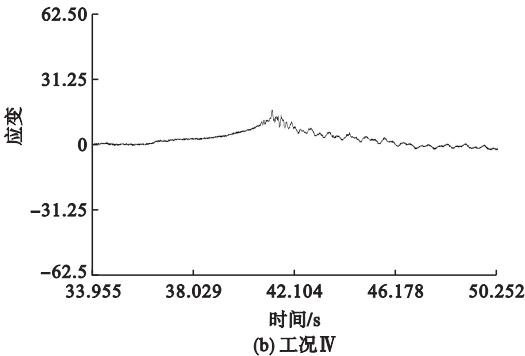
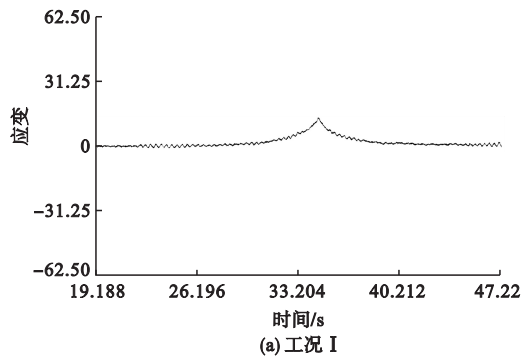


图 10 典型动应变时程曲线

Fig. 10 Typical dynamic strain time history curve

3.4 自振特性

通过对各测点实测信号进行频谱、相位分析,得出牛栏江特大桥主桥振动模态参数(见表7).主桥各阶振型如图11所示.

表7 实测自振特性

Table 7 Measured natural vibration characteristics					
振型 方向	模态 阶次	理论频 率/Hz	实测频 率/Hz	实测阻 尼比/%	振型
横向振动	一阶	0.312	0.336	5.464	对称横弯
	一阶	1.066	1.282	1.379	对称竖弯
竖向振动	二阶	1.811	2.228	—	反对称竖弯
	三阶	2.119	2.716	0.823	对称竖弯

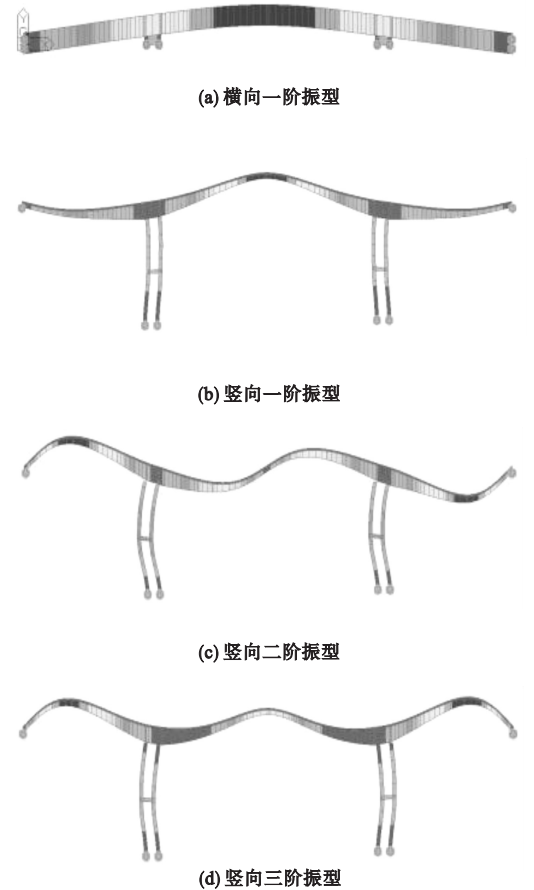


图11 主桥振型图

由表7、图11可知,桥梁结构横向一阶自振频率为0.336 Hz,竖向一阶自振频率为1.282 Hz,较晚出现,说明桥梁竖向刚度要强于横向刚度,与大跨高墩刚构桥的结构体系

相吻合.桥梁结构未出现扭转变形,说明箱形梁截面合理,扭转刚度较好.

4 结 论

(1)该桥截面各测点的实测应力值、挠度值均小于理论计算值,各工况应力校验系数在0.28~0.91,各工况挠度校验系数为0.59~0.85,表明桥梁的实际状况要好于理论情况.

(2)该桥在部分位置部分工况下出现残余应变和残余变形,最大残余应变和残余变形分别为8.33%、4.17%,满足规范小于20%的要求.

(3)桥梁结构在无障碍行车工况下冲击系数为0.10~0.14,有障碍行车工况下冲击系数为0.20~0.29,说明桥面不平整时冲击效应较为明显.

(4)竖向一阶振动频率较晚出现,说明桥梁竖向刚度要强于横向刚度,该桥自振频率试验值均大于计算值.

参考文献

[1] 谌润水,胡钊芳.公路桥梁荷载试验[M].北京:人民交通出版社,2003.
(CHEN Runshui, HU Zhaofang. Loading test of bridges on high-way [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.)

[2] 周海俊,吴永昌,谭也平,等.桥梁荷载试验研究综述[J].中外公路,2008(4):164-166.
(ZHOU Haijun, WU Yongchang, TAN Yeping, et al. Summarization of bridge load test[J]. Journal of China & foreign highway, 2008(4):164-166.)

[3] 宋一凡.桥梁荷载试验与结构评定[M].北京:人民交通出版社,2002.
(SONG Yifan. Bridge load tests and structural evaluation [M]. Beijing: China Communications Press, 2002.)

[4] GOU Y, LIANG S, HE F, et al. Research on loading test of double-curved arch bridge[J]. Civil engineering & technology, 2013, 2(3): 54-60.

[5] TANAKA Y, SHIMOMURA T, YAMAGU-

- CHI T. Loading test of rc beam bridge built 80 years ago in japanese coastal area [J]. Rilem bookseries, 2011, 5(2): 159 – 177.
- [6] ZENG Y. Bridge structure performance evaluation based on dynamic load test [J]. Applied mechanics and materials, 2012, 238: 694 – 696.
- [7] MA J B, PU Q H, XIA Z G. Dynamic loading test and vehicle-bridge coupling vibration analysis of railway nielsen system X-style arch bridge [J]. Journal of vibration & shock, 2008, 27(7): 174 – 177.
- [8] 马保林. 高墩大跨连续刚构桥 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
(MA Baolin. High-pier long span continuous rigid frame bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.)
- [9] WU B, LU H, CHEN B. Study on finite element model updating in highway bridge static loading test using spatially-distributed optical fiber sensors [J]. Sensors, 2017, 17(7): 1657 – 1661.
- [10] WANG A Y, CHEN X W, ZHANG Q. Application of deflection measurement methods to bridge loading test [J]. Engineering & test, 2012, 52(1): 31 – 34.
- [11] XIAO M K, WANG X W, LIU G. Static load test and calculation on multi-tower cable-stayed bridge with tie-down Cables [J]. Journal of civil architectural & environmental engineering, 2011, 33(1): 43 – 49.
- [12] WANG J, HUI L, WU S. Study on the loading test of the reinforced concrete bridge lack of technical data [C]. International Conference on Remote Sensing. IEEE, 2011.
- [13] 史大利. 高墩大跨 PC 连续刚构桥动力分析与荷载试验研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
(SHI Dali. Dynamic analysis and load test study of high-pier and long-span pc continuous rigid frame bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.)
- [14] 江南. 大跨高墩曲线连续刚构桥的变形分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2004.
(JIANG Nan. Deformation analysis of continuous curved rigid frame bridge with long-span and high-pier [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004.)
- [15] 张军辉. 大跨径连续刚构梁桥荷载试验评定与研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
(ZHANG Junhui. Assessment and study on load test of long span continuous rigid-frame bridge [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.)
- [16] 鲁洁. 高墩大跨径预应力混凝土连续刚构桥梁荷载试验评定技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2006.
(LU Jie. Study on load test and evaluation of high-pier long span prestressed concrete continuous rigid frame bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.)
- [17] 唐利科, 贾毅, 纪云涛, 等. 高墩大跨连续刚构桥的荷载试验 [J]. 铁道建筑, 2017(7): 43 – 46.
(TANG Like, JIA Yi, JI Yuntao, et al. Load test for large-span continuous rigid frame bridge with high piers [J]. Railway engineering, 2017(7): 43 – 46.)
- [18] 贾毅, 白伦华, 纪云涛, 等. 大跨连续刚构桥荷载试验研究 [J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(4): 105 – 111.
(JIA Yi, BAI Lunhua, JI Yuntao, et al. Study of load tests for long-span continuous rigid frame bridge [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2017, 34(4): 105 – 111.)
- [19] 李晓斌, 夏招广, 蒲黔辉. 安庆长江公路大桥静动载试验研究 [J]. 公路交通科技, 2007, 24(2): 73 – 76.
(LI Xiaobin, XIA Zhaoguang, PU Qianhui. Analysis of static and dynamical test of anqing changjiang river highway bridge [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2007, 24(2): 73 – 76.)
- [20] 贺顺荣. 大跨度斜拉桥荷载试验研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
(HE Shunrong. Load test research of cable-stayed bridge with long span [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.)
- [21] 贾毅, 王永宝, 廖平. 金渔大桥成桥荷载试验研究 [J]. 铁道建筑, 2016(6): 33 – 35.
(JIA Yi, WANG Yongbao, LIAO Ping. Research on completed jinyu bridge load test [J]. Railway engineering, 2016(6): 33 – 35.)
(责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)