

某预应力砼单塔三跨双索面斜拉桥荷载试验与评定

王翔

(佛山市公路桥梁工程监测站有限公司, 广东 佛山 528041)

摘要: 以佛山市某预应力单塔双索面斜拉桥为例, 采用 MIDAS/Civil 软件对各工况进行模拟计算, 确定桥梁荷载效率; 通过静载试验、动载试验测试试验荷载作用下控制截面的变形、应力、应变和索力, 分析桥梁结构实际工作状态, 并与理论计算结果进行对比, 分析桥梁结构是否达到设计及规范要求。

关键词: 桥梁; 斜拉桥; 单塔双索面; 荷载试验

中图分类号: U446.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2022)03-0130-05

1 工程概况

某预应力砼单塔双索面斜拉桥, 主桥桥跨布置为(56+94+180) m。主桥采用 H 形砼桥塔, 为塔梁固结体系, 桥塔处固结, 辅助墩、过渡墩顶设纵向、双向活动支座。主塔塔身由塔座、下塔柱、下塔柱横梁、中塔柱、上塔柱、上塔柱横梁等组成。引桥为简支体系, 先简支后桥面连续。每侧桥面布置 52 根斜拉索, 全桥共 104 根。

2 桥梁结构计算

采用桥梁分析软件 MIDAS/Civil 建立该独塔双索面预应力砼斜拉桥有限元模型(见图 1), 通过控制截面试验数据与理论计算数据对比分析, 根据《公路桥梁荷载试验规程》对桥梁承载能力及工作状

态进行评价。

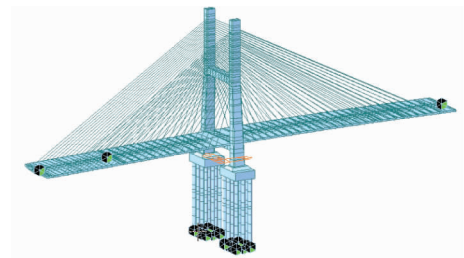


图 1 全桥 MIDAS/Civil 计算模型

通过软件计算试验荷载作用下各工况试验弯矩, 并与控制值比较, 获得试验荷载效率(见表 1)。在满足试验要求的前提下尽可能减少加载量, 适当合并加载工况。采用单车总重 $P=350$ kN 的车辆加载, 荷载试验控制截面布置见图 2, 荷载效率取值为 0.85~1.05。

表 1 荷载试验控制截面荷载效率

主要测试对象	控制截面	控制值	试验值	试验荷载效率
第 10 跨主梁	A 截面最大正弯矩	26 064 kN·m	25 442 kN·m	0.976
9 [#] 墩顶	B 截面最大正弯矩	15 370 kN·m	13 774 kN·m	0.896
	B 截面最大负弯矩	-22 683 kN·m	-22 753 kN·m	1.003
10 [#] 墩顶	C 截面最大负弯矩	-28 234 kN·m	-24 337 kN·m	0.862
第 11 跨主梁	D 截面最大挠度	69.33 mm	71.41 mm	1.030
第 11 跨主梁	E 截面最大正弯矩	51 992 kN·m	46 782 kN·m	0.900
10 [#] 主塔	F 截面主塔根部最大弯矩	38 397 kN·m	35 569 kN·m	0.926
	G 截面最大索力增量 (P16、P17、P18 拉索)	—	—	—
第 11 跨拉索				
10 [#] 主塔	M 截面主塔最大偏位	23.26 mm	22.44 mm	0.965
边跨梁端	N 截面梁端最大水平位移	2.65 mm	2.35 mm	0.887

注: B 截面、D 截面、F 截面、M 截面、N 截面和最大索力 G 截面为合并加载工况。

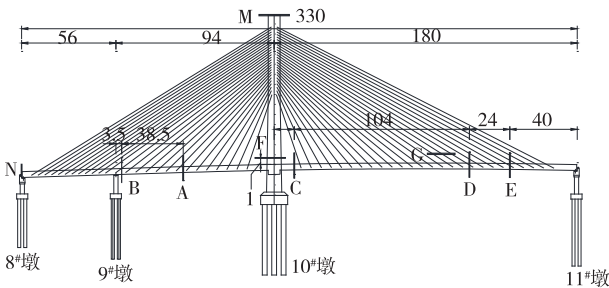


图 2 荷载试验控制截面位置示意图(单位:m)

3 桥梁静载试验分析

3.1 挠度

挠度测点沿试验桥跨两侧的支点位置、1/4 位置和跨中位置布置,主跨测点在 1/8 位置和控制截面加密布置(见图 3)。

控制截面实测挠度与理论计算挠度见表 2。其中校验系数 $\eta = S_e / S_s$, 相对残余 $\Delta S_p = S_p / S_t \times 100\%$ 。

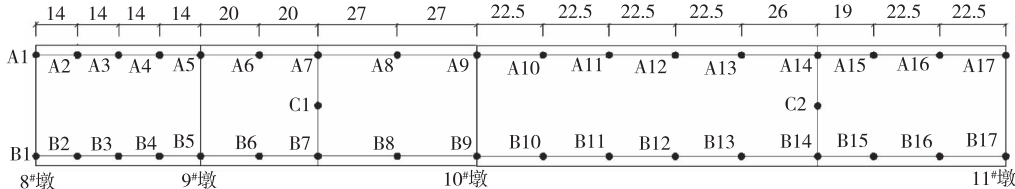


图 3 挠度测点布置(单位:m)

表 2 实测挠度与理论计算挠度比较

控制截面及工况	实测挠度/mm			理论计算 挠度 S_s /mm	校验系数 η	相对残余 ΔS_p /%
	最大值 S_t	卸载值 S_p	弹性值 S_e			
A 截面最大正弯矩中载	10.61	0.45	10.15	12.53	0.810	5.3
A 截面最大正弯矩偏载	13.66	-0.70	14.36	16.92	0.849	-5.2
D 截面最大挠度中载	61.34	-2.15	63.49	71.40	0.889	-3.5
D 截面最大挠度偏载	71.88	-1.37	73.25	81.40	0.900	-1.9

由表 2 可知:A 截面最大正弯矩中载、偏载实测挠跨比分别为 $0.010\ 15/94=1.08\times 10^{-4}$ 、 $0.014\ 36/94=1.53\times 10^{-4}$ (见图 4、图 5),D 截面最大挠度中载、偏载实测挠跨比分别为 $0.063\ 49/180=3.53\times 10^{-4}$ 、 $0.073\ 25/180=4.07\times 10^{-4}$,均小于 $1/500=2.0\times 10^{-3}$,满足规范要求。

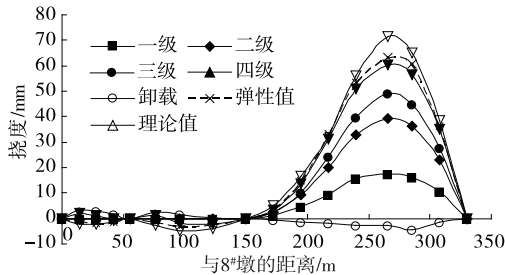


图 4 A 截面实测挠度与理论计算挠度比较

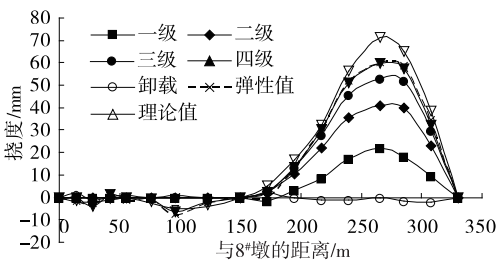


图 5 D 截面实测挠度与理论计算挠度比较

3.2 应变

在 A、B、C 截面布设 18 个应变测点,E 截面布设 20 个应变测点,塔脚布设 20 个应变测点(见图 6、图 7),测试各截面的应变,结果见表 3。

由表 3 可知:除 B 截面最大正弯矩偏载工况外,其他截面工况下应变效验系数均满足规范中预

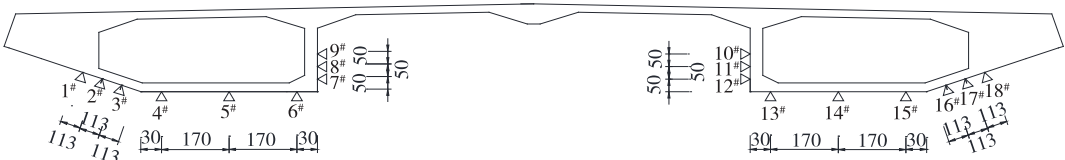


图 6 主梁应变测点布置(单位:cm)

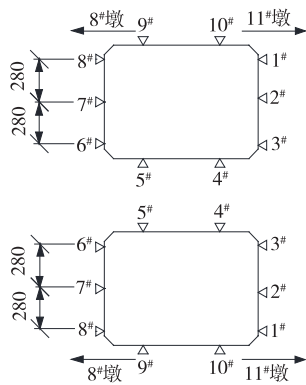


图7 塔脚应变测点布置(单位:cm)

应力砣桥应变校验系数为 0.60~0.90、相对残余应变 $\leq 20\%$ 的要求。B 截面最大正弯矩偏载截面底板弹性应变均值 S_e 为 $13.7 \mu\epsilon$, 理论应变 S_s 为 $23.9 \mu\epsilon$, 应变校验系数 $\eta = S_e/S_s = 0.573 < 0.60 \sim 0.90$, 不满足要求; 最大应变均值 S_t 为 $15.7 \mu\epsilon$, 对应残余应变 S_p 为 $2.0 \mu\epsilon$, 相对残余应变 $\Delta S_p = S_p/S_t \times 100\% = 12.7\% \leq 20\%$, 满足要求。B 截面最大正弯矩偏载应变见图 8。

如图 9 所示, 拟合中性轴高度为 172.40 cm, 与理论计算值 209.00 cm 的相对误差为 17.51%, 实测

表3 实测应变与理论计算应变比较

控制截面及工况	实测应变/ $\mu\epsilon$			理论计算 应变 $S_s/\mu\epsilon$	校验系数 η	相对残余 $\Delta S_p/\%$
	最大值 S_t	卸载值 S_p	弹性值 S_e			
A 截面最大正弯矩中载	42.8	0.20	42.6	51.0	0.835	0.5
A 截面最大正弯矩偏载	54.2	1.20	53.0	67.3	0.788	2.2
B 截面最大负弯矩中载	-29.0	-3.30	-25.7	-37.2	0.691	11.4
B 截面最大正弯矩中载	16.0	2.20	13.8	22.5	0.613	13.8
B 截面最大正弯矩偏载	15.7	2.00	13.7	23.9	0.573	12.7
C 截面最大负弯矩中载	-31.4	-1.00	-30.4	-35.2	0.864	3.2
E 截面最大正弯矩中载	57.8	0.40	57.4	88.9	0.646	0.7
E 截面最大正弯矩偏载	73.1	2.60	70.5	101.3	0.691	3.6
F 截面最大正弯矩中载	-9.2	-0.60	-8.6	-12.3	0.699	6.5
F 截面最大正弯矩偏载	13.0	2.13	-10.8	-14.8	0.729	16.4

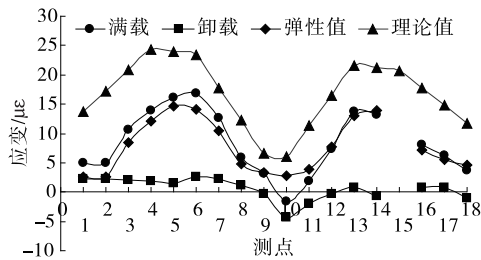
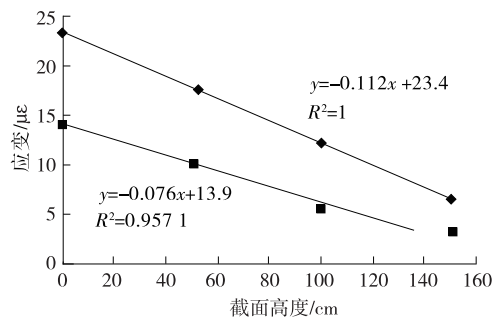


图8 B截面实测最大应变与理论计算应变比较



◆理论值 ■实测值 —线性(理论值) —线性(实测值)

图9 最大试验荷载作用下实测应变沿截面高度的分布

拟合中性轴高度比理论计算中心轴高度低; 最大试验荷载作用下, 实测应变沿截面高度呈线性变化, 线

性相关系数 r 为 0.978 3, 符合平截面假定 ($n=4$, 置信度大于 95%)。

3.3 主塔塔顶、主梁梁端水平位移

在主塔塔顶布置位移测点 T1、T2, 并安装一个棱镜, 采用徕卡 TM50 全站仪观测塔顶位移。主梁梁端布置水平位移测点 N1、N2, 采用百分表测量梁端位移(见图 10)。试验荷载作用下塔顶实测水平位移见表 4, 主梁梁端实测水平位移见表 5。

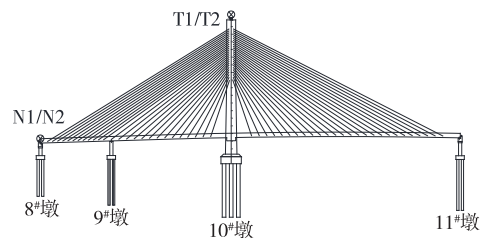


图10 主塔塔顶、主梁梁端水平位移测点布置

表4 塔顶实测水平位移与理论计算位移比较

测点	实测位移/mm			理论计算 位移/mm	校验 系数	相对残 余/%
	最大值	卸载值	弹性值			
T1	19.70	-1.30	21.00	22.44	0.936	-6.6
T2	20.30	0.13	20.17	22.44	0.899	0.6

表 5 主梁梁端实测水平位移与理论计算位移比较

测点	实测水平位移/mm			理论计算	校验
	最大值	卸载值	弹性值	位移/mm	系数
N1	2.42	0.07	2.35	2.65	0.887

注:N1 为桥面梁端左幅测点;N2 测点损坏,无数据。

由表 4 可知:塔顶水平位移测点 T1、T2 的实测弹性变形均值 S_e 为 20.59 mm,对应理论计算变形 S_s 为 22.44 mm,校验系数 $\eta=S_e/S_s=0.917$,满足挠度校验系数为 0.70~1.00 的要求;实测最大水平位移均值 S_t 为 20.00 mm,对应残余挠度 S_p 为

—0.59 mm,相对残余挠度 $\Delta S_p=S_p/S_t \times 100\%=-3.0\% \leq 20\%$,满足要求。

由表 5 可知:试验工况下主梁梁端 M 截面无显著纵向位移。

3.4 最大索力

测试主跨 P16~P18 拉索(位于第 11 跨)的索力,左右各 3 根。在拉索上安装索力传感器,采用振动法测试试验荷载作用下索力增量,并与 MIDAS/Civil 计算索力增量进行对比。实测索力增量与计算索力增量见表 6,最大索力工况安全系数见表 7。

表 6 实测索力增量与理论计算索力增量比较

拉索编号	索力增量/kN						计算索力增量/kN	校验系数	相对残余/%
	一级	二级	三级	四级	卸载值	弹性值			
Z—P16	141.6	254.1	295.2	378.0	30.2	364.7	355.2	1.023	8.0
Z—P17	133.0	205.2	277.9	340.6	10.2	302.6	340.2	0.889	3.0
Z—P18	144.6	234.5	268.4	347.9	44.3	263.3	318.6	0.826	12.7
Y—P16	101.8	517.9	360.2	402.0	20.3	324.7	355.2	0.914	5.1
Y—P17	93.5	166.8	400.1	261.7	—41.3	269.9	340.2	0.793	—15.8
Y—P18	98.9	154.2	254.4	299.2	—43.7	358.0	318.6	1.124	—14.6

注:Z 表示左侧拉索,Y 表示右侧拉索。

表 7 最大索力工况安全系数

拉索编号	满载索力增量/kN	设计成桥索力/kN	最大索力/kN	拉索设计抗拉值/kN	安全系数
Z—P16	378.0	5 674	6 052.0	15 489	2.56
Z—P17	340.6	5 551	5 891.6	15 489	2.63
Z—P18	347.9	5 688	6 035.9	15 489	2.57
Y—P16	402.0	5 674	6 076.0	15 489	2.55
Y—P17	261.7	5 551	5 812.7	15 489	2.66
Y—P18	299.2	5 688	5 987.2	15 489	2.59

注:最大索力=满载索力增量+设计成桥索力;安全系数=拉索设计抗拉值/最大索力。

从表 7 可看出:最大试验荷载作用下,Z—P17、Y—P17 拉索的索力增量略大于理论值(拉索实测索力的安全系数大于 2.6),其余拉索的索力增量符合规范要求。

4 桥梁动载试验

4.1 脉动试验

该桥为直桥,桥梁以竖向振动为主。全桥共布置 26 个测点(包括 1 个参考点),分 9 批次进行振动信号采集。拾振器尽量避免布置在理论计算振动的节点位置。主桥振动测试结果见表 8,振型见图 11。

表 8 主桥结构自振频率及振型测试结果

阶次	实测频率/Hz	理论频率/Hz	阻尼比	振型特征
1 阶	0.563	0.514	0.229	竖弯
2 阶	1.184	1.096	0.651	竖弯
3 阶	1.380	1.353	0.614	竖弯
4 阶	2.166	1.800	0.265	竖弯

4.2 受迫振动试验

(1) 无障碍行车试验。采用 2 辆约 35 t 的重车匀速并排通过桥面,利用跨中布置的振动测点对结构振动响应进行测试。根据现场条件,采用 10~50 km/h 的行驶速度进行测试。不同速度下冲击系数见表 9。由表 9 可知:在 10~50 km/h 行车速度下,

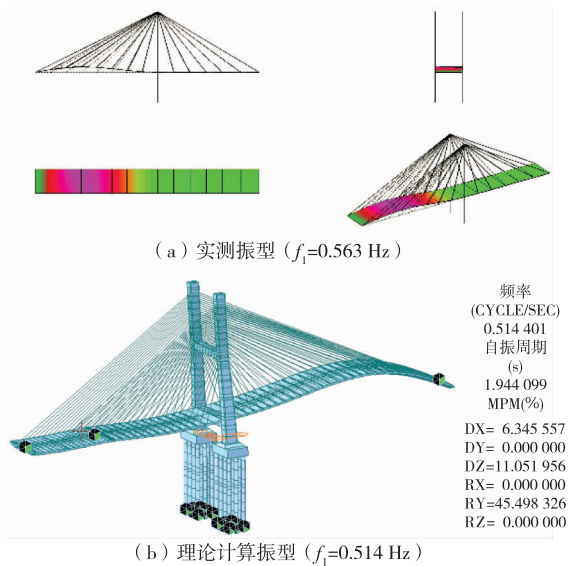
(b) 理论计算振型 ($f_1=0.514$ Hz)

图 11 竖向 1 阶振型对比

表 9 无障碍行车时不同行车速度下第 11 跨冲击系数

速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	$f_{\text{dmax}} /$ mm	$f_{\text{dmin}} /$ mm	冲击 系数	理论冲 击系数
10	9.516	9.978	0.025	0.05
20	9.609	9.609	0.005	0.05
30	9.054	8.962	0.008	0.05
40	8.685	8.777	0.013	0.05
50	8.926	8.869	0.009	0.05

注: f_{dmax} 为最大动挠度幅值; f_{dmin} 为与 f_{dmax} 对应的挠度波谷值。

第 11 跨实测冲击系数均小于理论冲击系数, 结构冲击效应无明显异常。

(2) 有障碍行车试验。采用弓形板模拟桥面坑洼进行有障碍行车试验。采用 2 辆约 35 t 的重车匀速并排同步越过桥面测试截面 7 cm 高的弓形板, 利用跨中布置的振动测点对结构振动响应进行测试。采用 10~30 km/h 的行驶速度进行测试。不同速度下冲击系数见表 10。由表 10 可知: 第 11 跨在 10~30 km/h 有障碍行车试验中的最大冲击系

数为 0.042, 大于无障碍行车试验的 0.025, 说明桥面坑槽、不平顺等会加大车辆对桥梁的冲击作用。

表 10 有障碍行车时不同行车速度下第 11 跨冲击系数

速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	$f_{\text{dmax}} /$ mm	$f_{\text{dmin}} /$ mm	冲击系数
10	5.728	6.190	0.041
20	4.435	4.527	0.015
30	5.451	5.081	0.042

5 结论

(1) 该桥在静载试验各主要控制工况下的校验系数及残余变形、主塔塔顶水平位移、索力增量等均满足规范要求, 试验桥跨工作状况良好, 主要受力构件处于弹性工作状态。

(2) 在试验荷载作用下, 试验桥跨实测振型与理论计算振型基本相符, 实测频率大于理论频率, 结构实际刚度大于理论刚度; 实测冲击系数小于理论冲击系数, 桥面平整度良好, 桥跨结构在受力时抵抗弹性变形的能力强。

(3) 该桥在荷载作用下结构稳定, 受力合理, 工作状况正常, 承载能力满足设计荷载要求。

参考文献:

- [1] 长安大学. 公路桥梁荷载试验规程: JTG/T J21—01—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [2] 中交公路规划设计院有限公司. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [3] 刘士林, 王似舜. 斜拉桥设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [4] 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.
- [5] 何炳涛. 独塔四索面斜拉桥交工检测中动载试验研究[J]. 公路与汽运, 2022(2): 133—135.

收稿日期: 2021—07—14

(上接第 111 页)

- [6] 肖汝诚, 郭文复. 结构关心截面内力、位移混合调整计算的影响矩阵法[J]. 计算力学学报, 1992, 9(1): 91—99.
- [7] 汤柠郡. 型钢混凝土组合结构施工模拟分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [8] 张志飞. 龙湾斜拉桥索力的确定及控制[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.

- [9] 赵光明, 陈科昌. 系杆拱桥调索工序时机选择[J]. 中南公路工程, 1997, 22(11): 28—31.
- [10] 颜东煌, 刘光栋. 确定斜拉桥合理施工状态的正装迭代法[J]. 中国公路学报, 1999, 12(2): 59—64.
- [11] 王鹏, 吴迅, 石雪飞, 等. 自锚式悬索桥施工控制[J]. 结构工程师, 2008, 24(1): 92—95.

收稿日期: 2021—06—15