

某矮塔单索面斜拉桥荷载试验分析

杨茂华, 黎东龙

(佛山市公路桥梁工程监测站有限公司, 广东 佛山 528041)

摘要: 以跨径组合为 $(90.5+150+90.5)$ m 的双塔单索面预应力斜拉桥为工程背景, 采用桥梁博士 3.0、MIDAS/Civil 及 MIDAS/FEA 进行建模计算, 以规范和设计文件为依据, 计算分析控制截面挠度、应力应变、拉索力变量、主塔塔顶位移、结构动力特性等, 并将现场实测值与理论值相比较, 对桥梁结构刚度、主塔抗弯刚度、拉索受力和桥梁动力系数等进行评价, 评定其承载能力是否满足设计荷载等级要求。

关键词: 桥梁; 双塔单索面斜拉桥; 荷载试验; 刚度; 索力; 主塔偏位; 动力特性

中图分类号: U446.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)04-0139-04

广东佛山市禅西大道二期 CS01 标段石湾特大桥的主体结构为双塔单索面, 主塔与主梁固结, 主墩与主塔分离。主桥跨径布置为 $90.5\text{ m}+150\text{ m}+90.5\text{ m}$, 全长 331 m。主梁为三跨变截面连续箱梁, 单箱三室, 梁宽 33.5 m, 梁底按二次抛物线变化, 采用 C60 砼。桥塔共 2 个, 呈上小下大的梯形, 每个桥塔共 12 对拉索, 呈扇形布置。为评定该桥的承载能力, 对其进行静载和动载试验。

1 静载试验

1.1 试验对象及建模分析

根据桥型特点和结构受力特性, 静载试验选取主桥作为试验桥跨, 控制截面取边跨正弯矩(A截面)、主墩顶负弯矩(B截面)、主跨跨中正弯矩(C截面)、主墩主塔根部(D截面)。测试截面见图 1。

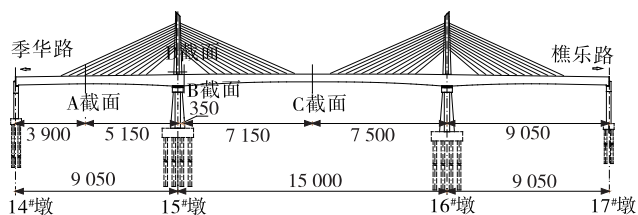


图 1 双塔单索面斜拉桥静载试验控制截面(单位:cm)

采用 MIDAS/Civil 建立该桥杆系结构模型[见图 2(a)], 根据施工图文件和设计规范对模型进行荷载分析, 确定各截面荷载试验工况的控制值, 同时进行车辆荷载模拟加载, 使车辆加载效率满足试验要求。另外, 采用桥梁博士 3.0 及 MIDAS/FEA 进行校核, 计算模型见图 2(b)、(c), 确保建模分析得出的理论数据合理。

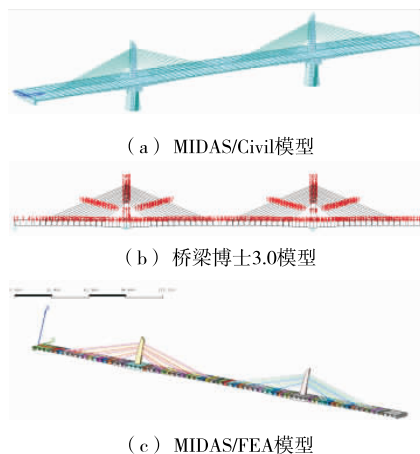


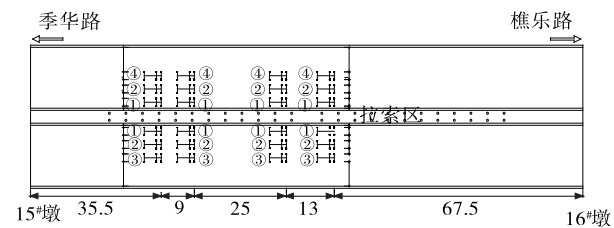
图 2 主桥计算模型

1.2 试验项目及加载方案

根据桥型特点和模型计算结果确定试验荷载工况及测试内容, 限于篇幅, 以中跨最大正弯矩截面(C截面)为研究对象, 加载方式为中载(见表 1)。该桥设计荷载为公路 I 级, 模型计算理论控制弯矩为 $76\,500\text{ kN}\cdot\text{m}$, 在控制截面根据弯矩等效原则采用 24 台 33 t 双后轴车进行加载, 由一级到四级逐级加载(见图 3)。试验弯矩为 $75\,600\text{ kN}\cdot\text{m}$, 加载效率为 0.906, 满足《大跨径混凝土桥梁的试验方法》的要求。

表 1 控制截面试验加载工况及测点

项目	工况及测点
试验加载工况	C 截面(中载)
挠度测点	A1~A13、B2、C2、D2、E2、F1~F13
应变测试截面	C 截面
主塔位移测点	T1、T2
索力测试	S10~S12、R3~R5、W7~W9、V10~V12



①表示加载一级；②表示加载二级；③表示加载三级；④表示加载四级。

图3 主桥中跨最大正弯矩截面(C截面)

加载示意图(单位:m)

1.3 测点布置

按照《大跨径混凝土桥梁的试验方法》的要求，在试验桥跨两侧的支点、1/4L及跨中布置挠度测点，其中测试截面加密布置(见图4)。共布置应变测点15个，其中左右腹板各4个，底板7个(见图5)。每个主塔顶部设棱镜作为主塔位移观测点，用全站仪观测；索力测试采用振动法。塔顶位移及索力测点布置见图6。

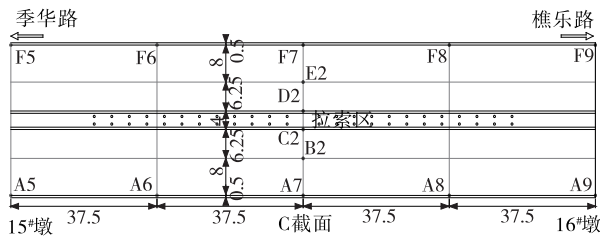


图4 主桥斜拉桥挠度测点布置(单位:m)

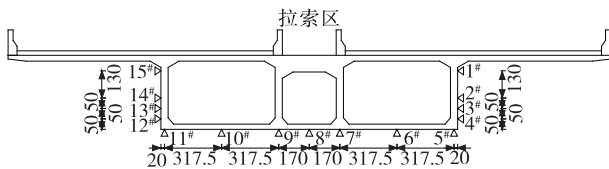


图5 C截面应变测点布置(单位:m)

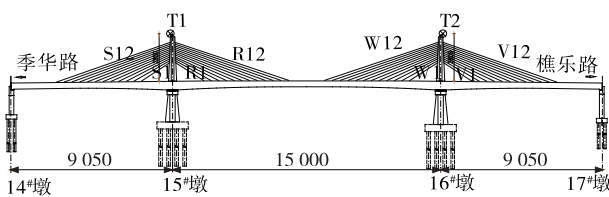


图6 主塔位移及索力测点布置(单位:m)

1.4 试验结果与分析

1.4.1 挠度

与试验桥跨相邻的非试验桥跨的挠度测点只采集初始值、最大级荷载作用下的值及卸载值，保证数据采集的合理性和效率。挠度数据分析见表2。

从表2可以看出：截面控制测点A7的挠度校

表2 试验桥跨的挠度对比分析

测点	实测挠度/mm		弹性挠度/mm	理论挠度/mm	校验系数	残余系数
	最大值	卸载				
A1	0.55	0.69	-0.14	0.00	—	—
A2	13.88	0.66	13.22	18.89	0.700	0.048
A3	23.12	1.00	22.12	31.43	0.704	0.043
A4	20.14	0.47	19.67	28.57	0.688	0.023
A5	0.67	0.31	0.36	0.00	—	—
A6	-39.05	2.49	-41.54	-56.90	0.730	-0.064
A7	-57.26	3.69	-60.95	-83.64	0.729	-0.064
A8	-28.62	2.80	-31.42	-43.21	0.727	-0.098
A9	-0.67	1.30	-1.97	0.00	—	—
A10	11.33	0.68	10.65	16.44	0.648	0.060
A11	14.85	2.49	12.36	19.18	0.644	0.168
A12	7.74	1.29	6.45	10.96	0.589	0.167
A13	-0.52	2.17	-2.69	0.00	—	—
B2	-56.34	3.51	-59.85	-83.64	0.716	-0.062
C2	-55.84	3.63	-59.47	-83.64	0.711	-0.065
F1	1.44	0.67	0.77	0.00	—	—
F2	15.10	0.87	14.23	18.89	0.753	0.058
F3	23.90	1.11	22.79	31.43	0.725	0.046
F4	20.31	1.17	19.14	28.57	0.670	0.058
F5	0.73	1.01	-0.28	0.00	—	—
F6	-40.77	1.16	-41.93	-56.90	0.737	-0.028
F7	-57.42	1.57	-58.99	-83.64	0.705	-0.027
F8	-28.36	0.81	-29.17	-43.21	0.675	-0.029
F9	0.42	-0.08	0.50	0.00	—	—
F10	12.98	-0.32	13.30	16.44	0.809	-0.025
F11	15.22	-0.49	15.71	19.18	0.819	-0.032
F12	9.39	-0.48	9.87	10.96	0.901	-0.051
F13	-0.30	-0.58	0.28	0.00	—	—
E2	-57.32	1.08	-58.40	-83.64	0.698	-0.019
D2	-56.75	1.40	-58.15	-83.64	0.695	-0.025

注：最大值为四级加载实测值，最大值和卸载值为考虑支座压缩进行处理后的值。

验系数为0.729，残余系数为-0.064，均满足《大跨径混凝土桥梁的试验方法》的要求。实测挠跨比为 $0.060\ 95/150=4.06\times 10^{-4}$ ，远小于设计规范允许的 $1/500=2.00\times 10^{-3}$ ，结构刚度满足规范要求。实测挠度与理论挠度对比见图7。

1.4.2 应变

试验跨应变数据对比分析见表3，其中理论应变为MIDAS/FEA 3.0计算结果。

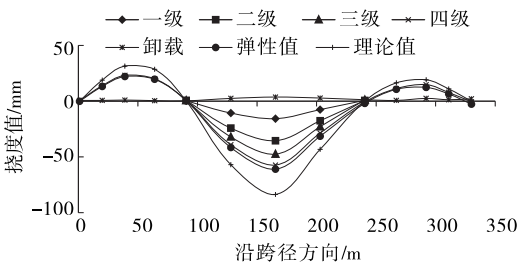


图 7 不同荷载下挠度实测值与理论值对比

表 3 试验桥跨的应变对比分析

测点	实测应变/ $\mu\epsilon$		弹性应变/ $\mu\epsilon$	理论应变/ $\mu\epsilon$	校验系数	残余系数
	最大级荷载	卸载				
1	-8.2	1.9	-10.1	-34.1	0.296	-0.232
2	49.0	0.8	48.2	40.9	1.178	0.016
3	78.4	0.7	77.7	69.7	1.115	0.009
4	106.8	3.8	103.0	98.6	1.045	0.036
5	120.5	0.5	120.0	127.4	0.942	0.004
6	86.1	-0.6	86.7	127.4	0.681	-0.007
7	91.6	0.3	91.3	127.4	0.717	0.003
8	80.0	1.5	78.5	127.4	0.616	0.019
9	91.2	0.2	91.0	127.4	0.714	0.002
10	72.1	1.3	70.8	127.4	0.556	0.018
11	74.6	1.5	73.1	127.4	0.574	0.020
12	60.0	1.1	58.9	98.6	0.597	0.018
13	50.9	1.3	49.6	69.7	0.712	0.026
14	39.2	0.2	39.0	40.9	0.954	0.005
15	-8.9	0.7	-9.6	-34.1	0.282	-0.079

由表 3 可知:截面控制测点 5# 的试验校验系数为 0.942,残余系数为 0.004,均满足《大跨径混凝土桥梁的试验方法》的要求。试验截面的应变实测值小于理论计算值,实测各级弹性应变与理论计算应变对比见图 8。

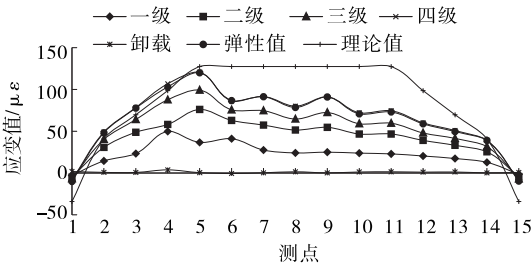


图 8 各级荷载作用下实测弹性应变与理论计算应变对比

对左右腹板的应变测点进行平截面假定分析,结果见图 9。拟合中性轴高度为 257.64 cm,理论值为 220.89 cm,相差 16.6%,原因可能为桥面铺装及防撞墙等参与了结构受力。

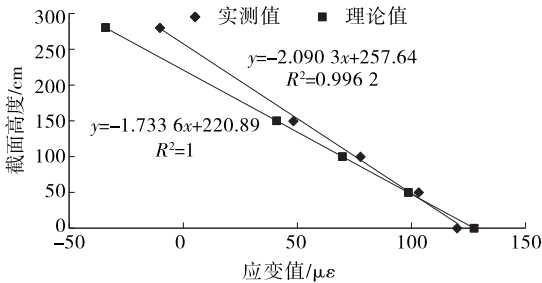


图 9 最大级荷载作用下载面左右腹板测点沿截面高度的弹性应变分布

1.4.3 索力

采用振动法对最大级荷载作用下受试验加载影响较大的拉索索力进行测试,结果见表 4。

表 4 最大级荷载作用下拉索实测索力与理论计算索力

拉索编号	拉索位置	实测索力/kN		弹性索力/kN	理论索力/kN	校验系数	残余系数
		最大级荷载	卸载				
S12	左	285	22	263	309	0.851	0.077
	右	278	18	260	309	0.841	0.065
S11	左	266	25	241	285	0.846	0.094
	右	256	30	226	285	0.793	0.117
S10	左	242	10	232	261	0.889	0.041
	右	231	16	215	261	0.824	0.069
R3	左	165	10	155	180	0.861	0.061
	右	155	15	140	180	0.778	0.097
R4	左	165	20	145	183	0.792	0.121
	右	154	22	132	183	0.721	0.143
R5	左	146	10	136	180	0.756	0.068
	右	153	14	139	180	0.772	0.092
W9	左	119	3	116	147	0.789	0.025
	右	134	0	134	147	0.912	0.000
W8	左	149	18	131	150	0.873	0.121
	右	140	15	125	150	0.833	0.107
W7	左	110	15	95	150	0.633	0.136
	右	125	20	105	150	0.700	0.160
V10	左	195	10	185	213	0.869	0.051
	右	188	16	172	213	0.808	0.085
V11	左	203	12	191	231	0.827	0.059
	右	216	8	208	231	0.900	0.037
V12	左	206	15	191	249	0.767	0.073
	右	226	20	206	249	0.827	0.088

由表4可知:在最大级荷载作用下,影响较大的拉索的索力增量基本与理论计算索力增量相同,索力校验系数和残余系数均满足《大跨径混凝土桥梁的试验方法》的要求,索力变化正常。

1.4.4 主塔偏位

在最大级荷载作用下主塔偏位实测数据见表5,其中理论值为MIDAS/FEA 3.0计算结果。

表5 主塔偏位实测数据与理论计算数据对比

测点	实测偏位/mm		弹性 值/mm	理论 值/mm	校验 系数	残余 系数
	最大级荷载	卸载				
主塔1	20.11	-0.17	20.28	28.38	0.715	-0.008
主塔2	16.63	1.07	15.56	21.31	0.730	0.064

注:塔顶向边跨偏位为负,向中跨偏位为正。

由表5可知:在最大级荷载作用下,2个主塔塔顶偏位的校验系数及残余系数均满足《大跨径混凝土桥梁的试验方法》的要求,主塔抗弯刚度满足设计要求。

2 动载试验

动载试验测点布置在主跨跨中,主要进行脉动试验、无障碍行车试验和有障碍行车试验,通过测试桥梁的基频、动力系数等分析该桥的动力响应特性。

2.1 脉动试验

脉动试验主要测试主桥的自振频率,测试结果如下:一阶实测频率为0.700 4 Hz,振型为竖弯。理论计算频率为0.593 5 Hz,试验桥跨现场实测自振频率大于理论计算频率,其实际刚度大于理论值。

2.2 无障碍行车试验

无障碍行车试验主要测试不同行车速度下结构的受迫振动响应。采用2辆约30 t的重车匀速通过桥面,对结构振动响应进行测试,结果见表6。

表6 无障碍行车试验动力系数测试结果

行车速度/(km·h ⁻¹)	实测动力系数	理论动力系数
10	1.027	1.05
20	1.025	1.05
30	1.029	1.05
40	1.029	1.05

由表6可知:40 km/h速度下无障碍行车试验的动力系数为1.029,比模型理论计算采用的1.05动力系数小。

2.3 有障碍行车试验

根据现场条件,在主跨跨中放置7 cm高弓形板,用一辆约30 t重车分别以10、20、30 km/h的速度越过弓形板,模拟车辆驶过桥面障碍物对桥梁结构的影响,测试垂向激励引起的桥梁强迫效应,反映桥梁抵抗瞬间强迫振动的性能。实测桥梁振动响应见表7。

表7 有障碍行车试验动力系数测试结果

行车速度/(km·h ⁻¹)	动力系数
10	1.088
20	1.069
30	1.178

对比表6和表7可知:不同车速下有障碍行车试验实测动力系数均大于无障碍行车试验实测动力系数,说明桥面坑槽、不平顺因素等将加大车辆对桥梁的冲击作用。

3 结论

(1) 在静载试验荷载作用下,试验截面控制测点的最大挠度和应变均小于理论计算值,校验系数和残余系数均满足《大跨径混凝土桥梁的试验方法》的要求,该桥在荷载试验作用下处于弹性工作状态;实测主塔塔顶水平位移小于理论计算值,主塔抗弯刚度满足设计要求;实测索力增量与理论计算索力增量基本一致,索力变化正常。

(2) 试验桥跨现场实测自振频率大于理论计算频率,该桥的实际刚度大于理论值;无障碍行车试验实测最大动力系数小于理论计算采用的动力系数;不同车速下有障碍行车试验实测动力系数大于无障碍行车试验实测动力系数,说明桥面坑槽、不平顺因素等将加大车辆对桥梁的冲击作用。

(3) 综合静载和动载试验结果,该桥结构强度、刚度符合《大跨径混凝土桥梁的试验方法》的要求,结构处于弹性工作状态,其承载能力满足公路—I级设计荷载标准的正常使用要求。

参考文献:

- [1] 葛俊颖.桥梁工程软件midas Civil使用指南[M].北京:人民交通出版社,2013.
- [2] 何新平.矮塔斜拉桥的设计[J].公路交通科技,2014,21(4).

(下转第145页)

表 1 吊索张拉工况

施工步	施工内容	备注	施工步	施工内容	备注
1	张拉 S01、M01 到无应力长度		22	张拉 M10	3 169.5 kN
2	张拉 S02、M02 到无应力长度		23	主索鞍顶推 6 cm	
3	张拉 S03、S04 到无应力长度		24	张拉 M11	2 881.7 kN
4	张拉 S05、S06 到无应力长度		25	张拉 M10 到无应力长度	
5	张拉 M08 临时索	700 kN	26	张拉 M11	3 118.2 kN
6	主索鞍顶推 6 cm		27	张拉 M12	2 821.6 kN
7	张拉 S10、S07 到无应力长度		28	主索鞍顶推 7 cm	
8	张拉 S08、S09 到无应力长度		29	张拉 M11 到无应力长度	
9	张拉 M03、M04 到无应力长度		30	张拉 M12	2 928.9 kN
10	张拉 M16 临时索	698 kN	31	张拉 M13	2 961.6 kN
11	张拉 M05、M06 到无应力长度		32	张拉 M12	2 337.5 kN
12	张拉 M07、M08 到无应力长度		33	张拉 M14	2 774.5 kN
13	主索鞍顶推 5 cm		34	张拉 M13	2 511.9 kN
14	张拉临时索 M16	2 948 kN	35	张拉 M14	2 815.5 kN
15	主索鞍顶推 4 cm		36	张拉 M15	2 887.9 kN
16	张拉 M15	1 544.5 kN	37	主索鞍顶推 4 cm	
17	主索鞍顶推 5 cm		38	张拉 M13 到无应力长度	
18	张拉 M09	2 897.6 kN	39	张拉 M14 到无应力长度	
19	主索鞍顶推 4 cm		40	张拉 M12 到无应力长度	
20	张拉 M10	2 698.8 kN	41	张拉 M15 到无应力长度	
21	张拉 M09 到无应力长度		42	张拉 M16 到无应力长度	

索 M09 出现最大内力,为 3 199 kN,而吊索的破断力为 7 812 kN,安全系数大于 2.3;砣桥面板全截面受压,最大压应力为 10.5 MPa,主梁结构安全;主塔的最大拉应力为 0.5 MPa。说明上述体系转换方案安全、可行。

5 结语

空间自锚式悬索桥体系转换中需考虑的因素很多,其中关键在于吊索的角度和内力控制。引进临时吊索可大大降低张拉限制条件,给施工带来方便。需注意:1) 可转动索夹在定位安装时不拧紧,待索夹装上吊杆并使上力让其转过一个角度后再将其拧紧,以减少主缆的受扭。2) 以吊杆的无应力长度控制为主,力控制为辅。3) 在主索鞍处做好压重措施,不要让主缆在鞍槽内滑动。4) 实时对主塔和主

索鞍的偏位进行观测,严格加以控制。

参考文献:

[1] 齐东春,王昌将,沈锐利,等.悬索桥施工中鞍座顶推的研究[J].中国工程科学,2010,12(7).

[2] 李盼到,徐艳玲,姜鹏.基于无应力状态法的自锚式悬索桥吊杆张拉方案[J].特种结构,2012,29(3).

[3] 沈洋.江东大桥空间缆自锚式悬索桥体系转换分析研究[J].上海公路,2009(1).

[4] 檀永刚,张哲,严伟飞.自锚式悬索桥施工控制中的力学特性[J].公路交通科技,2006,23(6).

[5] 邱文亮,张哲.自锚式悬索桥施工中吊索张拉方法研究[J].大连理工大学学报,2007,47(4).

[6] JTG D60—2004,公路桥涵设计通用规范[S].

收稿日期:2019—03—25

(上接第 142 页)

[3] JTG D60—2004,公路桥涵设计通用规范[S].

[4] 交通部公路科学研究所.大跨径混凝土桥梁的试验方法[S].

[5] 宋敬杰.斜拉桥检测中的静载试验研究[J].交通世界:

运输.车辆,2013(1).

[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,2012.

收稿日期:2019—03—22