文章编号: 1002-0268 (2007) 02-0073-04

安庆长江公路大桥静动载试验研究

李晓斌, 夏招广, 蒲黔辉
(西南交通大学, 四川 成都 610031)

摘要: 以跨径 510 m 的斜拉桥——安庆长江大桥为例, 介绍了斜拉桥静、动载试验的方法。静载试验中, 测试并分析了静载工况下的主梁挠度、主塔塔顶变位、斜拉索索力增量以及主梁与主塔相应的截面应力。动载试验中, 测试了该桥的自振特性, 并进行行车激振试验, 分析桥跨结构在行车时的冲击作用。试验结果表明主梁、塔在使用荷载下均处于弹性工作状态, 桥跨结构设计合理, 具有良好的强度与刚度, 满足设计要求。

关键词: 静载试验; 动载试验; 自振特性; 冲击作用
中图分类号: U448.27 文献标识码: A

Analysis of Static and Dynamical Test of Anqing Changjiang River Highway Bridge

LI Xiao-Bin, XIA Zhao-guang, PU Qian-hui
(Southwest Jiaotong University, Sichuan Chengdu 610031, China)

Abstract: Anqing Changjiang River Bridge (510 m-span cable-stayed bridge) is taken as an example for introducing the method of static and dynamical test of cable-stayed bridge including the deflection test of the beam and the tower, the change of tension of the cables, and the stress of the beam and the tower under static loads. The natural vibration of the structure is tested, and the impact of the passing vehicles is analyzed under dynamical loads. The test results indicate that the beam and tower work at elastic state under the normal applying load The design of the structure is rational, and has enough strength and stiffness, satisfying the design requirement.

Key words: static test; dynamical test; natural vibration property; impact

安庆长江公路大桥主桥为 5 跨 (50 m+ 215 m+ 510 m+ 215 m+ 50 m) 连续钢箱梁斜拉桥。桥面纵坡为 2.75%, 其中主跨处于 R= 20 000 m 的圆弧竖曲线上。引桥为预应力混凝土连续箱梁桥, 主桥主梁为全焊扁平流线形闭口钢箱梁, 其上翼缘为正交异性板结构。桥面总宽 30 m, 设计荷载为: 汽车-超 20 级、挂车-120。实施成桥静动载试验目的在于检验斜拉桥结构设计与施工质量, 为竣工验收提供重要依据; 了解桥跨结构的实际工作状态, 判定实际承载能力, 评价其在设计荷载下的工作性能。通过动力试验了解桥跨结构的固有振动特性以及其在长期使用荷载阶段的动力性能, 论证其抗风、抗震性能, 并进一步验证斜拉桥结构设计理论和计算方法的合理性。

1 试验荷载设计与试验方法

1.1 静载加载设计

静载试验加载位置与加载工况的确定, 主要根据设计控制荷载在主梁、主塔上产生的最不利弯矩效应值按 0.80~ 1.05 的效率系数等效换算而得, 并尽可能用最少的加载车辆达到最大的试验荷载效率。同时, 应考虑简化加载工况, 缩短试验时间。理论计算采用平面专用有限元程序进行, 根据计算结果, 主要加载工况有: 主跨与边跨主梁的最大正、负弯矩工况及主塔的最大弯矩工况, 加载过程中采用分级加载。静载测试布置见图 1。图 1 中圆圈加箭头表示挠度测点, 实心圆圈表示自振测点。

1.2 静载测试内容与方法

静载加载工况下主要测试主梁、主塔应力, 斜拉索的索力增量, 主梁挠度与主塔塔顶变位。应力测试采用粘贴箔式应变计, 由电阻应变测量系统测量, 温度补偿用测点附近事先贴好应变花的小钢板来实现。主梁应力测点布置见图 2。图 2 中三角形为应力测点,

收稿日期: 2005-09-16

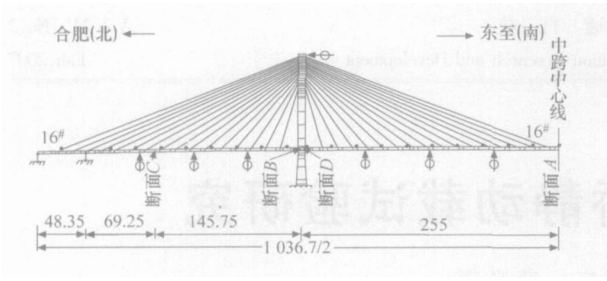

图 1 静动载测试断面布置

Fig. 1 Layout of the section of static and dynamical test

编号有~ 的三角形为动应力测点。斜拉索索力增量采用激振测定法，即在加载前后分别对斜拉索的自振频率进行测量，利用弦振动理论计算加载前后斜拉索的索力，得出索力增量。几何变位测量采用测距标准差为 (1 mm+ 2 ppm)，测角标准差 ±2″的全站仪进行极坐标 4 测回观测。在试验过程中用温度枪对斜拉索、梁体、主塔进行点温度测量。

1.3 动载测试内容与方法

动力测试主要包括自振特性测试和行车激振试验。自振特性测试是测试主梁、主塔的自振频率和振型。行车激振试验包括有障碍行车试验和无障碍行车试验，分别模拟桥面有无损伤时桥面行车对桥跨结构的冲击作用。

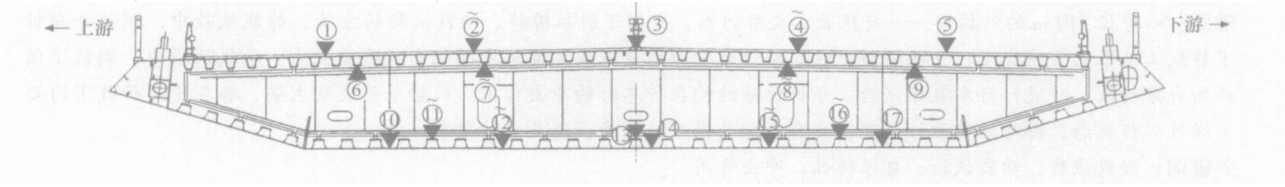

图 2 主梁应力测点布置

Fig. 2 Layout of the stress-tested points of main beam

自振特性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，并实施 FFT 信号处理分析出频域响应结果。障碍行车 (跳车) 试验是在测试截面所对应的桥面上设置障碍物来模拟桥面铺装局部损伤状态，测定桥跨结构在运行车辆荷载作用下的动力响应。由动态应变仪测试主梁的动态应变，并由桥梁光电挠度仪测试主梁的动挠度。

2 静载试验结果与分析

2.1 中跨跨中加载工况主梁挠度

中跨跨中对称加载工况下各测点的挠度测试结果见图 3，偏载挠度测试结果见表 1。从图 3 可以看出，中跨跨中对称加载工况下主梁的实测变形曲线平滑连续，且与理论计算变形吻合较好，说明主梁具有较好的整体刚度，结构受力合理，符合设计要求。从表 1 可以看出，偏载工况下中跨各测点的挠度偏载增大系数介于 1.10~ 1.12 之间，与同类斜拉桥相比在正常的范围内，偏载效应不太明显，进一步验证了主梁结构有较好的整体刚度。

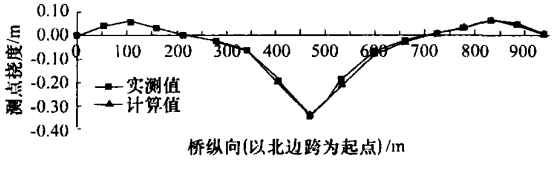

图 3 主梁中跨跨中 *A*-*A* 工况下主梁几何变位曲线图

Fig. 3 The deflection curve of beam under *A*-*A* load case

表 1 主梁中跨跨中截面 (*A*-*A*) 偏载挠度增大系数

Tab. 1 Amplified factor of deflection of beam under the dissymmetrical load case of the section (*A*-*A*) in span middle of main beam

测试位置	上游挠度/m	下游挠度/m	挠度增大系数
中跨 *L*/8	- 0.016	- 0.013	1.10
中跨 *L*/4	- 0.038	- 0.030	1.12
中跨 3*L*/8	- 0.104	- 0.083	1.11
中跨 *L*/2	- 0.194	- 0.160	1.10
中跨 5*L*/8	- 0.110	- 0.090	1.10
中跨 3*L*/4	- 0.041	- 0.033	1.11
中跨 7*L*/8	- 0.017	- 0.014	1.10

2.2 各工况下主梁应力分析

由表 2 可以看出，各工况下对应主梁截面的应力校验系数介于 0.86~ 0.92 之间，均小于 1，在合理的范围内，实测应变回零状况良好，可见主梁处于弹性工作状态，说明主梁结构具有足够的强度。

表 2 主梁截面顶、底板应力测试结果

Tab. 2 The stress-test result of the top deck and the bottom plate of main beam

加载工况	截面上缘(顶板)			截面下缘(底板)		
	实测/MPa	计算/MPa	校验系数	实测/MPa	计算/MPa	校验系数
A-*A*	- 27.76	- 32.21	0.86	38.95	42.63	0.91
B-*B*	17.02	18.52	0.92	/	/	/
C-*C*	- 25.53	- 28.36	0.90	35.4	39.46	0.90

2.3 斜拉索索力测试分析

A-*A* 和 *C*-*C* 工况下索力增量测试结果见表 3。由表 3 可看出，*A*-*A*、*C*-*C* 工况下对应索力增量结构校较低。

分析认为，由于斜拉索为平行钢绞线，钢绞线采用 HDPE 圆管作为护套，同时在斜拉索的上、下端部已经安装了减振器，对振动频率测试法的精度均有较大影响，导致了索力增量实测值与计算值差异较大。

表 3　*A-A*、*C-C* 工况下索力增量测试结果（单位：kN）

Tab 3　The result of force increment of cable under *A-A*、*C-C* load case (unit: kN)

加载工况	测试索号	实测值	计算值	校验系数
A-A	NJ15	405	806	0.50
	NJ16	302	722	0.42
	SJ15	434	815	0.53
	SJ16	421	715	0.59
C-C	NA9	338	600	0.56
	NA10	273	413	0.66
	NA11	123	181	0.68

注：SJ 表示南半跨江侧；NA 北半跨岸侧。

2.4　主塔应力分析

主塔上塔柱根部截面 *D-D* 试验荷载作用下的应力实测值及其与计算值的比较见表 4。从实测结果来看，塔柱截面上、下缘的应力结构校验系数分别为 0.82、0.88，实测应力较小，可见主塔在该工况下处于弹性受力状态，具有足够的强度，因此主塔的受力是合理的。

表 4　*D-D* 工况下塔柱应力测试结果分析（单位：MPa）

Tab 4　The stress-tested result of the tower under *D-D* load case (unit: MPa)

测点位置	实测值	计算值	校验系数
D-D 截面上缘	-1.52	-1.85	0.82
D-D 截面下缘	1.67	1.90	0.88

2.5　各工况下主塔塔顶变位测试结果

各加载工况下塔顶纵向偏位实测值与计算值见表 5。从试验结果和计算值比较来看，塔东西两侧变形的一致性良好，结构校验系数在 0.67～1.00 之间，实际结构受力变形与设计计算总体吻合良好，表明桥塔结构具有足够的刚度。

表 5　*A-A*、*C-C* 工况下塔顶纵向偏位实测值与计算值的比较

Tab 5　Comparison of longitudinal deflection test and analysis of the tower under *A-A*、*C-C* load case

加载工况	项目	测点位置			
		北塔上游	北塔下游	南塔上游	南塔下游
A-A	实测值/m	0.074	0.075	-0.072	-0.075
	计算值/m	0.075		-0.074	
	校验系数	1.00		0.99	
C-C	实测值/m	-0.043	-0.043	0.008	0.01
	计算值/m	-0.064		0.012	
	校验系数	0.67		0.75	

3　动载试验结果与分析

3.1　自振特性测试结果与分析

自振特性的计算分析采用通用有限元程 ANSYS 建立空间梁杆单元模型作模态分析，桥跨结构的自振特性实测值与计算值的比较见表 6。

表 6　结构自振频率实测值与计算值的比较

Tab. 6　Comparison of natural vibration frequencies test and analysis of the structure

序号	振型特征	自振频率/Hz		阻尼比
		实测值	计算值	
1	竖弯 1 阶	0.273	0.277	0.007
2	竖弯 2 阶	0.352	0.376	0.006
3	侧弯 1 阶	0.938	1.029	0.004
4	扭转 1 阶	0.957	0.848	0.006

从表 6 中可以看出，实测竖向基频为 0.273 Hz，与计算值吻合较好，其他高阶次的实测频率与计算值的误差相对较大，说明结构动力计算模式和实际结构有一定差异，特别在对梁体多支承体系的模拟应进一步优化；实测 1 阶阻尼比为 0.007，说明结构的阻尼系数较小，衰减较慢，这与斜拉桥的结构形式是一致的；实测结构 1 阶对称扭转振动频率（0.957 Hz）与对称 1 阶竖弯振动频率（0.277 Hz）的比值为 3.51，该比值大于 3.0，说明桥梁的颤振临届风速大，结构具有良好的抗风能力；实测低阶频率的频带宽 0.273～0.957 Hz，而运营车辆转向架等悬挂体系的频率一般在 2 Hz 左右，故车辆的频率不会耦合进入低频带区域，也极少出现共振的现象，所以，桥跨结构具有良好动力性能。

3.2　行车激振结果与分析

3.2.1　实测动应变结果及分析

车速为 5 km/h 的匀速行车工况下，主梁中跨跨中截面的顶、底板测点的动应变曲线分别见图 4、图 5。从应变曲线中可以看出在车辆经过测试截面时刻，应变出现局部突变，说明加劲梁第 2、3 体系的应变

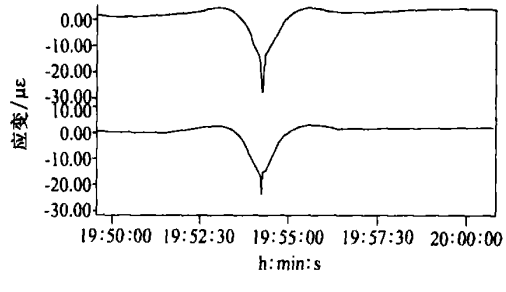

图 4　主梁中跨跨中截面（*A-A*）顶板应变影响线

Fig 4　The influence line of strain of the top deck of

影响范围较小。

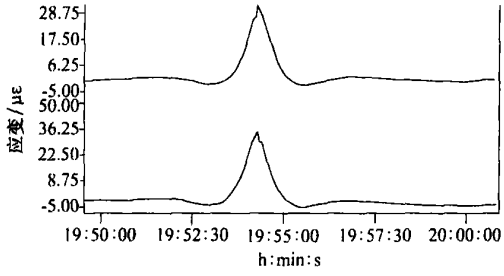

图 5 主梁中跨跨中截面 (*A*-*A*) 底板应变影响线

Fig 5 The influence line of strain of the bottom plate of the section (*A*-*A*) in span middle of main beam

3.2.2 实测动挠度结果及分析

在 5~ 80 km/h 的行车激振和 5~ 30 km/h 的跳车激振作用下, 主梁中跨跨中挠度测点的动态效应增大系数见图 6。

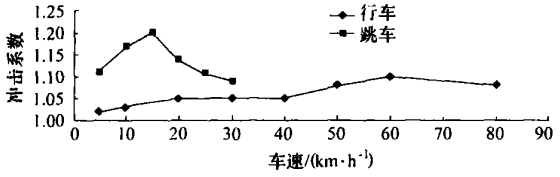

图 6 行车及跳车时主梁中跨跨中的动态响应与行车速度的关系

Fig. 6 The relation between dynamical response and speed of passing vehicle under jumping and braking condition

从实测动挠度结果可以看出: 各行车激振工况下主梁跨中挠度的动态效应增大系数介于 1.02~ 1.10 之间; 最大值出现在时速为 60 km/h 时, 可见行车对主梁的冲击效应不大, 说明当桥面平顺时, 桥面行车对桥跨结构的冲击作用很小。各跳车激振工况下主梁跨中挠度的动态效应增大系数介于 1.09~ 1.20 之间; 最大值出现在时速为15km/h时, 说明当桥面不平顺时, 桥面行车对桥跨结构的冲击作用将明显增大。

4 结论

桥跨结构静力荷载试验结果表明, 结构在试验荷载下处于弹性受力状态, 主梁、主塔的刚度、强度性能良好, 结构受力合理, 符合设计要求。斜拉索索力增量实测值与计算值差异较大, 主要是由于斜拉索为平行钢绞线, 钢绞线采用 HDPE 圆管作为护套, 同时在斜拉索的上、下端部已经安装了减振器, 对振动频率测试法的测试精度有较大影响。偏载作用下, 主梁挠度偏载增大效应系数在 1.10~ 1.12 之间, 验证了桥跨结构具有良好的整体刚度。桥跨结构能够满足设计汽-超 20, 挂-120 的荷载等级要求, 并且具有良好的抗风、抗震性能, 满足设计要求。

参考文献:

[1] 安庆长江公路大桥鉴定报告 [R] . 成都: 西南交通大学结构工程试验中心, 2005.

[2] 潘家英, 等. 大跨径独塔斜拉桥全桥空间模型试验与分析[J] . 土木工程学报, 1998, 31 (5): 3- 14

[3] 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.

[4] 马俊. 昆明东风路立交桥动载试验分析 [J] . 公路交通科技, 2004, 21 (3): 48- 50, 55

[5] 贾艳敏, 杨艳敏. 齐齐哈尔嫩江公路大桥动载试验研究 [J] . 公路交通科技, 2000, 17 (增刊): 58- 63.

[6] 刘博, 盛兴旺. 预应力混凝土先简支后连续梁静、动力试验研究 [J] . 公路交通科技, 2005, 22 (8): 55- 60.

[7] 林元培. 斜拉桥 [M] . 北京: 人民交通出版社, 1994.

[8] 王乐文, 等. 大跨度斜拉桥的动力分析模型 [R] . 广州: 华南理工大学, 1999.

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

(上接第 64 页)

[6] 万臻. 现代斜拉桥各种截面形式的剪力滞效应研究 [D] . 成都: 西南交通大学, 2002

[7] 周胜利, 译. 吕和平, 黎祖华, 校. 预应力混凝土斜拉桥上部结构设计规范 (日本) [J] . 桥梁与基础, 1982, 16 (99): 40- 46.

[8] 洪国治. 预应力混凝土桁架桥面的剪力滞分析 [J] . 重庆交通学报学院, 1987, 22 (3): 42- 50.

[9] 万臻, 李乔, 毛学明. Π型截面主梁斜拉桥剪力滞效应试验研究 [J] . 西南交通大学学报, 2004, 39 (5): 623- 627.