

某宽幅简支梁桥荷载试验研究

贾毅¹, 霍龙飞¹, 李福海^{1,2}, 廖平¹, 赵人达¹

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 陆地交通地质灾害防治技术
国家工程实验室, 四川 成都 610031)

摘要 目的 为全面了解某宽幅预应力混凝土简支空心板梁桥在荷载作用下的实际承载力, 分析其实际工作状态, 评定桥梁运营状况. 方法 基于静载试验, 研究在偏载和中载等不利荷载工况下的主梁的应力和变形, 通过动载试验的各项内容研究该桥的自振频率、不同行车速度下的变形响应以及跳车试验下的冲击作用, 最后将实测结果与理论分析结果进行对比分析. 结果 桥梁在设计荷载下处于弹性工作阶段. 卸载后归零情况正常, 残余应变为 5% ~ 11%, 没有裂缝产生. 动力测试结果显示, 其第一阶竖向自振频率为 5.47 Hz、阻尼比为 0.025、冲击系数为 1.122 ~ 1.190, 测试模态与理论模态吻合较好. 结论 该桥受力处于弹性工作状态, 承载能力满足相关规范要求, 可以按设计荷载投入使用.

关键词 荷载试验; 简支板梁桥; 静载试验; 承载能力; 校验系数; 效率系数

中图分类号 TU395 文献标志码 A

Load Test Study of a Wide-Simple Supported Beam Bridge

JIA Yi¹, HUO Longfei¹, LI Fuhai^{1,2}, LIAO Ping¹, ZHAO Renda¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, China, 610031; 2. National Engineering Laboratory for Technology of Geological Disaster Prevention in land Transportation, Chengdu, China, 610031)

Abstract: In order to fully understand the actual bearing capacity, analyze its actual working state and evaluate and the operation status of the bridge of a wide width prestressed concrete simply supported hollow slab bridge under load, a loading test is done. Based on the static load test, the stress and deformation of the main beam under the load and medium load are studied; through the contents of the dynamic load test, the natural frequencies of the bridge, the deformation of the different speed and the impact of the jump test are studied. Finally, the measured results and theoretical analysis results are compared and analyzed. The displacement test results show that the bridge is under the elastic working stage in the design load. After unloading, the zeroing condition is normal, the residual strain is 5% ~ 11%, and no cracks occur. The dynamic test results show that the first verti-

收稿日期: 2017-02-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308471)

作者简介: 贾毅(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事大跨桥梁抗震、桥梁检测与加固研究.

cal natural vibration frequency is 5.47Hz, the damping ratio is 0.025, and the impact coefficient is 1.122 ~ 1.190. The testing model agrees well with the theoretical mode. The results show that the bridge is in the elastic working state, carrying capacity to meet the requirements of the relevant specifications, can be put into use according to the design load.

Key words: loading tests; simply supported plate girder bridge; static loading test; bearing capacity; calibration coefficient; efficiency coefficient

近20年来,随着我国交通事业的快速发展,兴建了大量形式各异的桥梁^[1].然而,这些桥梁在成桥过程和后期的运营过程中容易在外界不同因素综合作用下出现不同程度的质量问题,如承载力、刚度以及耐久性等指标的下降,进而缩短了桥梁的使用寿命,甚至会发生垮塌,严重影响交通的正常运营和人民生命财产的安全.因此,对桥梁结构的工作状态的评估显得十分重要.

荷载试验是对桥梁承载能力检测的主要技术手段.桥梁荷载试验是了解桥梁性能参数、分析其实际工作状态、评定桥梁运营状况最有效、最直接的一种手段^[2].桥梁荷载试验分为静载试验和动载试验,静载试验是通过测试桥梁结构在试验荷载作用下控制截面的应变、位移或裂缝,分析判定桥梁的承载能力;动载试验是通过测试桥梁在动载作用下的响应,分析桥梁的频率、阻尼和振型等模态参数,根据动力响应和模态参数进行桥梁承载能力评定^[3-4].

湛润水等^[5]介绍了桥梁荷载试验的一般程序和基本原则,并指出试验应注意的事项.聂建国等^[6]通过荷载试验,验证组合箱梁桥杆系模型的准确性和适用性,并将杆系模型应用于实际钢-混凝土组合箱.于玲等^[7]以斜拉桥混凝土箱梁的最大负弯矩工况的分级加载为例,采用基于函数 $\cos(x^2)$ 变换的灰色模型对该工况的箱梁内力进行预测,并验证该模型预测桥梁加载时的内力值的方法是可行的.肖勇刚等^[8]通过荷载试验,探讨了试验加载位置和行车速度对某预应力空心板桥荷载试验结果的影响.目前国内内外针对荷载分布不对称的简支宽幅梁桥的

荷载试验研究较少^[9-12],但由于此类桥梁数量较多,因此开展荷载不规则分布的简支宽幅梁桥的荷载试验的相关工作具有很大的工程应用价值.笔者结合某地一座预应力混凝土简支空心板桥,详细介绍了桥梁荷载试验的内容以及既有桥梁承载力评定方法,其研究成果可为桥梁荷载试验相关规范的编制提供一定的数据储备和理论依据.

1 工程概况

该桥为一座预应力混凝土简支空心板梁,跨度21.2 m,桥梁设计荷载为城市-A级.桥宽20 m,车道布置形式为0.25 m(人行栏杆)+3.0 m(人行道)+3.5 m(非机动车道)+0.5 m(安全护栏)+12.25 m(机动车道)+0.5 m(防撞栏杆).桥墩形式为双柱群桩式,即盖梁加立柱加承台加桩;桥台为埋置式桥台,桥梁基础采用直径1.2 m的钻孔灌注桩,桥台采用C20混凝土,承台和桩基采用C30混凝土,桥墩采用C40混凝土,预应力混凝土空心板梁和盖梁采用C50混凝土,预应力钢束采用两端同时张拉,锚下控制预应力为1395 MPa.测试桥梁立面和测试截面见图1,其中B、C截面为应变测试截面.

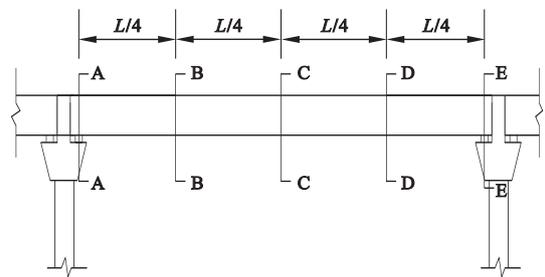


图1 桥梁立面图

Fig. 1 Bridge elevation

采用专业桥梁结构计算分析软件 Midas Civil 建立桥梁空间静动力计算模型(见图2).按照相关桥梁设计规范规定,考虑桥梁实际运营荷载情况,对桥梁设计规范中各项指标进行核算.计算结果为制定荷载试验详细方案提供参考依据.

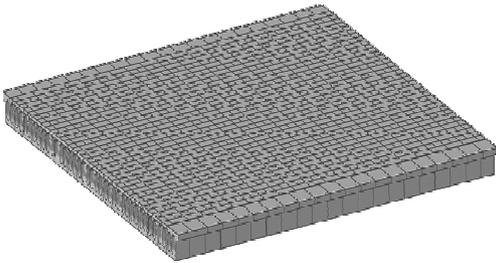


图2 有限元计算模型图

Fig. 2 Finite element calculation model

2 静载试验

2.1 桥梁静载试验工况

静载试验是通过施加静力试验荷载,检验结构主要受力部位在最大(最小)内力状态下的应力和变形^[13-15].试验加载位置一般选取结构的关键截面,并且按照内力等效的原则确定试验荷载的大小和加载位置,使结构关键截面内力在试验荷载作用下与设计荷载作用下近似相等,同时确保结构在各个试验工况下处于安全状态^[5,16-17].

为了满足桥梁承载力检测的要求,笔者选择了反映桥梁结构最不利受力状态的5个试验荷载工况,详细情况见表1所示.

表1 荷载工况

Table 1 Load condition

荷载工况	汽车加载位置	水箱加载位置
工况1	无	人行道偏载加载(均布21个水箱)
工况2	2辆汽车在L/4跨(B-B截面)最大正弯矩的偏载加载	人行道偏载加载(均布21个水箱)
工况3	3辆汽车在L/4跨(B-B截面)最大正弯矩的中载加载	人行道偏载加载(均布21个水箱)
工况4	2辆汽车在跨中(C-C截面)最大正弯矩的偏载加载	人行道偏载加载(均布21个水箱)
工况5	3辆汽车在跨中(C-C截面)最大正弯矩的中载加载	人行道偏载加载(均布21个水箱)

为了保证试验的有效性,确定采用12 kN水箱(注满水)和300 kN(车重+荷重)载重汽车作为试验荷载,并使各测试截面试验荷载效率系数介于0.95~1.05.经计算分析确定,静载试验共需用21个水箱(12 kN)和300 kN(车重+荷重)载重汽车3辆.

2.2 静载试验效率系数

以设计荷载作用下截面最不利的控制内力作为加载控制依据,按照控制内力等效的原则,通过试算确定加载车辆的数量和加载位置,使控制截面的试验荷载效率系数满足相关规程的要求,对于承载能力鉴定性荷载试验,荷载效率系数 η_q 宜介于0.95~1.05^[18].试验前需对试验加载车辆进行过磅称重.其中静力试验荷载效率系数 η_q 按式(1)进行计算:

$$\eta_q = \frac{S_{\text{stat}}}{S(1+\mu)} \quad (1)$$

式中: S_{stat} 为静力试验荷载作用下,某一加载试验项目对应的加载控制截面内力或变形的最大计算效应值; S 为控制荷载产生的同一加载控制截面内力或变形的最不利效应计算值; μ 为按规范取用的冲击系数值^[19].

试验结果表明,采用中载加载时,对结构最不利,根据标准活载与试验加载的计算结果,得到工况3和工况5的荷载效率系数(见表2).从表中分析数据可知,该桥在工况3下的荷载效率系数为0.958,工况5下的荷载效率系数为0.996,荷载效率系数介于0.95~1.05,满足相应规范的要求^[19].

表2 静载荷载效率系数

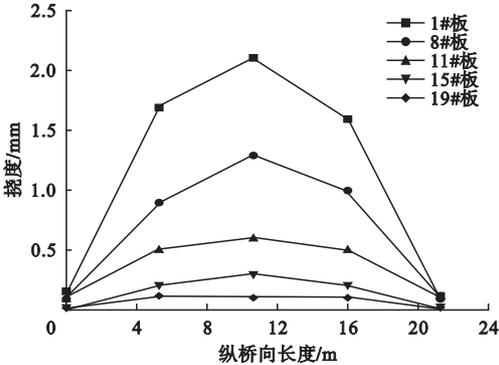
Table 2 Efficiency coefficient of static load

工况	控制截面	$M_s/(kN \cdot m)$	$M_t/(kN \cdot m)$	η_q
3	L/4 截面弯矩	384	401	0.958
5	L/2 截面弯矩	493	495	0.996

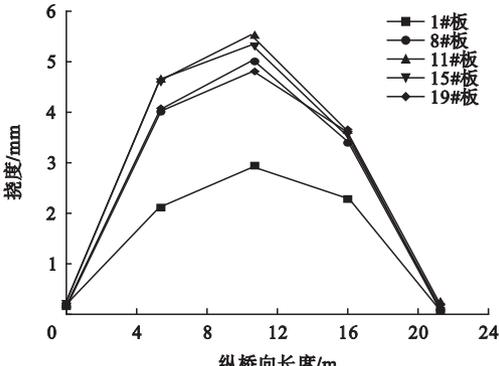
注: M_s 为试验荷载下的计算值, M_t 标准荷载下的计算值,标准荷载中计入了冲击系数.

2.3 挠度测试

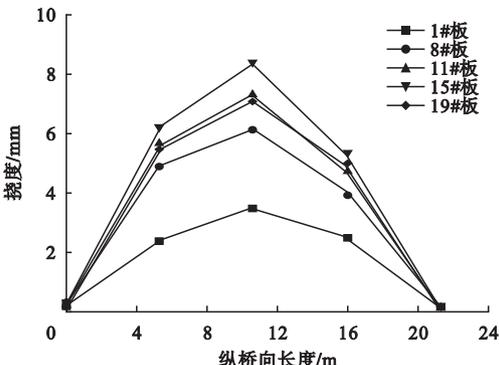
采用高精度水准仪对简支梁桥的 $L/4$ 、 $L/2$ 、 $3L/4$ 截面的挠度位移进行量测,分别测量了桥梁在荷载工况 1、工况 3、工况 5 作用下的挠度值,挠度变化曲线如图 3 所示.各截面位移测点编号及布置图如图 4 所示.



(a) 工况1



(b) 工况3



(c) 工况5

图3 不同工况下挠度对比图

Fig.3 Contrast diagram of deflection under different working conditions

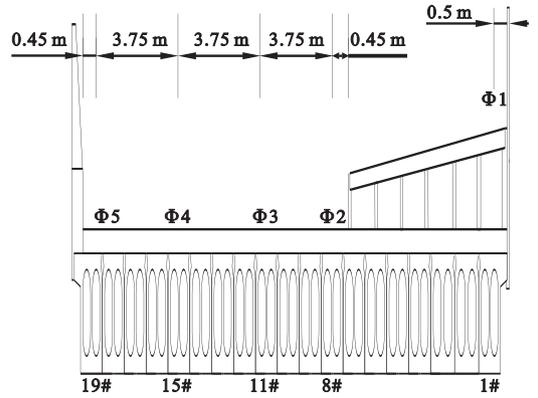
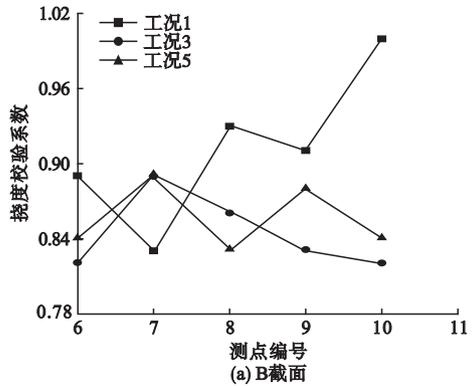


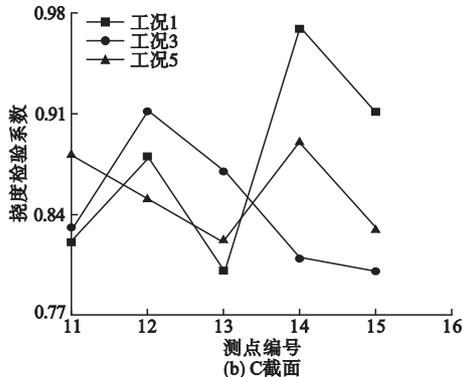
图4 各截面位移测点编号及布置图

Fig.4 Displacement measuring point number and arrangement of each section

图 5 为不同荷载工况下的挠度校验系数.由于采用中载加载时,对结构最为不利.因此,选取了工况 1、3、5 作用下的挠度试验进行分析.从图中可知,所有测点的挠度校验系数在 0.8 ~ 1.0,满足规范文献[19]的规定.试验结果证明,桥梁结构的承载能力满足设计要求,工作性能相对较好.



(a) B截面



(b) C截面

图5 不同荷载工况下挠度校验系数

Fig.5 Deflection testing coefficient under different working conditions

2.4 应变测试

本次试验采用 DH3819N 静态应变测试系统,分别对主梁 $L/4$ 、 $L/2$ 截面的应变进行测试.主要测试控制截面的应变分布规律和整体受力性能.在荷载工况 1~5 分别作用下, B、C 截面的横向应变实测结果、理论计算结果、应变检验系数如图 6 和图 7 所示.图 8 表示 B、C 截面的横向应变测点位置分布.结果表明,当采取中载加载时,应变测试值最大,为最不利情况.卸载后,对桥梁各测试构件应变测点进行了残余应变测试,测试结果见表 3.

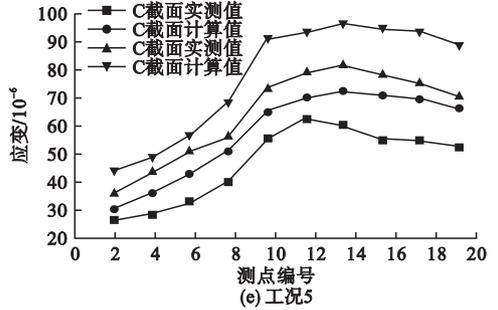
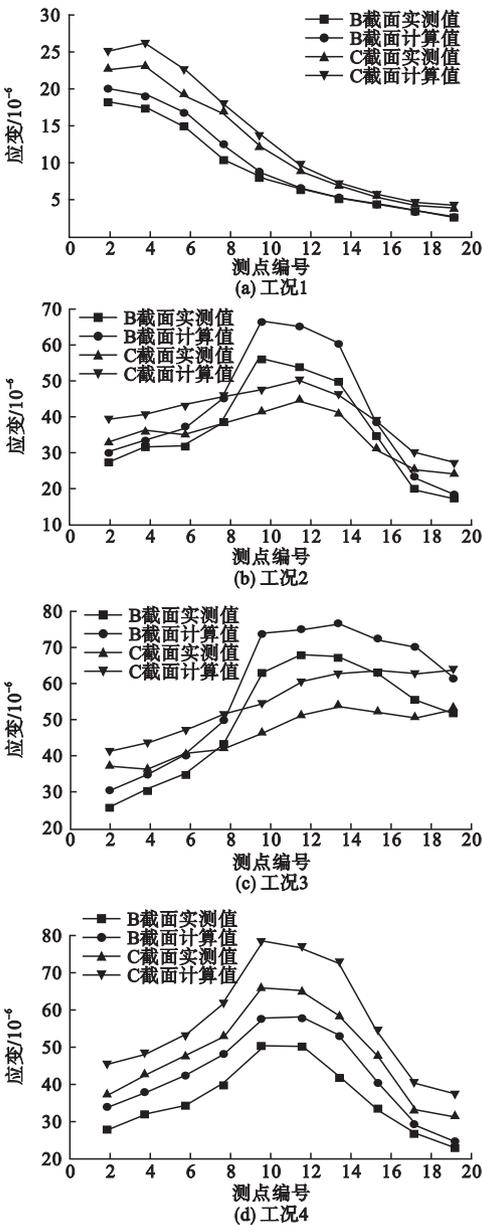


图 6 不同工况下应变对比图

Fig. 6 Contrast diagram of deflection under different working conditions

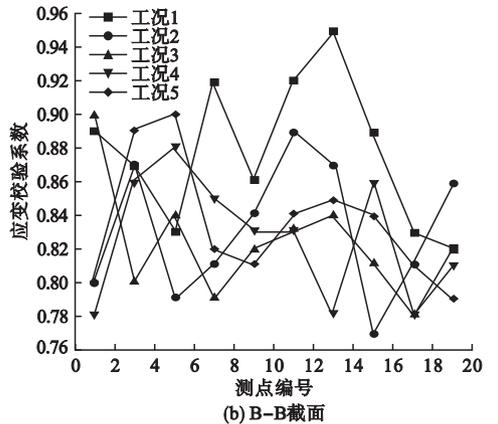
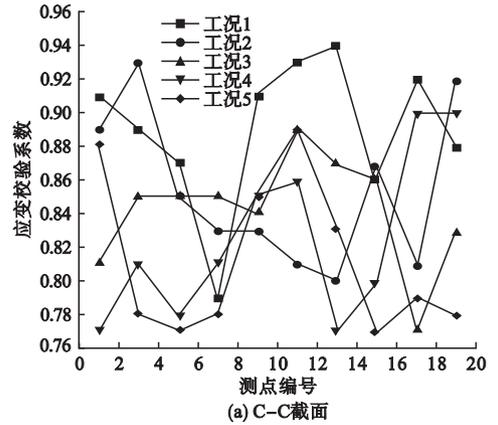


图 7 不同工况下应变校验系数对比图

Fig. 7 Comparison diagram of strain testing coefficient under different working conditions

通过图 6 和图 7 可知,应力校验系数在 0.77~0.92,说明桥梁结构、材料满足设计要求,整体工作性能良好.从表 3 可知试验荷载卸载后归零情况正常,残余应变为 5%~11%,均未超出规范限值 20% 的规定,表明该桥在试验荷载下无较大的不可恢复变形,桥梁在设计荷载下处于弹性工作阶段.同时

也证实了用水箱模拟人群及非机动车道荷载的可行性。

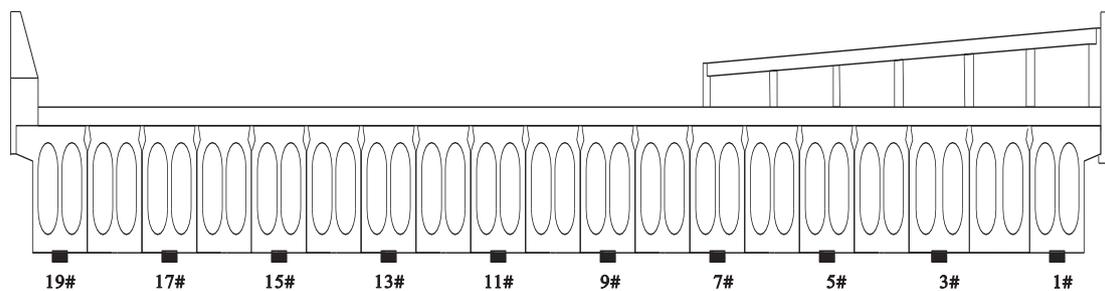


图8 B、C截面的横向应变分布图

Fig. 8 Transverse strain distribution of B and C cross section

表3 应变测试结果

Table 3 Strain test results

测点 编号	峰值应 变/ 10^{-6}	残余应 变/ 10^{-6}	相对残余 应变/%
1#	35.67	3	8
3#	43.67	4	9
5#	50.67	5	10
7#	56	6	11
9#	73.33	6	8
11#	78.67	8	1
13#	81.67	4	5
15#	78.67	7	9
17#	75.33	7	9
19#	70.33	8	11

3.2 动载试验结果

无障碍行车试验用于测试桥面铺装层完好时运行车辆荷载作用下桥跨结构的动力反应,模拟正常行驶状态,用30 t的货车1辆,分别以10 km/h、20 km/h、30 km/h的速度往返方向通过桥梁,量测桥梁的动力响应,测试并计算桥梁的实际冲击系数.动态应变测点共布置4个,分别位于跨中C-C截面11#、13#、15#、17#梁底.动态应变测试采用DH-DAS_5908无线应变测试分析系统进行测试.

有障碍行车试验模拟桥面铺装局部损伤情况下,桥跨结构在运行车辆荷载作用下的动力反应.模拟跳车的障碍高度约为5~8 cm,用1辆30 t的货车,以20 km/h的速度通过桥梁.测点布置方式、位置与无障碍行车的测点布置相同.

跨中截面中梁15#测点的静应变实测平均值 54×10^{-6} ,10 km/h均匀来回两次跑车时最大动应变为 60.59×10^{-6} ,20 km/h均匀来回两次跑车时最大动应变为 61.34×10^{-6} ,30 km/h均匀来回两次跑车时最大动应变为 62.91×10^{-6} ,10 km/h跳车时最大动应变为 64.26×10^{-6} ,经计算各级车速下跑车试验和跳车试验该桥的冲击系数如表5所示.

由表5可知,当车速在10~30 km/h内,随着行车速度的增大,车辆对桥梁的冲击系数呈现递增的趋势,但仍未超出临界车速对

3 动载试验

3.1 自振特性测试

桥梁结构的自振特性(各阶振动频率、对应的振型、阻尼比等)是桥梁的一种固有特性,与桥梁的跨径、结构形式、材料等有关.桥梁结构的自振特性通过脉动试验获得(必要时采用重车激励).经数据分析处理后得到结构自振基本频率测试值与理论计算值,结果见表4.

表4 结构自振基本频率

Table 4 Fundamental frequency of structure

实测频 率阶数	频率/Hz		阻尼比	主振方向
	测试值	理论值		
第一阶	5.47	5.11	0.025	竖弯

应的最大冲击系数。

表5 冲击系数测试值

Table 5 Test values of impact coefficient

试验项目	行车速度/(km·h ⁻¹)	冲击系数(1+μ)
	10	1.122
均匀跑车	20	1.136
	30	1.165
跳车	10	1.190

4 结 论

(1)该桥静载各工况的测试应力校验系数在0.77~0.92,挠度校验系数在0.76~1.00,应力和挠度校验系数都未超出规范1.0的规定,表明该桥强度和刚度都具有一定的富余度.实测最大位移为8.3 mm,小于规范允许的 $L/600$,说明桥梁结构、材料满足设计要求,结构实际工作性能良好.

(2)该桥在静载各工况下的应变、位移测试结果表明,桥梁在设计荷载下处于弹性工作阶段.卸载后归零情况正常,残余应变为5%~11%,均未超出规范限值20%的规定,表明该桥在试验荷载下无较大的不可恢复变形.

(3)该桥动力测试结果显示,其第一阶竖向自振频率为5.47Hz,阻尼比为0.025,冲击系数为1.122~1.190,测试模态与理论模态吻合较好,说明桥梁结构的刚度满足设计要求.

(4)试验车辆按设计荷载进行等效荷载,各静、动载试验结果表明该桥具有较好的承载能力,该桥在试验荷载条件下处于安全状态.

参考文献

[1] 范立础.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2012.
(FAN Lichu. Bridge engineering[M]. Beijing: China Communications Press,2012.)

[2] 武勇.武汉天兴洲公铁两用长江大桥主桥荷载验收试验研究[J].桥梁建设,2010(1):11-16.
(WU Yong. Study of acceptance load testing of main bridge of Wuhan Tianxingzhou Changjiang river rail-cum-road bridge [J]. Bridge construction,2010(1):11-16.)

[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] CLOUGH R W, PENZIEN J. Dynamics of structures [M]. New York: Mc Graw-Hill, 1975.

[5] 谌润水,刘群安.公路桥梁荷载试验的作用与基本原则[J].公路交通科技,2006(5):5-8.
(CHEN Runshui, LIU Qunan. The function and basic principle of load test for highway bridge [J]. Highway traffic science and technology, 2006(5):5-8.)

[6] 聂建国,朱力,樊健生,等.钢-混凝土组合箱梁桥杆系模型的工程应用[J].中国公路学报,2014,27(9):32-40,89.
(NIE Jianguo, ZHU Li, FAN Jiansheng, et al. Engineering application of beam-truss model for steel-concrete composite box-girder bridges [J]. Chinese journal of highway engineering, 2014,27(9):32-40,89.)

[7] 于玲,宋吉宏,姜毅超,等.基于灰色理论对桥梁荷载试验的控制[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2016,32(6):1083-1089.
(YU Ling, SONG Jihong, JIANG Yichao, et al. Bridge load test based on the grey theory [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science),2016,32(6):1083-1089.)

[8] 肖勇刚,胡丽湘.基于荷载试验的预应力空心板桥承载能力分析[J].公路与汽运,2014(1):210-214.
(XIAO Yonggang, HU Lixiang. Bearing capacity analysis of prestressed hollow slab bridge based on load test [J]. Highway and transportation,2014(1):210-214.)

[9] FANNING P J, BOOTHBY T E. Three-dimensional modeling and full-scale testing of stone

- arch bridges[J]. *Computer & structures*, 2001, 79(29): 2645 - 2662.
- [10] FANNING P J, BOOTHBY T E, ROBERTS B J. Longitudinal and transverse effects in masonry arch assessment[J]. *Construct build mater*, 2001; 15(1): 51 - 60.
- [11] THAVALINGAM A, BICANIC N, ROBONSON J I, et al. Computational framework for discontinuous modelling of masonry arch bridges[J]. *Computer & structures*, 2001, 79(19): 1821 - 1830.
- [12] MAREFAT M S, GHAHREMANI-GARGARY E, ATA EI S. Load test of a plain concrete arch railway bridge of 20-m span[J]. *Construction and building materials*, 2004, 18(9): 661 - 667.
- [13] 杜朝伟. 在役桥梁结构检测鉴定与加固技术[M]. 北京: 黄河水利出版社, 2013.
(DU Chaowei. Testing identification and strengthening technology of existing bridge structure[M]. Beijing: The Yellow River Water Conservancy Press, 2013.)
- [14] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁承载能力检测评定规程: JTG/T J21—2011[S]. 北京: 人民交通出版社出版, 2011.
(Ministry of Communications of the People's Republic of China. Specification for inspection and evaluation of load-bearing capacity of highway bridges: JTG/T J21—2011[S]. Beijing: People Communications Press, 2011.)
- [15] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁技术状况评定标准: JTG/T H21—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
(Ministry of Communications of the People's Republic of China. Standards for technical condition evaluation of highway bridges: JTG/T H21—2011[S]. Beijing: People Communications Press, 2011.)
- [16] 聂建国, 李法雄, 樊健生, 等. 大跨钢-混凝土连续组合箱梁桥双重组合作用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(2): 133 - 138.
(NIE Jianguo, LI Faxiong, FAN Jiansheng, et al. Double composite action of large-span steel-concrete composite continuous box-girder bridges[J]. *Journal of tsinghua university(natural science edition)*, 2012, 52(2): 133 - 138.)
- [17] 李运生, 史莉莉, 王铮峰. 钢-混凝土简支组合箱梁桥在车辆荷载作用下的动力响应及冲击系数研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2012, 25(1): 7 - 13.
(LI Yunsheng, SHI Lili, WANG Zhengfeng. Dynamic response and impact coefficient of steel reinforced concrete simply supported composite box girder bridge under vehicle loading[J]. *Journal of Shijiazhuang railway university(natural science edition)*, 2012, 25(1): 7 - 13.)
- [18] 章关永. 桥梁结构试验[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
(ZHANG Guanyong. Bridge structural testing[M]. Beijing: China Communications Press, 2010.)
- [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 Communications of the People's Republic of China. Load testing specifications for highway bridges: JTG/T J21 - 01—2015[S]. Beijing: People Communications Press, 2016.)