

大跨度独塔斜拉桥荷载试验与结构性能分析

李 森, 石雪飞, 苏祥亚, 张 昕

(同济大学 桥梁工程系, 上海 200092)

摘要: 介绍泰州某独塔斜拉桥成桥荷载试验的主要内容和方法, 并结合有限元数值计算, 对该桥梁结构的实测应力、挠度及振动特性进行对比分析。试验结果表明: 该桥理论分析和设计计算方法可靠, 桥梁刚度和承载能力满足设计要求。研究结果可为同类型桥梁的设计和成桥试验提供参考。

关键词: 斜拉桥; 恒载索力; 静动载试验; 结构性能

中图分类号: U448.27; U446.1 文献标识码: A 文章编号: 2095-0373(2012)04-0034-05

1 概述

泰州市某独塔混凝土斜拉桥(图1)为一座独塔单索面混凝土斜拉桥, 结构采用塔、墩、梁固结体系。主桥全长345 m, 边跨设有辅助墩, 跨径布置为(43+117+185) m。主梁横断面采用单箱五室斜腹板截面, 梁高3.9 m, 顶板宽35.5 m, 底板宽12 m, 两侧悬臂长3.75 m, 顶面设2%双向横坡。箱梁标准节段长度按索距划分为7 m, 每3.5 m设一道横梁。索塔为独柱式变截面钢筋混凝土结构, 上塔柱采用单箱单室箱形截面, 下塔柱采用单箱双室箱形截面。斜拉索采用直径15.2 mm 高强低松弛镀锌钢绞线, 抗拉强度 $\geq 1\ 860$ MPa, 全桥共48对96根索。

主桥横向布置为0.5+14.5(机)+5.5(中央分隔带)+14.5(机)+0.5 m。该桥设计行车速度为80 km/h, 设计荷载为公路-I级, 双向6车道。

通车前对该桥进行了成桥静、动载试验, 以检验施工质量、掌握桥梁结构在试验荷载作用下的实际工作状态, 从而判断桥梁结构的安全承载能力及评价桥梁的营运质量^[1]。

2 恒载下索力测试

斜拉索是斜拉桥的主要受力构件之一。恒载作用下斜拉桥拉索的索力状态, 决定了斜拉桥主梁和索塔的恒载内力状态。因此, 斜拉桥竣工以后斜拉索的实际索力状态与设计状态的符合程度是衡量结构内力状态是否符合设计要求和施工水平的一个重要指标, 且一定程度上反映了桥梁的建设水平。

2.1 测试方法

根据在一定条件下斜拉索索力与其振动频率存在对应的关系, 试验中采用振动频率法测试斜拉索索力。利用VS-99型加速度计, VA-99型测振放大器及AZ-108型动态信号采集系统测试斜拉索的横向振动频率, 从而用索力计算公式求出索力大小。

根据弦振动理论推出的工程中常用的斜拉索索力计算公式^[1]为

$$T = 4mf_n^2 L^2 / n^2 \quad (1)$$

式中, f_n 为斜拉索第 n 阶振动频率; n 为振动阶数; L 为斜拉索的计算长度; m 为斜拉索单位长度质量。

2.2 测试结果及分析

测试结果仅以主跨侧 C8~C15 为例, 见表1(斜拉索编号见图1)。测试结果表明, 在恒载作用下全桥

收稿日期: 2012-08-18

作者简介: 李森 男 1988年出生 硕士研究生

斜拉索的实测索力与设计索力的相对差值均在 5% 以内,安全系数在 2.66 ~ 3.29 之间,均大于 2.5^[2]。说明恒载下索力与设计索力符合较好,全桥处于一个很好的内力状态下。

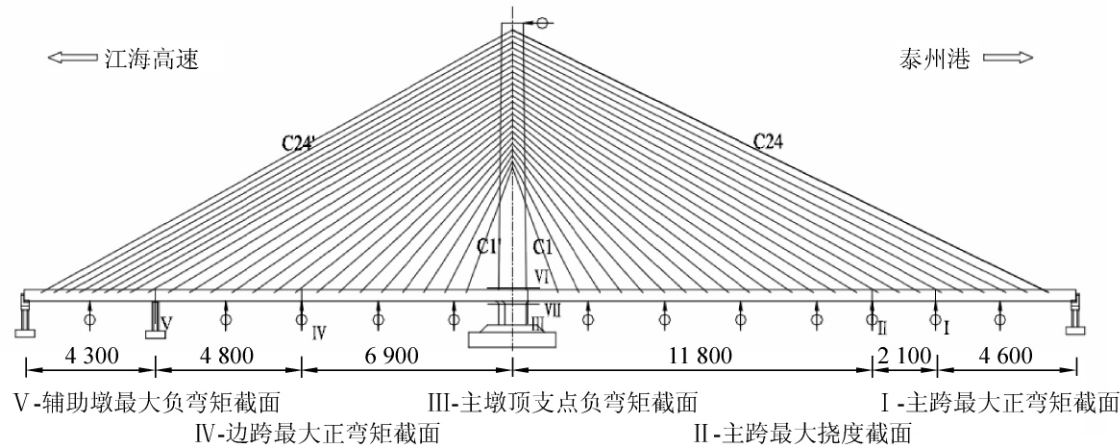


图 1 某斜拉桥总体布置图(单位: cm)

表 1 部分恒载下斜拉索索力实测与设计对比

索号	设计①/ kN	极限②/ kN	上游③/ kN	百分比 (③/① - 1) / %	安全系数 ②/③	下游④/ kN	百分比 (④/① - 1) / %	安全系数 ②/④
C8	4 675	13 185.5	4 504.1	-3.70	2.93	4 615.3	-1.30	2.86
C9	4 900	14 219.7	4 679.1	-4.50	3.04	4 854	-0.90	2.93
C10	5 100	14 219.7	4 973.3	-2.50	2.86	5 073.1	-0.50	2.8
C11	5 000	14 219.7	4 858.9	-2.80	2.93	5 112.4	2.20	2.78
C12	5 100	15 770.9	5 089.8	-0.20	3.1	5 031.6	-1.30	3.13
C13	5 300	15 770.9	5 132.8	-3.20	3.07	5 294.5	-0.10	2.98
C14	5 500	15 770.9	5 385.8	-2.10	2.93	5 485.8	-0.30	2.87
C15	5 650	17 063.6	5 400.7	-4.40	3.16	5 681.7	0.60	3

3 静载试验

3.1 加载方案

试验加载方式的确定主要根据设计荷载在主梁上产生的最不利弯矩效应值计算而得。针对独塔单索面斜拉桥的结构受力特点,选取关键截面,见图 1。

静载试验在各个工况下的加载车辆数及具体的加载位置是利用各控制截面的活载影响线计算确定。试验效率控制在 0.85 ~ 1.05 之间^[3]。经等效计算后,确定试验共需采用 300 kN 重车 24 辆,前轴重 60 kN,中轴及后轴重各 120 kN。试验加载工况和具体内容见表 2。

表 2 静载试验工况

工况	试验内容	试验车/辆	荷载效率	工况	试验内容	试验车/辆	荷载效率
1	主跨最大正弯矩(对称)	16	0.98	5	边跨最大正弯矩(偏心)	14	0.98
2	主跨最大正弯矩(偏心)	16	0.99	6	辅助墩最大负弯矩(对称)	16	0.92
3	主墩顶支点负弯矩(对称)	20	0.96	7	主跨最大挠度(对称)	24	1
4	边跨最大正弯矩(对称)	14	0.96	8	主跨最大挠度(偏心)	24	0.95

3.2 试验测试方法及测点布置

静载试验工况下主要测试各控制截面应力、全桥挠度、斜拉索索力增量和索塔塔顶变位。

(1) 应力观测。主桥纵桥向和索塔测试截面见图 1。为测得各控制截面的应力,在主梁底板、腹板和顶板处以及索塔纵桥向表面粘贴电阻式应变片,利用静态应变数据采集仪进行数据采集。测点布置见图 2。

(2) 挠度观测。静载试验过程中,挠度测点布置在箱梁顶面两侧,每侧布设 12 个点,以及索塔塔顶截面 2 个点,共计 26 个测点,见图 1。利用两台全站仪在主桥上下游距主桥 100 m 左右处分别进行观测。

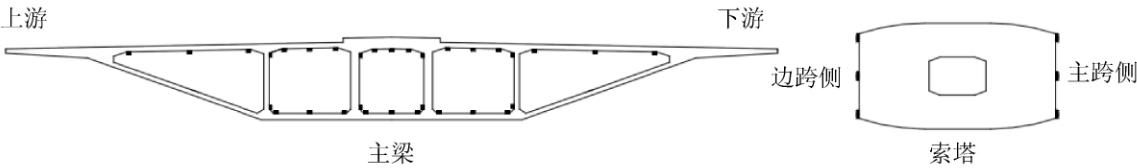


图 2 应变片测点布置图

全站仪的测距标准差为 $1\text{ mm} + 2 \times 10^{-6}$ 、测角标准差 $\pm 2''$ 。

(3) 斜拉索测试。由于现场工作条件的限制,仅选取 C19'~C20'(下游)和 C13~C15(下游)共 5 根斜拉索测试试验工况下的索力增量。

3.3 试验结果分析

(1) 主梁挠度分析。在试验工况作用下,主梁挠度可以直观地反映出结构受力情况,测试结果见表 3。在各工况作用下,结构的挠度校验系数介于 0.59~0.98 之间,均小于 1.0,基本在合理范围之内,说明在试验荷载下结构处于弹性工作状态,也说明结构实际刚度大于理论计算刚度。在试验荷载下,主梁几何变形曲线平滑连续,且与计算值吻合较好,说明主梁具有良好的整体刚度,受力状况合理,符合设计要求。图 3 是工况 1 作用下主梁挠度。

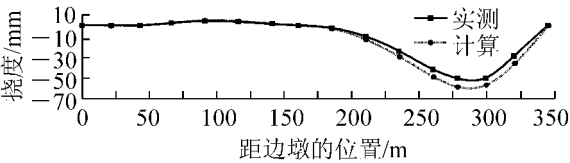


图 3 工况 1 作用下主梁挠度

表 3 主梁挠度实测与计算对比

工况	位置	实测/mm	计算/mm	校验系数	工况	位置	实测/mm	计算/mm	校验系数
1	上游	-50	-58.3	0.86	5	上游	-17.9	-20.4	0.88
1	下游	-51.1	-58.3	0.88	5	下游	-13.6	-15.3	0.89
2	上游	-53.4	-70.4	0.76	6	上游	-12.4	-13.9	0.89
2	下游	-49.7	-54.8	0.91	6	下游	-12.8	-13.9	0.92
3	上游	-19.1	-21.8	0.88	7	上游	-65.2	-73.5	0.89
3	下游	—	-21.8	—	7	下游	-64.7	-73.5	0.88
4	上游	-15.9	-16.3	0.98	8	上游	-67.1	-91.8	0.73
4	下游	-15.7	-16.3	0.96	8	下游	-62.8	-75	0.84

(2) 索塔塔顶变位分析。在试验工况作用下,索塔塔顶变位实测与计算对比见表 4。在各工况下,索塔塔顶变位的校验系数在 0.50~0.97 之间,索塔塔顶变位实测与计算吻合较好,说明主塔具有较好的整体刚度。

表 4 索塔塔顶变位实测与计算对比

工况	实测/mm	计算/mm	校验系数	工况	实测/mm	计算/mm	校验系数
1	-13.6	-15.6	0.87	5	1.9	2	0.95
2	-14.1	-16.4	0.86	6	1.2	2.4	0.50
3	-5.9	-6.1	0.97	7	-18.3	-20.6	0.89
4	2.6	2.9	0.90	8	-18.5	-20.2	0.92

(3) 主梁和索塔应力分析。表 5 是工况 4 作用下实测应力与计算应力的对比。工况 4 作用下,主梁应力的校验系数在 0.69~0.85 之间,索塔应力的校验系数在 0.32~1.00 之间,实测应力结果偏小。其余工况作用下,应力实测结果与理论计算的变化规律基本一致,但实测应力数据较之理论计算数据偏小,其校验系数在 0.28~1.03 之间,大部分小于 1,说明结构实际刚度较理论计算刚度大。其中部分应力测点因设备精度问题实测值偏小,但这类误差并不会影响整体试验数据的有效性。

(4) 斜拉索索力增量分析。在试验工况作用下,实测索力增量校验系数介于 0.53~1.18 之间,通常在荷载产生索力增量较小的情况下,索力值测试的误差相对较大,但本桥测的测索力与设计索力的相对差值均在 5 t 以内,两者吻合的较好。在试验工况作用下,斜拉索的安全系数均大于 2.5,满足规范要求。图 4 是在工况 8 作用下索力增量(下游)实测与理论值对比直方图。

表 5 工况 4 应力实测与计算对比

位置	实测 /MPa	计算 /MPa	校验系数
Ⅳ截面顶板	-0.74	-1.05	0.70
Ⅳ截面底板	1.35	1.59	0.85
Ⅳ截面腹板上部	-0.62	-0.85	0.73
Ⅳ截面腹板下部	1.21	1.76	0.69
Ⅶ截面主跨侧	0.49	0.78	0.63
Ⅶ截面边跨侧	-0.33	-0.63	0.53
Ⅷ截面主跨侧	0.35	1.08	0.32
Ⅷ截面边跨侧	-0.86	-0.86	1.00

(5) 相对残余变位。相对残余变位是检验结构弹性恢复能力的一个重要指标。本桥主要挠度测点相对残余变位在 0~3.8% 之间,均符合相对残余变位容许值不大于 20% 的规定。说明该桥具备良好的弹性恢复能力。

4 动载试验

4.1 自振特性测试

桥梁自振特性的测量采用环境随机振动法。用环境随机振动法测量桥梁的自振特性,具有不需要对桥梁进行专门激励的优点,只要有高灵敏度的测量仪器和高分辨率的谱分析设备就能测出结构的自振特性。在沿主梁纵桥向选取 13 个竖向振动测试断面,每个断面上下游各布置 1 个竖向测点,拾取主梁竖向加速度信号。从实测结果来看,主梁实测频率与理论计算频率相对比较吻合、振型一致,说明理论计算比较准确和主桥动力性能良好。自振特性曲线见图 5,实测结果见表 6。

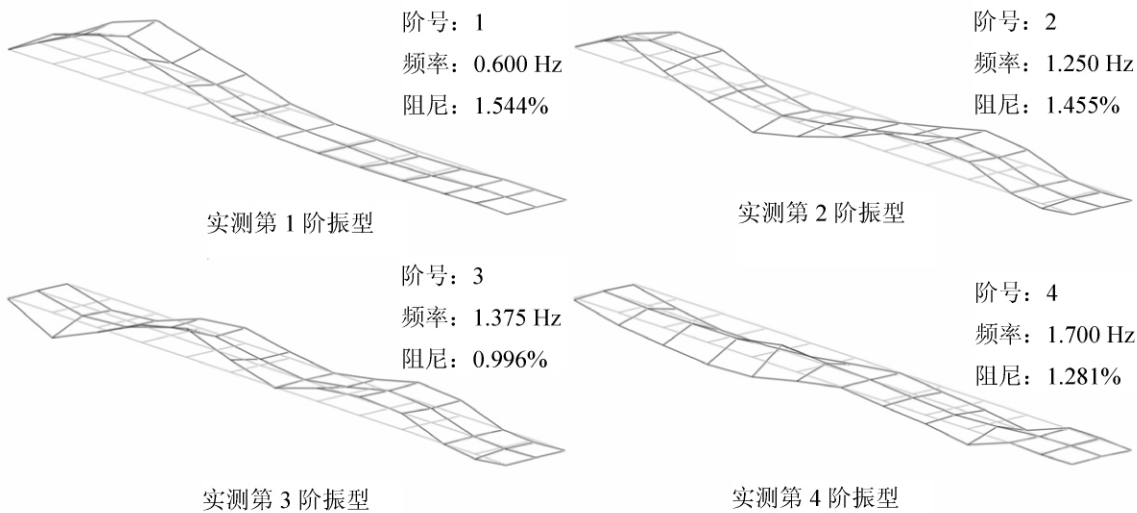


图 5 结构自振特性实测曲线

表 6 结构自振特性实测与计算对比

阶号	振型描述	计算频率 /Hz	实测频率 /Hz	实测阻尼比 /%
1	主跨为半个正弦波的对称弯曲	0.559	0.600	1.544
2	主跨为一个正弦波的反对称弯曲、其它跨为与主跨同相位的半正弦波	1.317	1.250	1.455
3	主跨为一个正弦波的反对称弯曲、其它跨为与主跨反相位的半正弦波	1.436	1.375	0.996
4	每跨均为半正弦波、伴随横向弯曲	1.826	1.700	1.281

4.2 动载试验及分析

桥梁结构在移动车辆荷载作用下产生振动、冲击等动力反应。跑车试验是一辆 30 t 重车以 10、20、30、40、50 km/h 的车速驶过桥面,测试主梁 I、Ⅳ截面的动态应变;刹车试验是一辆 30 t 重车以 20 km/h

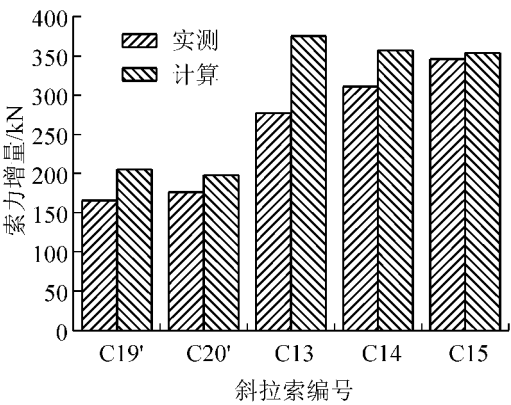


图 4 工况 8 作用下索力增量实测与计算对比

车速行驶,在主梁 I、IV 截面进行刹车,测试相应截面的动态应变;跳车试验是一辆 30 t 重车以 10、20 km/h 车速驶过设有障碍物的 I、IV 截面,测试相应截面的动态应变。

在跑车试验中,I 截面的实测动态增量在 0.01~0.19 之间,最大值出现在时速为 40 km/h 时,其值为 0.19;IV 截面的实测动态增量在 0.02~0.17 之间,最大值出现在时速为 30 km/h 时,其值为 0.17。说明在跑车试验时,对主梁的冲击作用很小。

在刹车试验中,I 截面的实测动态增量在 0.03~0.24 之间,最大值为 0.24;IV 截面的实测动态增量在 0.02~0.21 之间,最大值为 0.21。说明刹车对主梁造成的冲击作用比跑车明显。

在跳车试验中,I 截面的实测动态增量在 0.07~0.50 之间,最大值出现在时速为 10 km/h 时,其值为 0.50;IV 截面的实测动态增量在 0.08~0.36 之间,最大值出现在时速为 10 km/h 时,其值为 0.36。说明在有障碍或桥面不平情况下行车时,对主梁的冲击作用将明显增强。

5 结论

(1) 恒载下全桥斜拉索的实测索力与设计索力的相对差值均在 5% 以内,表明成桥时全桥处于比较理想的内力状态。

(2) 在静载试验时,实测主梁几何变形曲线和挠度、塔顶变位、应力以及索力增量均与理论计算值比较接近,且主梁残余变位在 0~3.8% 之间。说明结构在静力荷载下处于弹性受力状态,主梁、索塔刚度性能良好,受力合理。

(3) 用环境随机振动法测得该桥自振频率和振型与理论计算值相比,有较好的吻合,说明结构整体刚度与设计值相一致。

(4) 动载试验结果表明:在有障碍行车时对桥跨的冲击作用比较明显,建议尽量保持桥面平整避免因冲击产生不利影响。

(5) 该斜拉桥在相当于设计规定的车辆荷载等级(公路-I 级)的试验荷载作用下,主桥结构的静力和动力性能良好,承载能力满足设计要求。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 重庆交通科研设计院. JTG/T D65-01—2007 公路斜拉桥设计细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [3] 施洲. 大跨度独塔斜拉桥静动载试验研究[J]. 铁道建筑技术, 2005(1): 16-19.

Structure Behavior Analysis and Loading Test of Long-span Single-pylon Cable-stayed Bridge

Li Sen, Shi Xuefei, Su Xiangya, Zhang Xin

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The principal contents and methods of load tests for Taizhou Single-pylon Cable-stayed Bridge at completion stage are presented. In compliance with the finite element numerical calculation concerned, the stress, deflection and vibration behavior of the bridge structure measured in the tests are compared and analyzed. The results of the tests show that the theoretic analysis, design and calculation methods for the bridge are reliable, and both the structural rigidity and carrying capacity thereof can satisfy the design requirements. The results of the study may provide reference for the design and for tests at completion stage of similar bridges.

Key words: cable-stayed bridge; dead load cable forces; static and dynamic load tests; structure behavior

(责任编辑 车轩玉)