

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.05.046

基于动静载试验的斜拉桥初始状态研究

马明雷

(上海浦江桥隧运营管理有限公司,上海市 200231)

摘要: 由于施工阶段中存在较多的不确定性,桥梁的初始成桥状态与设计成桥状态存在误差。精确掌握桥梁初始成桥状态,对于后续运维养护具有重要意义。桥梁动静载试验是测试桥梁性能的重要方法之一。以某主跨220 m独塔斜拉桥为例,结合动静载试验的方法,测定了该桥的自振特性、在特定荷载下的动静挠度和应变等参数,并与有限元模型理论值进行比较。结果表明,该桥结构刚度、动力特性均满足设计要求,具有较好的初始成桥状态。

关键词: 斜拉桥;动静载试验;性能评估;桥梁初始状态

中图分类号: U446

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)05-0177-05

0 引言

斜拉桥初始状态分析是指全面分析斜拉桥在初始状态下的整体技术状况与各项力学指标,为后续桥梁状态评价提供相关指标的基准数据。《公路桥涵养护规范》(JTG 5120—2021)^[1]要求对新建桥梁应进行初始检查。其重要性主要体现在以下两个方面。首先,初始状态分析是桥梁施工阶段的终点。由于施工阶段中存在较多的不确定性,最终成桥状态与设计图纸存在较多误差,直接采用设计成桥状态作为桥梁初始状态并不合理^[2]。其次,初始状态分析是桥梁运营阶段的起点。若运营阶段的各项评价指标直接参照设计阶段的设计值,桥梁状态评价结果就会与实际情况产生较大出入,从而引起运营决策失误。实际情况下,桥梁是从实际成桥状态开始退化,初始状态分析可以帮助建立桥梁初始信息档案,为后续运维养护提供参考依据^[3]。

桥梁动静载试验是确定桥梁力学性能的重要方法,现已广泛应用于工程实际中^[4-8]。在大跨径斜拉桥性能研究方面,李元兵等^[9]对千米级斜拉桥结构开展了静动力试验研究,验证了桥梁主体处于线弹性工作状态。李森等^[10]对某独塔斜拉桥进行了静动力试验分析,测定了桥梁应力、挠度及振动特性,验证了桥梁静动力性能。施州等^[11]利用桥梁动静力试

验的结果,建立了用于后续结构损伤识别的桥梁“指纹”档案。在旧桥检测与评定方面,刘金平^[12]基于静动力试验方法,对既有独塔混合梁斜拉桥的承载力进行了评估。

本文基于现有研究,以某主跨220 m独塔斜拉桥为例,结合动静载试验的方法测定其结构刚度、动力特性等参数,以此对其初始成桥状态进行评估,以期对斜拉桥初始状态的确定与动静载试验的研究提供实际工程经验。

1 工程背景

本文背景工程为某独塔单索面四跨连续钢-混凝土组合梁斜拉桥,跨径布置50 m+2×220 m+50 m,总长540 m。

主梁截面采用开口钢箱与混凝土桥面板构成的组合箱梁,主梁顶宽28.5 m,主桥全长采用等高度,主梁中心处高3.945 m。标准节段长9 m,顶面设2.0%的双向横坡。组合箱梁采用单箱三室截面,中央布索区设封闭箱室。斜拉索采用中央单索面扇形布置,每一锚固点有2根并置的横向间距为1.0 m的斜拉索。主塔采用钻石型,塔高136 m,桥面以上高103.8 m。

在结构体系上,主梁在塔墩处设置纵向固定支座,锚墩及过渡墩均设置纵向活动支座。主墩及过渡墩设置横向阻尼支座。主桥总体布置见图1,标准阶段主梁结构见图2。

2 静载试验

静载试验是检验桥梁结构在指定车辆、人群荷载

收稿日期:2022-07-19

基金项目:上海市交通委员会科研计划项目,JT2021-KY-013

作者简介:马明雷(1983—),男,博士,高级工程师,主要从事桥梁检测与养护、桥梁结构测试等研究工作。

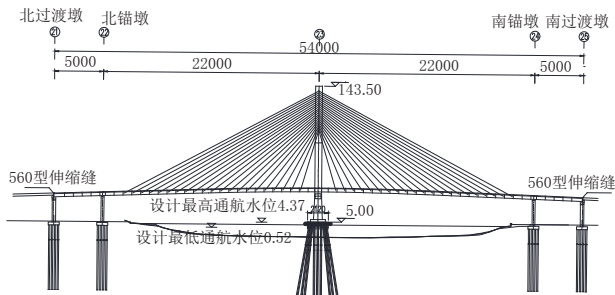


图1 主桥总体布置图(单位:cm)

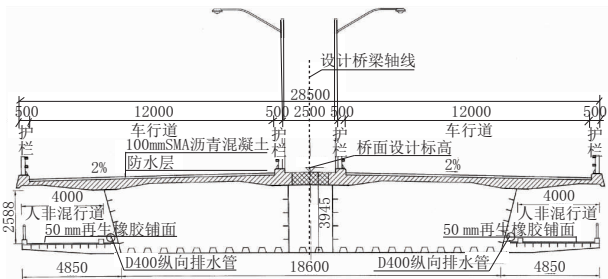


图2 主梁标准横断面(单位:mm)

作用下工作性能的有效手段。通过在桥梁特定位置进行静荷载加载，并测定结构在荷载作用下控制截面的应力、位移等参数，将其与理论计算值及规范限值进行比较后，可以对桥梁整体刚度、强度进行评估。

2.1 测试断面

本次试验采用 Midas Civil 软件进行了加载工况分析，依据桥梁结构汽车、人群荷载弯矩包络图选取了主要的控制断面，测试各截面的应力、竖向位移及塔顶水平位移。主梁弯矩包络图见图3。

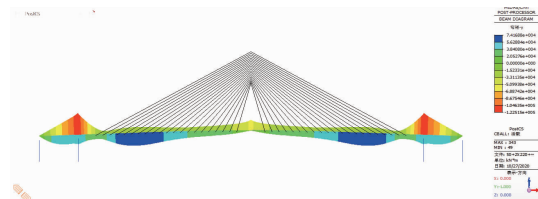


图3 主梁弯矩包络图(单位:kN·m)

根据弯矩包络图结果，本次试验共选取5个测试断面：塔根处主梁最大负弯矩断面(S1断面)、220m跨主梁最大正弯矩断面(S2断面)、锚墩处主梁最大负弯矩断面(S3断面)、50m边跨最大正弯矩断面(S4断面)、塔顶水平位移测试断面(S5断面)。各测试断面具体位置见图4。

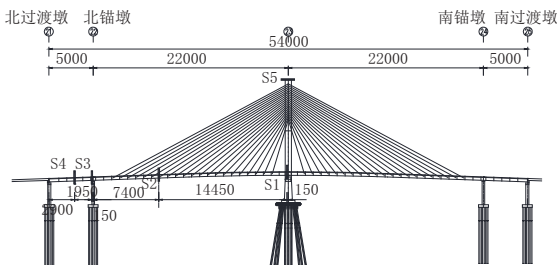


图4 静载试验位移、应力测试断面位置图(单位:cm)

在测试断面上，主梁 S2、S4 竖向位移测试断面测点布置见图5。主梁 S1~S4 各测试断面的应力测点布置见图6。其中，S1 断面和 S3 断面顶板下缘为钢板，S2 断面和 S4 断面顶板下缘为混凝土。

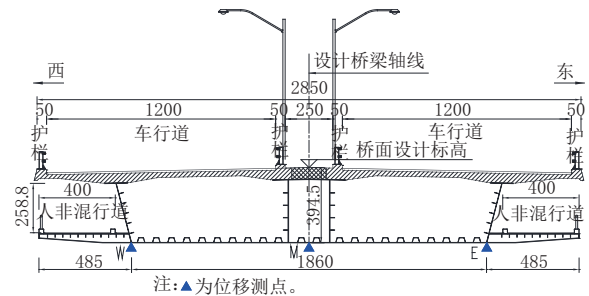
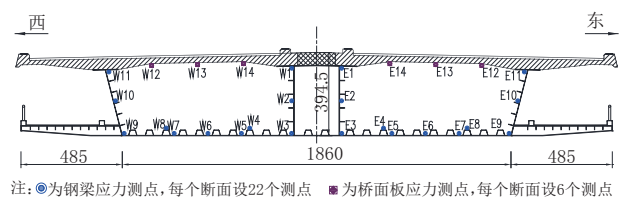


图5 主梁 S2、S4 位移测试断面测点布置(单位:cm)



注:●为钢板应力测点,每个断面设22个测点 ■为桥面板应力测点,每个断面设6个测点

图6 主梁应力测点布置图(单位:cm)

2.2 试验荷载和荷载效率

2.2.1 加载车辆与加载工况

此次静载试验的目的是检验桥梁在相当于设计汽车、人群荷载标准值的试验荷载作用下，桥梁的变形及主要构件的应力状态，故采用基本荷载试验。

考虑到现场加载条件和静载试验效率的要求，本次试验选用24辆重车（每辆车总重约375kN）进行加载。加载车辆图见图7。试验车辆的纵向加载位置由各测试断面的内力影响线来确定，选用一定数量的重车分别作用于相应测试断面的影响线数值较大处。最终确定车辆纵向加载位置见图8。

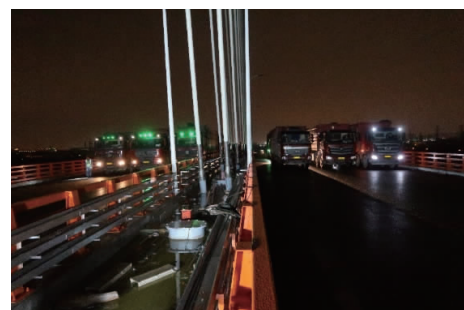


图7 加载车辆图

试验加载车辆横向布置包括中载和偏载两种方式。其中，中载为沿桥梁中心线对称布置车列，偏载为加载车辆按《公路桥涵设计通用规范》规定的横向最大偏心状态布置。

2.2.2 荷载效率

根据《公路桥梁荷载试验规程》(JTG/T J21-01—2015)的要求，试验荷载在结构主要控制截面上所产

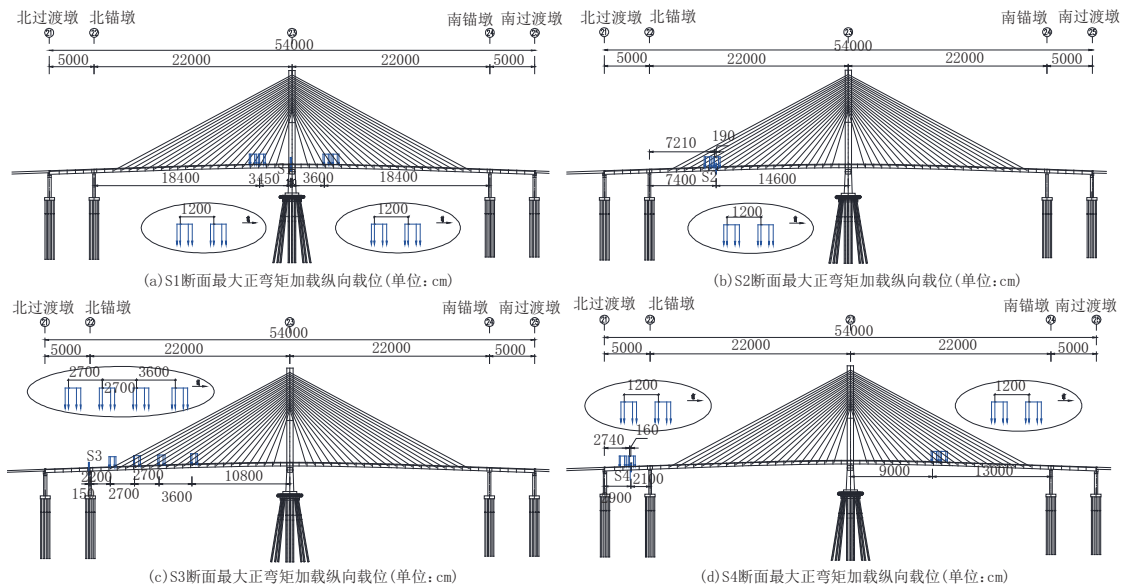


图8 各测试断面最大正弯矩纵向加载位置

生的效应与控制荷载所产生的相应效应接近,其接近的程度采用试验荷载效率系数 η_q 表示,其表达式为:

$$\eta_q = \frac{S_s}{S(1+\mu)}$$

式中: η_q 为静载试验荷载效率; S_s 为静载试验荷载作用下控制截面内力(或变形)计算值; S 为控制荷载作用下控制截面最不利内力(或变形)计算值(不计冲击系数); μ 为冲击系数,取0.05。

静载试验中,各主要加载工况下的荷载效率系数见表1,均满足规范中荷载效率率在0.85~1.05之间的要求。

表1 静载试验主要测试断面荷载效率系数

控制截面内力	控制荷载	试验荷载	荷载效率
桥塔处主梁 S1 断面 负弯矩/(kN·m)	-57 504	-56 380	0.98
主跨跨中处 S2 截面 正弯矩/(kN·m)	74 169	67 647	0.91
锚墩处主梁 S3 断面 负弯矩/(kN·m)	-122 515	-116 744	0.95
边跨跨中处 S4 断面 正弯矩/(kN·m)	52 991	50 152	0.95

2.3 静载试验结果及分析

2.3.1 结构校验系数

在各个工况下,可计算各测点的结构校验系数 ζ :

$$\zeta = \frac{S_e}{S_s}$$

式中: S_e 为试验下主要测点的实测弹性变位或应变值; S_s 为试验下主要测点的理论计算变位或应变值。以 S2 测试断面为例,选取顶板测点 W13、E13,腹板测点 W10、E10,底板测点 W6、E6 的应力结果,计算

各测点的结构校验系数 ζ (见表2)。

表2 S2 断面主要测点应力测试结果

测点号	W6	W10	W13	E6	E10	E13
实测值/MPa	27.23	9.84	-1.3	26.39	10.89	-0.54
计算值/MPa	37.18	14.94	-1.98	37.18	14.94	-1.98
校验系数	0.73	0.66	0.66	0.71	0.73	0.27

当小于1时,代表桥梁的实际状况好于理论状况。各工况下各控制断面主要测点实测应力,位移校验系数见表3。

表3 各加载工况主要测点位移、应力校验系数

工况	桥塔水平位移 校验系数	主梁挠度校验 系数	主梁应力校验 系数
S1 断面加载	—	—	0.72
S2 断面加载	0.73	0.88	0.75
S3 断面加载	0.78	0.89	0.74
S4 断面加载	0.77	0.91	0.84

2.3.2 残余变位(应变)

相对残余变位或相对残余应变 S'_p 是实测残余变位与实测总变位的比值,采用下式计算:

$$S'_p = \frac{S_p}{S_t}$$

式中: S_p 为主要测点实测残余变位或应变; S_t 为主要测点的实测总变位或总应变; S'_p 代表结构的弹性工作状态,其值越小,说明结构越接近弹性工作状态。各加载工况最大残余应变结果见表4,最大残余变位结果见表5。可见各加载工况中,主要测点最大残余变位为8.94%,最大相对残余应变为16.3%,满足规范20%的限值要求。

表4 各加载工况主梁主要应力测点最大残余应变

加载断面	工况	测点号	总应变 / $\mu\epsilon$	残余应变 / $\mu\epsilon$	残余应变 / 总应变
S1 断面	中载	E9	-79	0	0
	东偏载	E9	-95	0	0
S2 断面	中载	E7	153	25	0.163
	东偏载	W9	145	15	0.103
S3 断面	中载	E11	32	1	0.031
	东偏载	W9	191	0	0
S4 断面	中载	W1	-18	-2	0.111
	东偏载	W6	104	9	0.086

表5 各加载工况结构位移测点最大残余变位

加载断面	工况	测点号	总变位 / mm	残余变位 / mm	残余变位 / 总变位	测点位置	总变位 / mm	残余变位 / mm	残余变位 / 总变位
S2 断面	中载	S2 断面 E	100.5	0.2	0.0023	塔顶	-37.2	0	0
	东偏载	S2 断面 E	100.5	0	0	塔顶	-40.7	-3.6	0.089 4
S3 断面	中载	S3 断面 E	153.1	0.2	0.0015	塔顶	-64.4	0	0
	东偏载	S3 断面 E	153	0	0	塔顶	-67.2	-3.6	0.054 1
S4 断面	中载	S4 断面 E	11.3	0	0	塔顶	44.4	2.3	0.051 2
	东偏载	S4 断面 E	11	0	0	塔顶	41.2	0	0

东侧近防撞护栏处的桥面上布设横向振动测点。主梁共布设 42 个竖向振动测点和 21 个横向振动测点。

桥塔在塔顶处、上中塔柱交汇处、中塔柱与下塔柱交汇处布置纵向振动测点和横向振动测点。

3.1.2 测试结果

结构频率采用 Midas Civil 有限元软件计算,前 6 阶振动模态的计算值和测试结果列于表 6,相应的振型见图 9。实测值均大于理论计算值,满足规范^[13]要求。

表6 实测桥梁振动模态参数

阶次	计算频率 / Hz	实测频率 / Hz	实测阻尼比 / %	振型描述
1	0.336	0.383	0.34	反对称竖弯
2	0.649	0.685	0.2	对称竖弯
3	0.901	1.013	0.15	反对称竖弯、塔横弯
4	1.028	1.104	0.14	对称竖弯
5	—	1.233	0.2	对称扭转
6	—	1.288	0.16	反对称扭转

3.2 动力响应测试

动力响应测试的主要测量内容是移动车辆作用下钢梁底面的应变动态响应,即最大动应变、应变时程曲线和应变动态增量。动态增量定义为:(最大动应变-最大静应变)/最大静应变。

3.2.1 试验方案及测点布置

本次动载试验采用 1 辆载重车(车辆总重约

3 动载试验

3.1 自振特性测试

环境随机振动方法进行桥梁结构自振特性测试。该方法不需要对桥梁进行人工激励,并且可以得到比较多的振动模态参数。

3.1.1 测点布置

主梁边跨测点布置在跨中断面和墩顶断面,中跨按跨径的八分点进行布设。各断面在横向距左侧、右侧防撞护栏 10 cm 处布设竖向振动测点,在桥梁

375 kN),采用以下两种方式进行测试:(1)分别以 10 km/h、20 km/h、30 km/h、40 km/h 的车速匀速驶过桥面,记录测点的动应变时程信号。(2)分别以 10 km/h、20 km/h 的速度行驶,并跨越设置在测试断面处的障碍(障碍是长 3 m、横断面为弓形的橡胶板,弓形底宽 30 cm,矢高 4.5 cm),模拟桥面不平整状况,记录测点的动应变时程信号。

动应变测点选择南侧边跨和中跨最大正弯矩断面(S2、S4 断面),每个断面在一侧箱室底板中部布置 1 个动应变测点。

3.2.2 测试结果

S2、S4 断面不同行车速度下实测最大动应变及应变动态增量见表 7。实测最大动应变和应变动态增量均在正常范围内。

4 结论

本文基于桥梁动静载试验,对某主跨 220 m 斜拉桥进行了成桥初始状态评估,主要结论如下:

(1)主桥静载试验各加载工况控制断面主要测点实测应力校验系数最大值,位移校验系数最大值均小于 1.0,最大相对残余变位和最大相对残余应变均小于规范限值。

(2)主桥自振频率测试实测值均大于理论计算值,证明桥梁结构刚度大于设计值,桥梁动力特性良好。

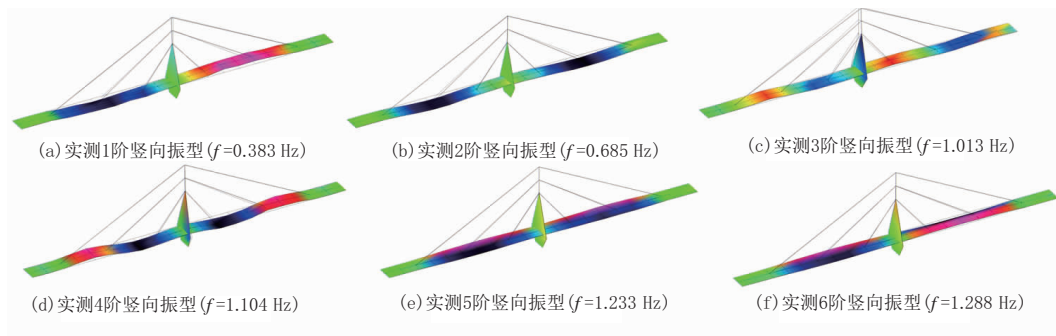


图9 实测各阶振型图

表7 断面实测最大动应变及应变动态增量

车速	S2 断面		S4 断面	
	最大动应变 / $\mu\epsilon$	应变动态增量	最大动应变 / $\mu\epsilon$	应变动态增量
10 km/h	20.66	0.03	9.3	0.2
20 km/h	23.76	0.07	9.3	0.38
30 km/h	20.66	0.03	7.23	0.27
40 km/h	20.66	0.03	9.3	0.38
10 km/h (跨越障碍)	27.9	0.32	15.5	1
20 km/h (跨越障碍)	25.03	0.24	13.43	1

(3)主桥动载试验中,实测最大动应变和应变动态增量均在正常范围内,主桥刚度满足设计要求。

参考文献:

[1] JTG 5120—2021,公路桥涵养护规范[S].
 [2] 闫昕,黄森炎,齐铁东,等.基于施工过程特征数据的桥梁结构初始状态评估方法研究[J].公路交通科技(应用技术版),2012,8(12):40-42.

[3] 曹少辉,田仲初,赵剑.马岭河大桥成桥荷载试验研究[J].中外公路,2012,32(5):160-163.
 [4] 周磊,韩振中,赵剑,等.重庆涪陵长江大桥动力特性试验研究[J].中外公路,2015,35(3):123-126.
 [5] 张开银,赵小军,梁新宇,等.独塔斜拉桥承载能力评估方法[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2010,34(2):254-257.
 [6] 刘永健,杨健,梁鹏,等.无背索斜塔斜拉桥荷载试验[J].长安大学学报(自然科学版),2009,29(5):59-63.
 [7] 张秋陵,肖光宏.奉节长江大桥成桥荷载试验研究[J].世界桥梁,2009(1):46-48.
 [8] 曾特新.大跨径斜拉桥荷载试验及静动力分析[J].湖南交通科技,2005(3):95-97.
 [9] 李元兵,张启伟,季云峰.千米级斜拉桥结构静力行为试验研究[J].同济大学学报(自然科学版),2011,39(4):495-500,523.
 [10] 李森,石雪飞,苏祥亚,等.大跨度独塔斜拉桥荷载试验与结构性能分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2012,25(4):34-38.
 [11] 施洲,曹发辉,蒲黔辉.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.
 [12] 刘金平.独塔混合梁斜拉桥承载力的检测与评定[J].世界桥梁,2011(4):28-32.
 [13] JTGT J21—2011,公路桥梁承载能力检测评定规程[S].

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com