

文章编号:1673-2049(2019)03-0101-09

基于荷载试验的双塔部分斜拉桥承载能力评估

吕 梁¹, 贾 毅¹, 纪云涛², 赵人达¹

(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)

摘要:通过成桥荷载试验来评估双塔部分斜拉桥的承载能力和实际工作状况。基于静载试验测试出各工况下结构控制截面的应变、位移以及典型拉索的索力增量,通过无障碍和有障碍行车试验测试出该桥的动应变响应和冲击系数,采用环境激振法测试出该桥的自振频率、阻尼比等振动模态参数,并将测试结果与有限元计算结果进行了对比分析。结果表明:应变校验系数介于0.34~0.94之间,位移校验系数介于0.58~0.94之间,拉索索力增量校验系数介于0.72~0.78之间,结构校验系数均未超过规范上限值1.0,结构整体强度和刚度均比较有保障;结构相对残余应变和相对位移最大值分别为17.2%和17.3%,均未超过规范上限值20%,说明该桥在试验荷载下近似处于弹性工作状态;当有障碍行车车速为 $20\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,结构冲击系数达到最大值0.79,应注意桥面铺装层局部损伤对结构实际工作状况带来的不利影响;结构一阶自由振型以竖向振动为主,自振频率实测值大于计算值,结构实际刚度较好。

关键词:部分斜拉桥;荷载试验;荷载效率系数;结构校验系数;冲击系数;振动模态;承载能力评估
中图分类号:U441.2 **文献标志码:**A

Bearing Capacity Evaluation of Extradosed Cable-stayed Bridge with Double Towers Based on Load Tests

LYU Liang¹, JIA Yi¹, JI Yun-tao², ZHAO Ren-da¹

(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)

Abstract: Bearing capacity and actual working conditions of a extradosed cable-stayed bridge with double towers were evaluated. Structural stain and displacement of control sections as well as cable force increments of typical stay cables under various cases were tested by static test. Dynamic stain response and impact coefficient of the bridge were tested by barrier-free and disabled running tests. Vibration modal parameters such as natural vibration frequency and damping ratio were tested by ambient excitation method. Testing results above were compared with finite element calculation results. The results show that strain verification coefficient is between 0.34 and 0.94. Displacement verification coefficient is between 0.58 and 0.94. Verification coefficient of cable force increment for stay cables is between 0.72 and 0.78. Various verification coefficients are less than 1.0 which is upper limit value in related specification. Strength and rigidity of the whole structure both have a certain security. The maximum relative surplus strain and displacement are respectively 17.2% and 17.3%, which are both less than

收稿日期:2018-08-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51308471);国家重点研发计划项目(2017YFB1201204)

作者简介:吕 梁(1988-),男,河南洛阳人,工学博士研究生,E-mail:lvliang19881105@qq.com。

通信作者:赵人达(1961-),男,贵州毕节人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:rendazhao@163.com。

20% that is upper limit value in related specification. All above demonstrate that the bridge is approximately under elastic working conditions. The maximum structural impact coefficient is 0.79 when disabled vehicle speed is $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Local damage of bridge deck layers has a disadvantage influence on actual working conditions, which is must be noticed. The first order free vibration mode is dominated by vertical vibration. Measured value of free vibration frequency is greater than calculated value. Actual rigidity of the structure is preferable.

Key words: extradosed cable-stayed bridge; load test; load efficiency ratio; structural verification coefficient; impact coefficient; vibration modal; bearing capacity evaluation

0 引言

桥梁荷载试验是通过施加荷载对桥梁结构或构件的静力、动力特性进行的现场试验测试^[1]。荷载试验对于桥梁工程建设和学科进步具有重要意义:通过试验可直接测得理论分析与计算的相关参数,探索桥梁结构受力行为,反过来进一步充实和发展桥梁计算理论^[2],验证各种桥梁有限元模型的准确性和适用性^[3-4];对于新建桥梁,荷载试验为桥梁的竣工验收提供重要的科学依据^[5-7];对于既有桥梁,荷载试验可以评估其使用性能和承载能力,为其继续安全使用、养护、加固、改建及限载加载提供可靠的技术资料^[2,8-16]。

部分斜拉桥(又称矮塔斜拉桥)是介于连续梁(刚构)桥与普通斜拉桥之间的一种桥型,主梁的刚度较大并承担大部分上部荷载;拉索承担小部分荷载,如同超量设置的体外索,其应力幅为常规斜拉桥的 $1/3 \sim 1/2$ ^[17-19]。文献[20]以重庆市合川嘉陵江上某双塔双索面矮塔斜拉桥为实例,对其进行了索力及桥面线形的测量,在此基础上进行了成桥静动力荷载试验。文献[21]结合多跨矮塔斜拉桥结构的受力及控制截面影响线的特点,通过考虑内力和挠度的加载效应及截面影响线的图形相似性、互补性,对桥梁静力荷载试验工况进行了优化。

本文以云南龙瑞高速公路瑞丽江特大桥主桥为工程背景,通过对该桥进行现场荷载试验,测试双塔部分斜拉桥相应的静动力性能参数,评价结构在试验荷载作用下的承载能力和工作性能。建立技术档案,为今后该桥的运营、管养、检测提供基础数据,并为其他类似桥型的荷载试验提供一定的技术参考。

1 工程概况

瑞丽江特大桥是龙陵至瑞丽高速公路的控制性工程,其主桥跨径布置为 $99 \text{ m} + 180 \text{ m} + 99 \text{ m}$ 双塔单索面预应力混凝土刚构体系部分斜拉桥。桥面布

置为双向四车道,设计荷载为公路-I级。主梁为单箱三室变截面箱梁,塔底处梁高 5.8 m ,标准段梁高 3 m 。索塔采用矩形等截面,塔高(从桥面算起) 29 m 。全桥共计 36 根拉索,梁上纵桥向索距 7.0 m ,塔上竖向索距 1.2 m 。塔底以下墩柱采用钢筋混凝土双肢实心墩,墩高 30 m 。根据整个特大桥(主桥+引桥)桥跨的编号顺序,龙陵岸一侧 99 m 边跨记为 5[#]跨, 180 m 主跨记为 6[#]跨,瑞丽岸一侧 99 m 边跨记为 7[#]跨;龙陵岸一侧索塔(墩)记为 5[#]索塔(墩),瑞丽岸一侧索塔(墩)记为 6[#]索塔(墩)。

2 静载试验

2.1 基本方案

静载试验通常按照内力等效的原则,施加等效静力试验荷载,检验结构主要控制截面在最大(最小)内力状态下的应力和变形,同时确保结构在各试验工况下处于安全状态。本文静载试验在箱梁及主塔控制截面混凝土表面布设长标距混凝土应变片($100 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$,电阻为 $120.1 \Omega \pm 0.1 \Omega$),采用 DH3815N 静态应变测试与分析系统进行应变测试;在箱梁及主塔控制截面布设棱镜,采用 TCA1800 新型徕卡全站仪进行挠度测试;在待测拉索上安装高灵敏度压阻式加速度传感器,采用 TST5927 无线遥测振动(索力)测试分析系统测试拉索前几阶自振频率,并由每一阶自振频率间接计算出索力,规范^[1]建议取前 5 阶计算值的均值作为索力实测值。

2.2 测试截面与测点布置

桥梁静载试验应按照结构的最不利受力原则和代表性原则确定测试截面^[1]。本次静载试验共选取 7 个主梁截面、3 个索塔截面;对于部分斜拉桥结构,还应选取典型拉索(本试验中选取 A6 与 B6 拉索各 2 根)进行索力增量测试。静载试验测试截面与拉索如图 1 所示。1-1~7-7 为主梁截面,8-8~10-10 为索塔截面;其中 1-1 为 5[#]边跨最大正弯矩截面;

2-2 为 5[#] 索塔一侧主跨最大负弯矩截面;3-3 为主跨 $L/4$ (L 为跨径) 截面;4-4 为主跨跨中最大正弯矩截面;5-5 为主跨 $3L/4$ 截面;6-6 为 6[#] 索塔一侧主跨

最大负弯矩截面;7-7 为 7[#] 边跨最大正弯矩截面;8-8 为 5[#] 索塔塔底截面;9-9 为 6[#] 索塔塔底截面;10-10 为 6[#] 索塔塔顶截面。

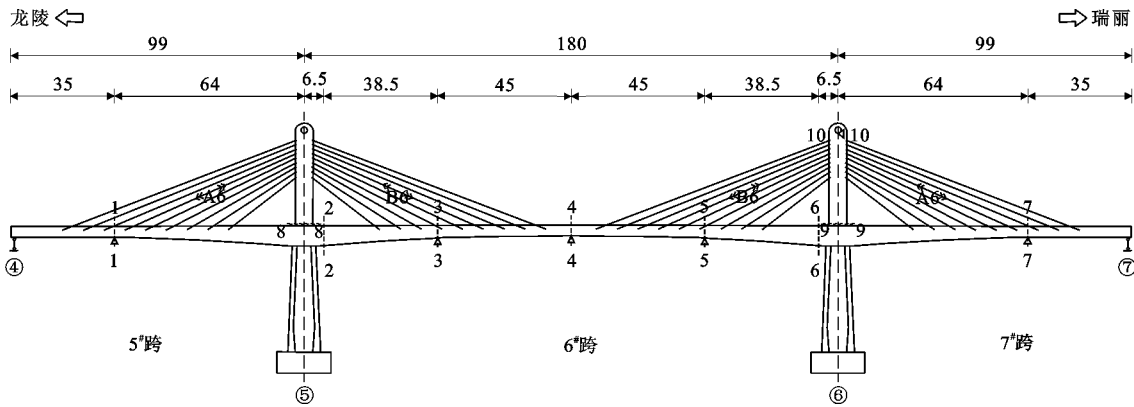


图 1 静载试验测试截面与拉索 (单位:m)

Fig. 1 Testing Sections and Stay Cables in Static Test (Unit:m)

本次静载试验的测点分为应变测点与位移测点 2 类。根据表 1,对于主梁在 1-1,4-4,7-7 这 3 个截面各布置 7 个应变测点;其余 4 个截面各布置 5 个应变测点;在 1-1,3-3,4-4,5-5,7-7 这 5 个截面各布置 3 个位移测点。对于索塔在 8-8 与 9-9 截面各布置 3 个应变测点;在 10-10 截面布置 1 个位移测点。主梁与索塔静载试验截面测点布置如图 2,3 所示。

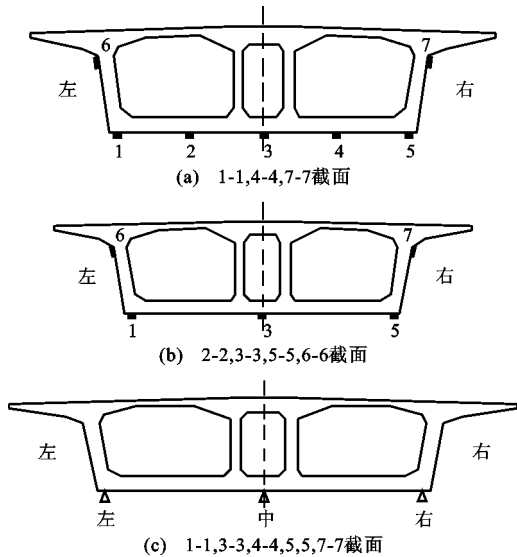


图 2 静载试验主梁截面测点布置

Fig. 2 Measure Points Arrangement of Main Girder Sections in Static Test

2.3 荷载布置与测试工况

本次静载试验采用 36 t 双后轴试验车进行加载,其中试验车前轴轴重 7 t,双后轴轴重各 14.5 t,轮距 1.8 m,前轴与内后轴距 3.8 m,内后轴与外后轴距 1.4 m。静载试验共计 8 个测试工况,见

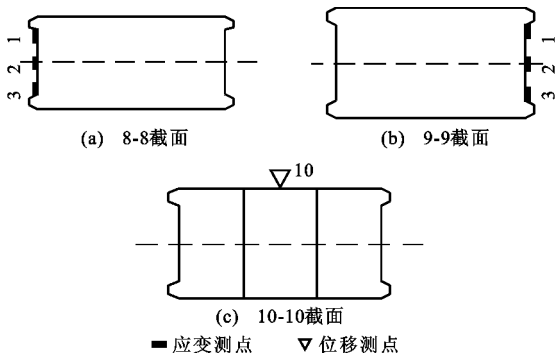


图 3 静载试验索塔截面测点布置

Fig. 3 Measure Points Arrangement of Pylon Sections in Static Test

表 1,各工况中载与偏载的横向轮位如图 4 所示,纵向轮位均基于等效设计荷载效应,在结构控制截面内力影响线最不利位置处布载。

2.4 加载过程控制

在正式试验之前,用 4 辆试验车对试验桥跨进行预加载。通过预加载使结构进入正常工作状态,消除结构非弹性变形。将预加载卸至零荷载,并在结构变形得到充分恢复后方可进入正式加载。为了防止结构发生意外损伤,正式加载应缓慢分级进行,确保加载过程中截面内力逐渐增加,且最大内力不超过控制荷载作用下的最不利内力。正式加载试验分别按加载工况序号逐一进行,完成一个加载工况的试验后,应使结构完全卸载并在其变形充分恢复后方可进入下一工况。

此外,在加载过程中应注意观察新裂缝出现时的情况,记录新裂缝出现时的对应荷载,描述新裂缝的位置、方向、长度、宽度以及卸载后的闭合情况;观

表 1 静载试验测试工况
Tab. 1 Testing Cases in Static Test

工况	荷载布置	测试截面	测试参数
1	5# 边跨中载	1-1	应变、位移
2	5# 边跨偏载		
3	5# 边跨与主跨中载	2-2	应变
		A6 拉索	索力增量
		B6 拉索	索力增量
		3-3	应变、位移
4,5	工况 4: 主跨中载 工况 5: 主跨偏载	4-4	应变、位移
		5-5	应变、位移
		8-8	应变
		9-9	应变
		10-10	位移
		6-6	应变
6	7# 边跨与主跨中载	A6 拉索	索力增量
		B6 拉索	索力增量
		7-7	应变、位移
7	7# 边跨中载	7-7	应变、位移
8	7# 边跨偏载		

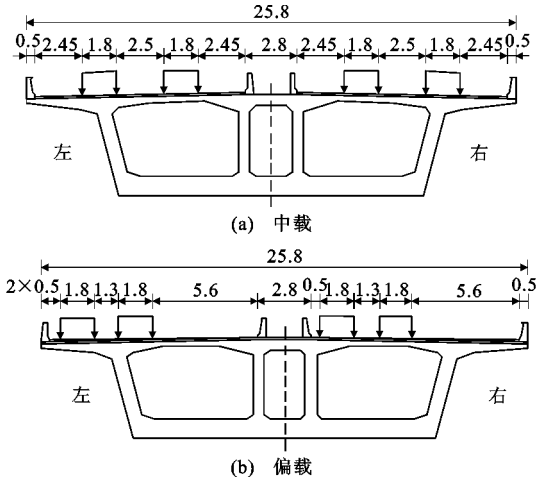


图 4 车辆横向轮位 (单位: m)

Fig. 4 Transverse Wheel Position of Vehicle (Unit: m)

察并描述已有裂缝的长度、宽度等扩展情况;还应注意是否有异常振动、声响等其他现象。

2.5 静载效率系数

采用桥梁工程分析软件 MIDAS/Civil 建立该桥有限元模型,主梁、索塔、墩柱均采用空间梁单元模拟,模型荷载布置、计算截面及计算参数与实际结构试验工况一一对应,将计算结果与实测结果进行对比。主桥有限元模型如图 5 所示。

以设计荷载作用下截面最不利控制内力作为加载依据,按照控制内力等效的原则,使控制截面的试验静载效率系数满足相关规程的要求,对于实际承载能力和工作状态满足要求的桥梁,试验静载效率系数 η 宜介于 0.95~1.05 之间,其计算公式为^[1]

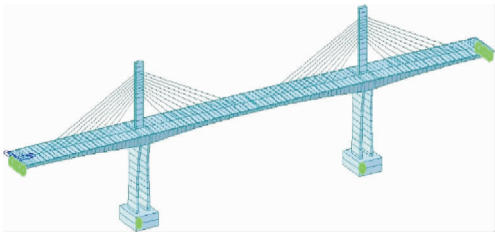


图 5 主桥有限元模型

Fig. 5 Finite Element Model of Main Bridge

$$\eta = \frac{S_s}{S(1+\mu)} \tag{1}$$

式中: S_s 为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 为设计荷载作用下同一控制截面内力或位移的最不利效应计算值; μ 为按规范取用的冲击系数。

根据上述计算原则,本次静载试验各工况下测试项目的静载效率系数见表 2。从表 2 可知,各测试项目的静载效率系数均介于 0.95~1.05 之间,满足规范^[1]要求。

3 动载试验

3.1 基本方案

桥梁动载试验是利用某种激振方法引起桥梁结构的振动,测定其固有频率、阻尼比、振型、冲击系数、动力响应等振动模态参数,从而判断桥梁结构的整体刚度有无降低和运营性能是否安全^[6]。本次试验通过无障碍行车试验和有障碍行车试验,分别模拟桥面铺装层完好和有局部损伤 2 种情况下行车对桥跨结构的冲击作用,采用 DH3817 动态应变测试与分析系统测试结构在动载作用下的动应变时程曲线,根据时程曲线中的最大动应变幅值与其对应的波谷值之间的关系求出冲击系数。

振动模态参数通常采用环境激振法测定,即利用环境随机荷载激振所引起的桥跨结构微幅振动响应来确定结构的动力特性。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。试验采用 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 型拾振器进行振动信号观测,并通过对实测信号进行频谱和波形分析得到该桥的振动模态参数。

3.2 测试截面与测点布置

桥梁动载试验的测试截面应根据桥梁结构振型特征和行车动力响应最大的原则确定^[1]。本次动载试验共选取 3 个动应变测试截面,即主梁主跨 $L/4$, $L/2$, $3L/4$ 截面(与静载试验中的 3-3, 4-4, 5-5 截面

表 2 静载效率系数
Tab.2 Static Load Efficiency Ratio

工况	测试截面	测试项目	$S(1+\mu)$	S_s	η
1	1-1	5# 边跨最大正弯矩/(kN·m)	29 190	30 269	1.04
2			29 205	30 191	1.03
3	2-2	5# 索塔一侧主跨最大负弯矩/(kN·m)	-78 056	-80 877	1.04
	A6 拉索	索力增量/kN	204.8	208.4	1.02
	B6 拉索	索力增量/kN	285.6	271.8	0.95
4	4-4	主跨跨中最大正弯矩/(kN·m)	32 158	32 989	1.03
		主跨跨中最大位移/mm	-42.2	-43.8	1.04
	8-8	5# 索塔塔底最大正弯矩/(kN·m)	11 802	12 305	1.04
	9-9	6# 索塔塔底最大负弯矩/(kN·m)	-11 802	-12 312	1.04
	10-10	6# 索塔塔顶最大纵桥向位移/mm	-7.5	-7.3	0.97
5	4-4	主跨跨中最大正弯矩/(kN·m)	32 144	33 002	1.03
		主跨跨中最大位移/mm	-42.3	-44.1	1.04
	8-8	5# 索塔塔底最大正弯矩/(kN·m)	11 817	12 322	1.04
	9-9	6# 索塔塔底最大负弯矩/(kN·m)	-11 817	-12 332	1.04
	10-10	6# 索塔塔顶最大纵桥向位移/mm	-7.8	-7.4	0.95
6	6-6	6# 索塔一侧主跨最大负弯矩/(kN·m)	-78 056	-80 683	1.03
	A6 拉索	索力增量/kN	204.8	208.1	1.02
	B6 拉索	索力增量/kN	285.6	271.3	0.95
7	7-7	7# 边跨最大正弯矩/(kN·m)	29 190	30 509	1.05
8			29 207	30 488	1.04

一致),每个截面各布置 3 个动应变测点。在有限元分析的基础上,根据该桥型的振动特点和现场实际测试条件,共选取 13 个振动模态测试截面,即将 5# 边跨与 7# 边跨分别 4 等分(各 3 个测试截面),主跨 6 等分(5 个测试截面),两索塔中心线位置处梁 2 个主梁测试截面,每个截面于桥面横桥向左右两端对称布置 2 个振动模态测点,测试结构自振频率及阻尼比等参数。动载试验截面测点布置如图 6 所示。

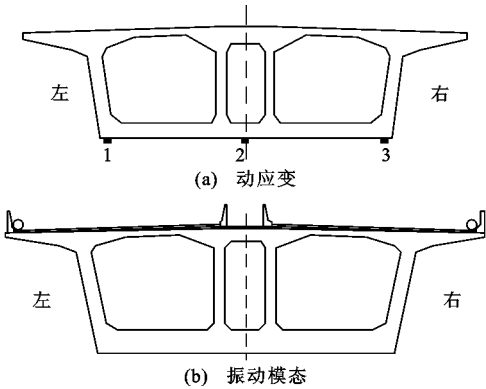


图 6 动载试验截面测点布置
Fig.6 Measure Points Arrangement of Sections in Dynamic Test

3.3 冲击系数

冲击系数测试共计 6 个工况,其中 3 个为无障

碍行车工况,即采用 2 辆试验车分别以 20,30,40 km·h⁻¹的速度匀速行驶过桥;另外 3 个为有障碍行车工况,即从龙陵岸一侧采用 1 辆试验车分别以 20,30,40 km·h⁻¹的速度匀速行驶至主跨 L/2 处并跨越宽度 30 cm、高度 7 cm 的弓形障碍物。对上述 6 个工况测得的动应变时程进行分析计算可得到主桥的冲击系数。

4 静载试验结果分析

4.1 应变测试结果

在各工况试验荷载作用下,测试主梁和索塔各测试截面中各测点的应变值,并与相应的有限元计算值进行对比,其中应变以受拉为正,受压为负。在对试验结果进行分析时有 2 个主要指标,即应变校验系数与相对残余应变(对于位移与索力增量亦同理,下文不再赘述):前者等于测点弹性应变实测值与总应变计算值的比值,比值小于 1 表示结构的实际状况好于理论状况;后者等于测点残余应变实测值与总应变实测值的比值,比值越小表示结构越接近弹性工作状态,安全储备越足,一般工程上要求该比值不超过 20%。图 7~9 分别为结构各测试截面的应变对比、应变校验系数以及相对残余应变,限于篇幅并结合部分斜拉桥的受力特点,对于主梁给出

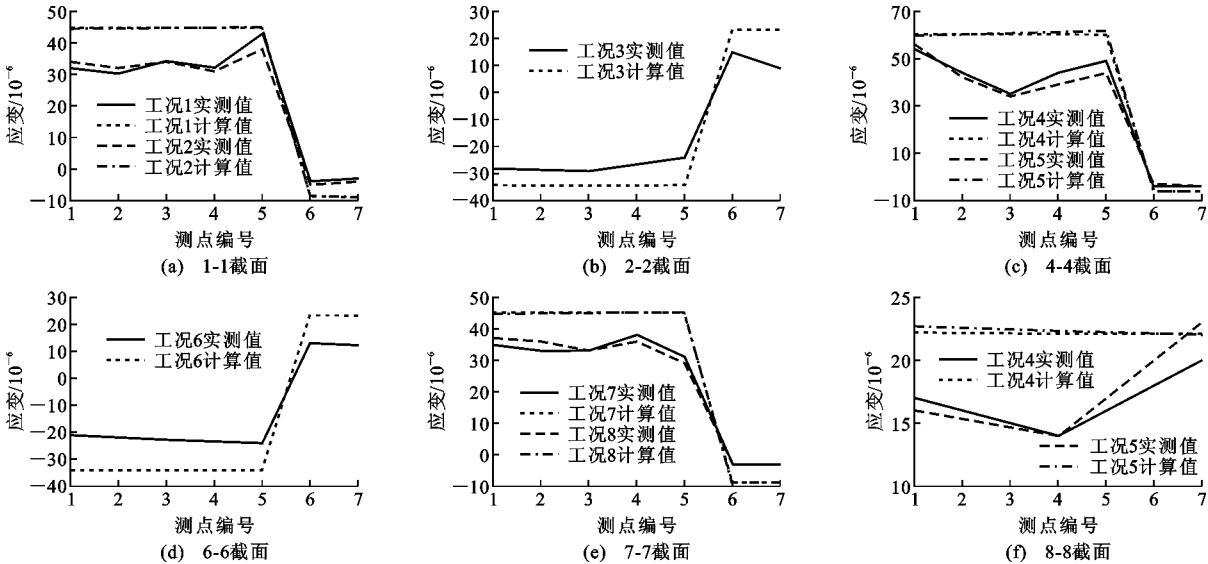


图7 各测试截面应变对比

Fig. 7 Comparisons of Stain in Testing Sections

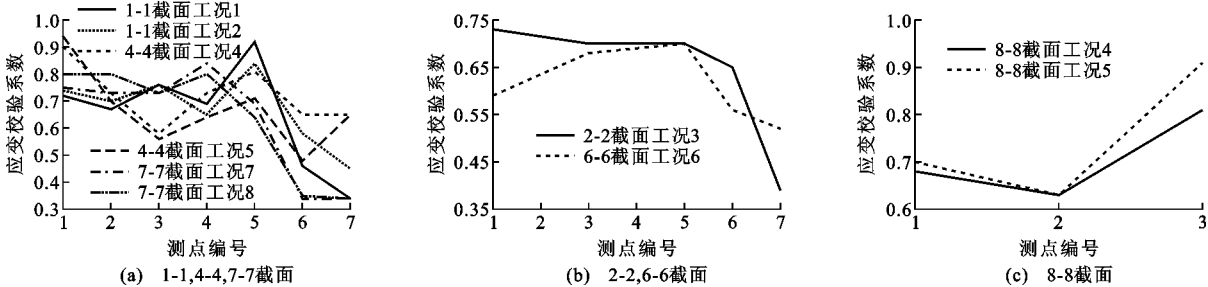


图8 各测试截面应变校验系数

Fig. 8 Strain Verification Coefficients in Testing Sections

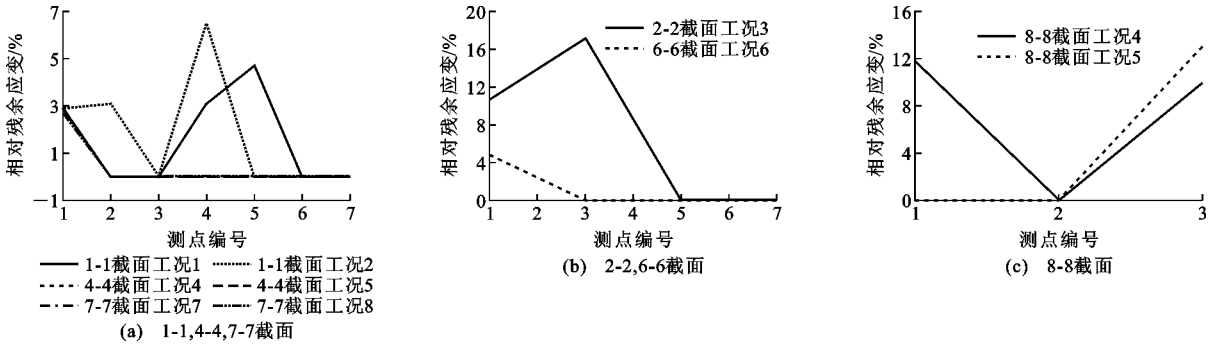


图9 各测试截面相对残余应变

Fig. 9 Relative Surplus Strain in Testing Sections

1-1, 2-2, 4-4, 6-6, 7-7 截面的测试结果,对于索塔给出 8-8 截面的测试结果。

从图 7~9 可以看出,各测试截面的应变实测值均小于计算值。多数截面受拉(压)一侧的各测点应变值相差很小,结构受力较为均匀。主梁截面的应变校验系数介于 0.34~0.94 之间,索塔截面的应变校验系数介于 0.54~0.91 之间,均未超出规范^[1]上限值 1.0,结构整体强度比较有保障,实际承载能力

较好。各工况卸载后,多数测点的相对残余应变为 0%,完全处于弹性工作状态;主梁和索塔截面的相对残余应变最大值分别为 17.2%和 13.0%,均未超出规范^[1]上限值 20%,可认为结构整体在试验荷载下近似处于弹性工作状态,无较大的不可恢复变形。

4.2 位移测试结果分析

在各工况试验荷载作用下,测试主梁和索塔各测试截面中测点的位移值,并与相应的有限元计算

值进行对比,其中主梁位移以向下为正,塔顶纵桥向位移以偏向龙陵岸一侧为正。图 10~12 分别为主梁各测试截面的位移对比、位移校验系数及相对残余位移,6[#] 索塔塔顶 10-10 截面的位移测试结果如表 3 所示,限于篇幅并结合部分斜拉桥的受力特点,对于主梁给出 1-1、4-4、7-7 截面的测试结果。

从图 10~12 及表 3 可以看出,各测试截面的位

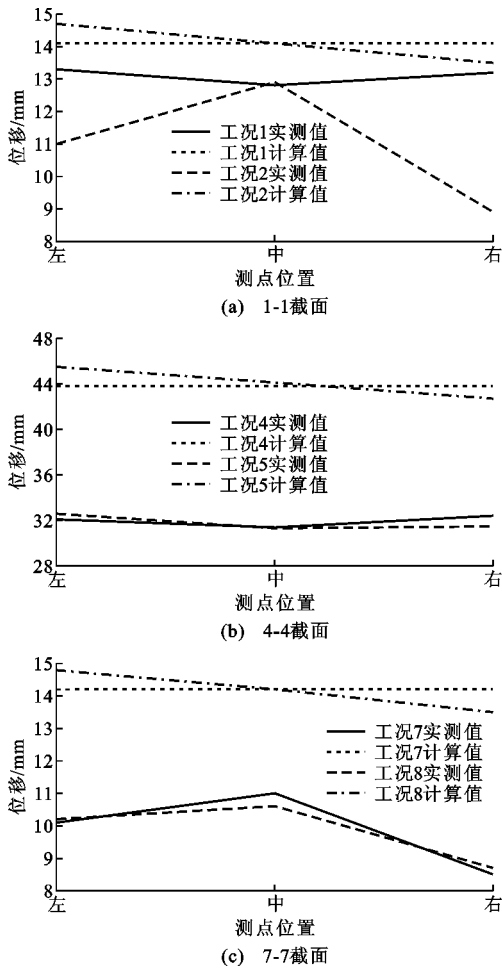


图 10 主梁各测试截面位移对比

Fig. 10 Comparisons of Displacement in Testing Sections of Main Girder

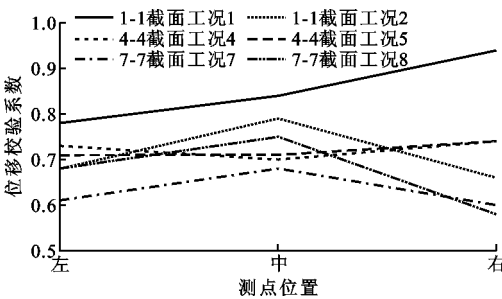


图 11 主梁各测试截面位移校验系数

Fig. 11 Displacement Verification Coefficients in Testing Sections of Main Girder

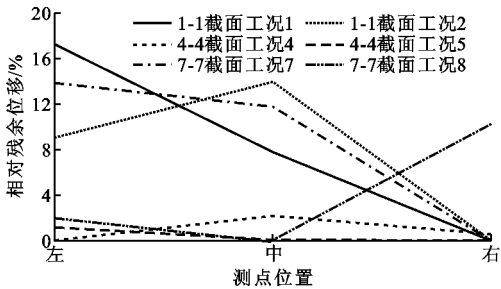


图 12 主梁各测试截面相对残余位移

Fig. 12 Relative Surplus Displacement in Testing Sections of Main Girder

移实测值均小于计算值。主梁截面的竖向位移校验系数介于 0.58~0.94 之间,索塔塔顶截面的纵向位移校验系数为 0.48(中载)和 0.51(偏载),均未超出规范^[1]上限值 1.0,结构整体刚度较有保障,实际工作性能较好。各工况卸载后,部分测点的相对残余位移为 0,完全处于弹性工作状态;主梁与索塔截面的相对残余位移最大值分别为 17.3% 和 5.1%,均未超出规范^[1]上限值 20%,可认为结构整体在试验荷载下近似处于弹性工作状态,无较大的不可恢复变形。

4.3 拉索索力增量测试结果分析

在各工况试验荷载作用下,测试典型拉索的索力增量值,并与相应的有限元计算值进行对比,其中索力以受拉为正。典型拉索测试结果如表 4 所示。

从表 4 可以看出,拉索索力增量实测值均小于计算值,索力增量校验系数介于 0.72~0.78 之间,均未超出规范^[1]上限值 1.0,拉索索力变幅合理,实际受力状况好于理论状况。

5 动载试验结果分析

5.1 冲击系数

通过对各工况实测动应变数据进行分析计算,得出各工况下主桥冲击系数 μ ,见表 5。

从表 5 可以看出:无障碍行车工况下主桥冲击系数介于 0.06~0.16 之间;有障碍行车工况下主桥冲击系数介于 0.22~0.79 之间。无障碍行车工况下主桥冲击系数与行车速度之间无明显相关性,相同车速下有障碍行车工况主桥冲击系数相比无障碍行车工况显著提升。这表明在桥面铺装层有局部损伤时会对结构实际工作状态带来不利影响,因此加强桥面保养,维护桥面平整,是改善该桥动力特性的良好措施。

5.2 振动模式

通过对各测试截面中测点实测信号进行频谱与

表 3 6# 塔顶 10-10 截面位移测试结果

Tab. 3 Displacement Testing Results of 10-10 Section at Top of 6# Pylon

测点位置	工况	实测位移/mm			计算位移/mm	位移校验系数	相对残余位移/%
		总位移	弹性位移	残余位移			
中	4	3.5	3.5	0.0	7.3	0.48	0.0
	5	3.9	3.7	0.2	7.3	0.51	5.1

表 4 典型拉索索力增量测试结果

Tab. 4 Testing Results of Cable Force Increments of Typical Stay Cables

拉索位置	拉索编号	实测索力 增量/kN	计算索力 增量/kN	校验系数
5# 索塔	A6	150.0	208.4	0.72
	B6	201.6	271.8	0.74
6# 索塔	A6	151.5	208.1	0.73
	B6	211.2	271.3	0.78

表 5 各工况下主桥冲击系数

Tab. 5 Impact Coefficients of Main Bridge Under Different Cases

工况	车速/(km·h ⁻¹)	测试截面	冲击系数 μ
无障碍行车	20	主跨 $L/4, L/2,$ $3L/4$ 截面	0.06
	30		0.16
	40		0.14
有障碍行车	20		0.79
	30		0.39
	40		0.22

波形分析,得到主桥实测振动模态参数,并与理论计算值进行对比,见表 6。

表 6 主桥振动模态参数

Tab. 6 Vibration Modal Parameters of Main Bridge

阶次	计算频率/Hz	实测频率/Hz	实测阻尼比	振型描述
一阶竖向	0.636	0.702	0.040 5	对称竖弯
一阶横向	1.007	1.031	0.020 2	对称横弯

从表 6 可知:主桥一阶竖向振动频率实测值为 0.702 Hz,对应阻尼比为 0.040 5;一阶横向振动频率实测值为 1.031 Hz,对应阻尼比为 0.020 2,故主桥一阶振动以竖向振动为主,这与该桥主梁较宽、横向刚度较大的特点吻合。竖向与横向振动频率实测值均大于计算值,结构实际刚度较好。实测阻尼比不超过 0.05,属小阻尼振动,衰减较慢,结构整体工作性能较好。

6 结 语

(1)主梁的应变校验系数介于 0.34~0.94 之间,索塔的应变校验系数介于 0.54~0.91 之间;拉索的索力增量校验系数介于 0.72~0.78 之间;主梁

的竖向位移校验系数介于 0.58~0.94 之间,索塔的塔顶纵向位移校验系数为 0.48(中载)和 0.51(偏载)。这表明结构整体强度和刚度均比较有保障,实际承载能力和工作性能较好。

(2)各工况卸载后,主梁的相对残余应变和位移最大值分别为 17.2%和 17.3%,索塔的相对残余应变和位移最大值分别为 13.0%和 5.1%。这表明结构在试验荷载下近似处于弹性工作状态,无较大的不可恢复变形。

(3)结构在无障碍和有障碍行车试验工况下的冲击系数范围为 0.06~0.79,有障碍行车车速为 20 km·h⁻¹时,结构冲击系数达到最大值。这表明在桥面铺装层有局部损伤时会对结构实际工作状态带来一定的不利影响。

(4)振动模态测试结果显示结构一阶振动以竖向振动为主,且一阶竖向自振频率实测值 0.702 Hz 大于计算值 0.636 Hz,结构实际刚度较好。

参考文献:

References:

[1] JTG/T J21-01—2015,公路桥梁荷载试验规程[S]. JTG/T J21-01—2015, Load Test Methods for Highway Bridge[S].

[2] 湛润水,胡钊芳.公路桥梁荷载试验[M].北京:人民交通出版社,2003.

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

[3] 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 Jian-guo, ZHU Li, FAN Jian-sheng, et al. Engineering Application of Beam-truss Model for Steel-concrete Composite Box-girder Bridges [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(9): 32-40, 89.

[4] 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 Jian-guo, LI Fa-xiong, FAN Jian-sheng, et al.

- Double Composite Action of Large-span Steel-concrete Composite Continuous Box-girder Bridges[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2012, 52(2): 133-138.
- [5] 王 伟. Midas Civil 桥梁荷载试验实例精析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
WANG Wei. Midas Civil Engineering Projects Analysis on Load Test for Bridge[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2017.
- [6] 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 for Highway Bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [7] 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, 40(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, 40(1): 11-16.
- [8] 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 Xiao-bin, XIA Zhao-guang, PU Qian-hui. 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.
- [9] 田志勇, 唐茂林, 蒲黔辉. 宁波庆丰桥静、动载试验研究[J]. 桥梁建设, 2012, 42(5): 31-36.
TIAN Zhi-yong, TANG Mao-lin, PU Qian-hui. Study of Static and Dynamic Load Tests of Qingfeng Bridge in Ningbo[J]. Bridge Construction, 2012, 42(5): 31-36.
- [10] 贾 毅, 廖 平, 王永宝, 等. 基于荷载试验的三跨简支斜桥承载能力研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(1): 76-83.
JIA Yi, LIAO Ping, WANG Yong-bao, et al. Research on Bearing Capacity of Three-span Simply Supported Skew Bridge Based on Load Test[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(1): 76-83.
- [11] 贾 毅, 唐利科, 李福海, 等. 基于荷载试验的预应力简支 T 梁桥承载能力评估[J]. 工业建筑, 2017, 47(4): 71-75, 5.
JIA Yi, TANG Li-ke, LI Fu-hai, et al. Bearing Capacity Evaluation of a Prestressed Simply Supported T Girder Bridge Based on Load Testing[J]. Industrial Construction, 2017, 47(4): 71-75, 5.
- [12] 贾 毅, 王永宝, 廖 平, 等. 某城市独塔悬索桥荷载试验研究[J]. 公路, 2016(12): 114-118.
- JIA Yi, WANG Yong-bao, LIAO Ping, et al. Research on Bearing Capacity of Three-span Simply Supported Skew Bridge Based on Load Test[J]. Highway, 2016(12): 114-118.
- [13] 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 Lun-hua, JI Yun-tao, 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.
- [14] MOHAMMAD S M, ESMAEEL G G, SHERVAN A. Load Test of a Plain Concrete Arch Railway Bridge of 20-m Span[J]. Construction and Building Materials, 2004, 18(9): 661-667.
- [15] FANNING P J, BOOTHBY T E, ROBERTS B J. Longitudinal and Transverse Effects in Masonry Arch Assessment[J]. Construction Building Materials, 2001, 15(1): 51-60.
- [16] CHATTERJEE P K, DATTA T K. Dynamic Analysis of Arch Bridges Under Traveling Loads[J]. International Journal of Solids Structures, 1995, 32(11): 1585-1594.
- [17] 詹建辉, 张 铭. 预应力混凝土部分斜拉桥[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016.
ZHAN Jian-hui, ZHANG Ming. Prestressed Concrete Partial Cable-stayed Bridge[M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd, 2016.
- [18] 陈从春. 矮塔斜拉桥[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
CHEN Cong-chun. Extradosed Cable-stayed Bridge[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [19] 陈从春, 周海智, 肖汝诚. 矮塔斜拉桥研究的新进展[J]. 世界桥梁, 2006(1): 70-73, 80.
CHEN Cong-chun, ZHOU Hai-zhi, XIAO Ru-cheng. Recent Research Advancement of Extradosed Cable Stayed Bridge[J]. World Bridges, 2006(1): 70-73, 80.
- [20] 王 伟. 宽幅矮塔斜拉桥成桥荷载试验研究[J]. 公路, 2015(10): 72-78.
WANG Wei. Load Test Study of Extradosed Cable-stayed Bridge with Wide Deck[J]. Highway, 2015(10): 72-78.
- [21] 王 伟, 张玉平, 奉龙成, 等. 多跨矮塔斜拉桥静力荷载试验优化研究[J]. 世界桥梁, 2017, 45(1): 56-60.
WANG Wei, ZHANG Yu-ping, FENG Long-cheng, et al. Study of Optimization of Static Load Tests for Multi-span Extradosed Bridge[J]. World Bridges, 2017, 45(1): 56-60.