

独塔双跨式斜拉桥荷载试验综述

高 侃

同纳检测认证集团有限公司 上海 200331

【摘 要】：斜拉桥造型美观，整体跨度大，能很好地跨越较宽的障碍物。在斜拉桥运营过程中，为保证结构的安全及受力的稳定，进行了桥梁荷载试验。通过试验结果分析了桥梁的整体强度、刚度、动力特性等是否满足相关规范要求，从而判断出目前桥梁的受力状态是否正常，为以后桥梁的检测及养护提供了参考依据。

【关键词】：斜拉桥；静载试验；动载试验

A Review of Load Tests of Single-Tower Double-Span Cable-Stayed Bridges

Kan Gao

Tongna Testing and Certification Group Co., Ltd. Shanghai 200331

Abstract: The cable-stayed bridge has beautiful shape and large overall span, which can cross wide obstacles very well. In the operation of the cable-stayed bridge, in order to ensure the safety of the structure and the stability of the force, the bridge load test was carried out. Through the test results, the overall strength, stiffness, dynamic characteristics, etc. of the bridge meet the requirements of the relevant specifications, so as to determine whether the current stress state of the bridge is normal, which provides a reference for the detection and maintenance of the bridge in the future.

Keywords: Cable-stayed bridge; Static load test; Dynamic load test

引言

斜拉桥是高次内部超静定结构，可以通过斜拉索的张拉来调整主梁和主塔的恒载受力状态，使内力分布均匀合理。斜拉桥的主梁恒载及作用在主梁上的活载通过斜拉索传至塔柱，再通过塔柱基础传至地基，就像一根多点弹性支撑的连续梁一样工作，减小了梁体的截面尺寸，从而减轻了结构的自重，节省了材料。桥梁荷载试验分为静载试验与动载试验。静载试验是在试验荷载作用下测试桥梁控制截面的应变、位移、裂缝，并结合规范要求判断出目前该桥的承载能力。动载试验是通过测试桥梁的动态响应，分析桥梁的动应变、动位移及模态参数，从而评定桥梁的承载能力。

1 工程概况

某桥主桥为塔、梁、墩固结的独塔双跨式双柱双索面斜拉桥，引桥为预应力混凝土连续箱梁桥，跨径组合为 2×66.50 （主桥）+ 3×24.00 （引桥）。桥面横向布置：0.25m（栏杆）+ 2.00m（人行道）+ 3.00m（非机动车道）+ 1.90m（拉索区）+ 7.80m（机动车道）+ 0.60m（中央分隔带）+ 7.80m（机动车道）+ 1.90m（拉索区）+ 3.00m（非机动车道）+ 2.00m（人行道）+ 0.25m（栏杆）= 30.50m。该主桥主塔柱与基础固结，主梁与主塔及交会处箱形横梁整体浇筑；主塔为柱式钢筋混凝土结构，塔柱截面分三种形式：主梁以下塔柱截面为带倒圆的六边形，斜拉索锚固区为 H 形截面，其余截面为矩形截面；斜拉索采用平行钢丝束拉索体系，钢丝护套为双层热挤压 PE 层，斜拉索总体布置呈扇形双索面形式，其中一跨斜拉索每个索面由两根斜拉索组成，另一跨斜拉索每个索面由单根斜拉索组成，该形式的

布置反映在塔柱上为对称交叉锚固；主梁采用预应力混凝土边主梁结构，边主梁梁高 1.60m，横梁间距除梁端和主塔处均为 3.20m。该桥设计荷载为公路-I 级，塔梁混凝土均采用 50 号混凝土。

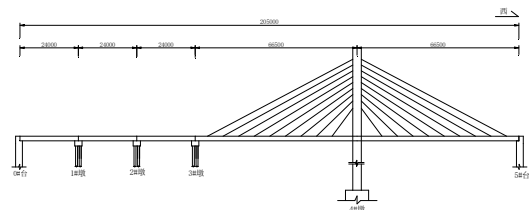


图1 桥跨布置图（单位：mm）

2 静载试验

2.1 试验工况

本次对该桥主桥段进行荷载试验，根据《公路桥梁荷载试验规程》（JTG/T J21-01-2015），此次主桥段静载试验工况为：①5#孔主梁最大正弯矩工况；②5#孔主梁墩顶最大负弯矩工况；③塔梁固结段最大负弯矩工况；④主塔塔顶最大变位工况；⑤斜拉索最大索拉力工况。

2.2 测试内容

静载试验内容包括现场参数测试及结果分析，主要为：①应力与挠度测试；②斜拉索索力增量测试；③结构校验系数检验；④相对残余变形检验；⑤主梁纵向挠度曲线检验；⑥裂缝检验。

2.3 试验截面与测点布置

本次试验选取 J1 断面（5#孔主梁最大正弯矩工况）、J2 断面（5#孔主梁墩顶最大负弯矩工况）、J3 断面（塔梁固结段最大负弯矩工况）、J4 断面（主塔塔顶最大变位工况）和 J5 断面（斜拉索索力增量工况）共五个控制断面，如图 2 所示。应变测点布置在控制断面主梁底面和主塔侧面，如图 3 所示。挠度测点布置在主梁底面和塔顶，如图 4 所示。

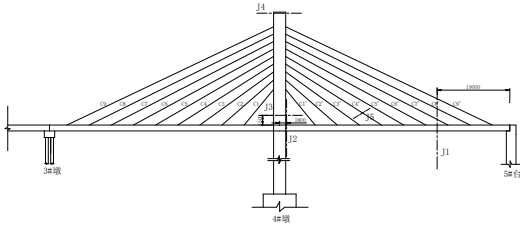


图 2 测试断面 (单位: mm)

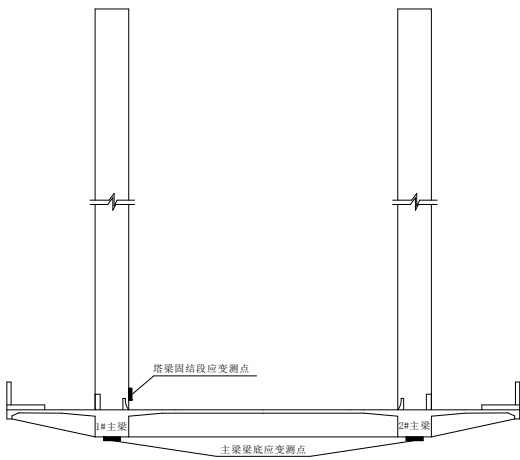


图 3 应变测点布置

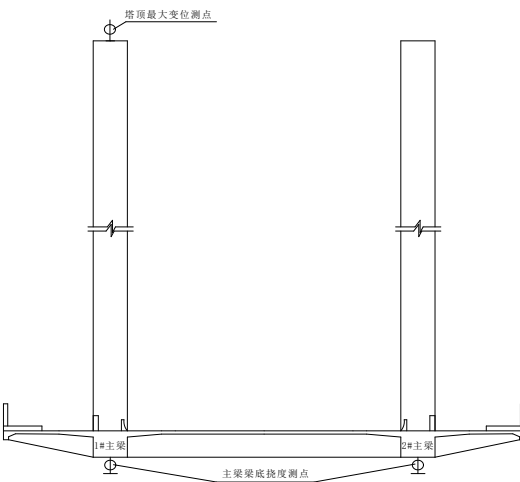


图 4 挠度测点布置

2.4 试验方法和检测内容

《公路桥梁承载能力检测评定规程》（JTG/T J21-2011）及《公路桥梁荷载试验规程》（JTG/T J21-01-2015）的规定，

将设计荷载对控制断面产生的最不利内力作为控制断面的设计控制效应。为了保证试验效果，以试验荷载产生的荷载效应与设计控制效应作比较，并采用静载试验效率进行控制。经计算，本次试验的加载车共采用 8 辆 360kN 的三轴重车。

3 静载试验结果与分析

3.1 结构校验系数

为检验与正常使用荷载等效的试验荷载作用下主要测点的效应实测值与相应的计算值的差异，一般采用主要测点效应校验系数 ζ 进行检验，控制测点效应校验系数 ζ 是评定结构工作状态，确定桥梁承载能力的一个重要指标，一般要求效应校验系数 ζ 不大于 1.0。

表 1 主梁应变校验系数结果

工况类别	主梁编号	实测值 ($\mu\epsilon$)	理论值 ($\mu\epsilon$)	校验系数
J1 断面偏载工况	1#梁	130	170	0.76
	2#梁	81	100	0.81
J2 断面偏载工况	1#梁	-93	-128	0.73
	2#梁	-40	-51	0.78

注：表中“+”为拉应变，“-”为压应变。

表 2 主梁挠度校验系数结果

工况分类	主梁编号	实测值 (mm)	理论值 (mm)	校验系数
J1 断面偏载工况	1#梁	25.4	47.4	0.53
	2#梁	13.9	26.3	0.53

通过上述表格可以看出，在偏载工况下主梁应变校验系数与挠度校验系数均小于 1.0，说明主梁结构具有足够的整体刚度与强度，且满足规范要求。

表 3 主塔应变（变位）校验系数结果

工况分类	构件编号	实测值 ($\mu\epsilon$)	理论值 ($\mu\epsilon$)	校验系数
J3 断面偏载工况	主塔（小桩号方向）	-24	-41	0.59
	主塔（大桩号方向）	16	31	0.52
工况分类	构件编号	实测值 (mm)	理论值 (mm)	校验系数
J4 断面偏载工况	主塔	11.4	18.9	0.60

通过上述表格可以看出，在偏载工况下主塔应变校验系数与挠度校验系数均小于 1.0，说明主塔结构具有足够的强度且纵桥向变形较好，并满足规范要求。

表4 斜拉索索力增量校验系数结果

工况分类	斜拉索编号	实测值 (kN)	理论值 (kN)	校验系数
J5 断面偏载 工况	C4'	175	181	0.97

通过上述表格可以看出,在偏载工况下斜拉索索力增量校验系数小于1.0,说明桥梁体系受力合理且满足规范要求。

3.2 残余变形

根据本次试验测试结果,分析控制断面的主要应变测点在各自最不利加载工况下的相对残余应变及位移测点在各自最不利加载工况下的相对残余变位。

表5 主梁残余应变结果

工况类别	主梁编号	残余应变 ($\mu\epsilon$)	总应变 ($\mu\epsilon$)	相对残余应变
J1 断面偏载工况	1#梁	1	131	0.8%
	2#梁	2	83	2.4%
J2 断面偏载工况	1#梁	0	-93	0.0%
	2#梁	0	-60	0.0%

表6 主梁残余变位结果

工况类别	主梁编号	残余变位 (mm)	总变位 (mm)	相对残余变位
J1 断面偏载工况	1#梁	0.8	27.9	2.9%
	2#梁	0.4	15.6	2.6%

表7 主塔残余应变(变位)结果

工况分类	构件编号	残余应变 ($\mu\epsilon$)	总应变 ($\mu\epsilon$)	相对残余应变
J3 断面偏载工况	主塔(小桩号方向)	-1	-25	4.0%
	主塔(大桩号方向)	1	17	5.9%
工况分类	构件编号	残余变位 (mm)	总变位 (mm)	相对残余变位
J4 断面偏载工况	主塔	0.7	12.1	5.6%

通过上述表格可以看出,在偏载工况下,主梁的相对残余应变(相对残余变位)及主塔的相对残余应变(相对残余变位)均小于20%,满足规范要求,表明该桥在试验荷载作用下,具有良好的弹性恢复能力。

3.3 主梁纵向挠度曲线

根据该桥各挠度测试断面,可绘制出试验加载工况下的实测纵向挠度曲线与理论纵向挠度曲线对比图,如图5所示。结果表明实测曲线数据结果均小于理论计算结果,且曲线平缓,表明桥梁实际工作状态下的刚度性能要好于理论结果。

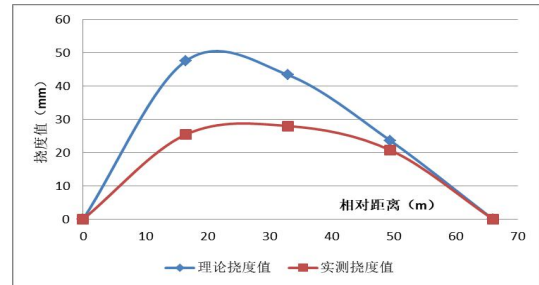


图5 主梁纵向挠度曲线

3.4 裂缝检测

试验前检查未发现混凝土梁体出现受力裂缝,在试验过程中,梁底应变数据未产生突然增大或突然减小的裂缝信号,测试过程中和结束后亦未在梁体发现裂缝。

4 动载试验

桥梁结构在移动车辆荷载作用下的动力反应,是桥梁和车辆这两个振动系统互相作用的结果,除了这两者本身的动力特性(质量、刚度、阻尼)外,还与桥面的平整度、车辆行驶的速度有关。桥梁动载试验能反映桥梁在动载、风荷载、地震荷载作用下的动力性能。本次动载试验主要测试桥梁的振型、频率、阻尼比及冲击系数。

4.1 自振特性

在桥面无任何交通荷载以及桥梁附近无规则振源的情况下,通过高灵敏度动力测试系统测定桥址处风荷载、地脉动、水流等随机荷载激振而引起桥跨结构的微幅振动响应,将各测量点的加速度信号记录下来。测得结构的振型、自振频率和阻尼比等动力学特征。

测点布置:纵桥向测点布置在各跨八分点位置,横向在桥面行车道两侧布置。

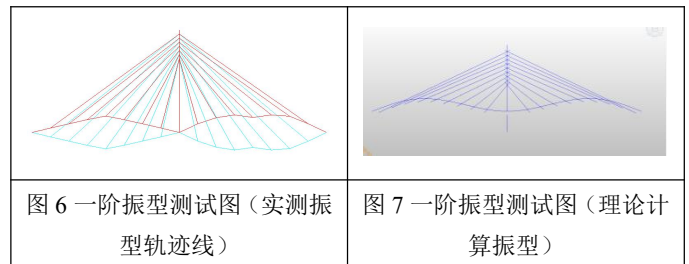


图6 一阶振型测试图(实测振型轨迹线)

图7 一阶振型测试图(理论计算振型)

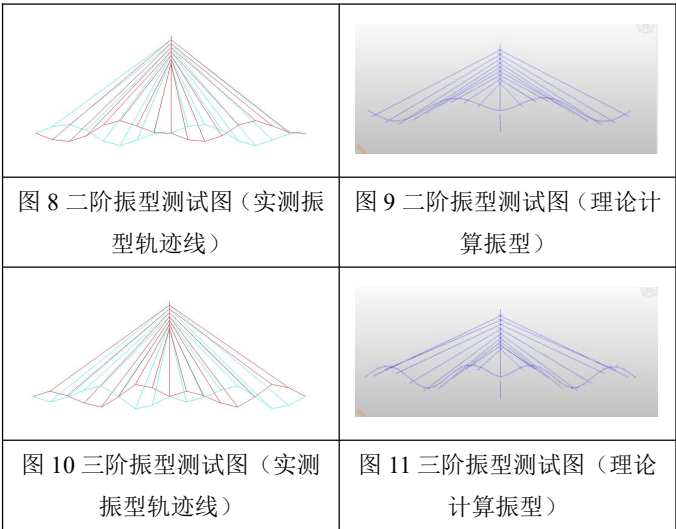


表 8 自振特性实测值与理论值比较

振动方向	实测频率阶数编号	自振频率		阻尼比	fmi/fdi	评定标度
		实测值 fmi	理论计算频率值 fdi			
竖向	1	1.546	1.221	2.021	1.27	1
	2	3.498	2.563	1.607	1.36	1
	3	6.673	4.785	1.143	1.39	1

通过上述表格可以看出，该桥实测固有频率 fmi 与理论计算频率 fdi 的比值均大于 1.0 且评定标度均为 1，说明该桥的整体刚度较好。

4.2 跑车试验

由一辆重车分别以 20km/h、30km/h、40km/h、50km/h 的速度行驶过该桥梁，每次记录测试断面处测点的动应变，利用

时程曲线的振动波形来计算冲击系数。

表 9 不同车速下的实测冲击系数

车速	测试类别	测点位置	Smax	Smean	实测冲击系数
20km/h	动应变 (με)	1#梁	34	34	0.011
		2#梁	33	32	0.012
30km/h	动应变 (με)	1#梁	35	33	0.056
		2#梁	34	31	0.084
40km/h	动应变 (με)	1#梁	32	31	0.035
		2#梁	31	30	0.054
50km/h	动应变 (με)	1#梁	33	31	0.070
		2#梁	32	30	0.065

通过上述表格可以看出，在 20km/h~50km/h 车速下，主梁的冲击系数介于 0.011~0.084 之间，冲击系数均小于《公路桥涵设计通用规范》（JTG D60-2004）所计算的理论冲击系数。

5 结论

通过本次试验得出以下结论：（1）该桥各工况下的结构校验系数均小于 1.0，表明该桥具有足够的整体刚度与强度。（2）该桥各工况下的残余应变（残余变位）均小于 20%，表明该桥具有良好的弹性恢复能力。（3）纵向挠度曲线分析结果表明桥梁实际工作状态下的刚度性能要好于理论结果。（4）在试验过程中，主梁未发现受力裂缝。由此可知，在试验荷载作用下，该桥各项指标均满足相关规范要求，能按设计正常使用。

参考文献：

[1] 姚玲森.桥梁工程(第二版)[M].北京:人民交通出版社,2008.
[2] JTG D60-2004.公路桥涵设计通用规范[S].
[3] 林元培.斜拉桥[M].北京:人民交通出版社,2004.
[4] 项海帆.高等桥梁结构理论[M].北京:人民交通出版社,2013.
[5] JTG/T J21-01-2015.公路桥梁荷载试验规程[S].
[6] JTG/T J21-2011.公路桥梁承载能力检测评定规程[S].