DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260301

预应力混凝土矮塔斜拉桥成桥荷载试验研究

王振航
(上海市建筑科学研究院有限公司,上海市 200032)

摘　要: 以上海市一座跨径布置为 115 m+180 m+115 m=410 m 的新建矮塔斜拉桥为研究对象,通过动静载试验验证桥梁实际受力性能,检验其承载能力、刚度、稳定性及动力特性是否满足设计与规范要求,为桥梁竣工验收及后续检测评估提供初始依据。采用有限元数值模拟方法开展理论分析,确定合理的静载试验工况;在此基础上对实桥进行现场静载与动载试验,获取结构应变、挠度、振动频率等关键实测数据,并将试验值与理论值进行对比分析。对比结果表明,该桥整体受力状态良好,满足设计与相关规范要求,实测响应与理论计算结果一致性较好。可为该桥后期运营监测与安全评估提供基础数据。

关键词: 矮塔斜拉桥;静载试验;动载试验;校验系数;动力特性
中图分类号: U441　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0322-06

Research on Load Test of Prestressed Concrete Low-pylon Cable-stayed Bridge after Completion

WANG Zhenhang
(Shanghai Research Institute of Building Sciences Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Taking a newly-built low-pylon cable-stayed bridge with a span arrangement of (115 m+180 m+115 m=410 m) in Shanghai as the research object, the actual force-bearing performance of the bridge is verified through dynamic and static load tests. The bearing capacity, stiffness, stability and dynamic characteristics of the bridge are examined to determine whether or not to meet the design and specification requirements, which provides an initial basis for the completion acceptance and subsequent detection and evaluation of the bridge. The finite element numerical simulation method is used for theoretical analysis to determine the reasonable static load test conditions. Based on this, on-site static and dynamic load tests are conducted on the actual bridge to obtain the key measured data such as structural strain, deflection and vibration frequency. The test values are compared and analyzed with the theoretical values. The comparison results show that the overall force-bearing state of the bridge is good, which meets the design and relevant specification requirements. The measured responses are in good agreement with the theoretical calculation results, which can provide basic data for the later operation monitoring and safety assessment of the bridge.

Keywords: low-pylon cable-stayed bridge; static load test; dynamic load test; calibration coefficient; dynamic characteristics

0　引　言

矮塔斜拉桥兼具连续梁桥与斜拉桥的力学性能优势,在我国40余年交通建设发展进程中得到了广泛应用[1-5]。矮塔斜拉桥为多次超静定桥型,结构体系本身受力复杂,且受设计参数影响较大,导致理论分析与实际受力往往存在一定的偏差[4-6]。

现有研究中,已有部分学者围绕该方向展开探讨,周世雄等[1]利用静载试验评估了某矮塔斜拉桥成桥状态下的实际结构性能与承载能力;桂水荣等[4]利用有限元软件分析了各关键结构参数及结构体系对矮塔斜拉桥动、静力性能的影响;祝孝成等[7]采用实际动静载试验,评定了桥梁承载能力和安全性。

不同设计参数下的矮塔斜拉桥具有不同的受力性能[8]。基于上述研究,以一座新建矮塔斜拉桥为背景,旨在通过静动载试验来检验结构的实际受力和工作性能,为桥梁交工提供依据,也为运营及养护单位提供桥梁的初始受力状态[9-12],所得结果对同类型桥梁的设计优化及施工控制具有重要参考价值。

收稿日期:2026-03-23
作者简介:王振航(1993—),男,硕士,工程师,从事桥梁检测与评估、桥梁施工监测与控制工作。

1　桥梁概况

上海市某新建矮塔斜拉桥跨径布置为:115 m+180 m+115 m=410 m,其横断面布置为:0.3 m(栏杆)+2.0 m(人行道)+3.5 m(非机动车道)+0.5 m(机非分隔墩)+11.5 m(机动车道)+4.0 m(锚索区、主塔区)+11.5 m(机动车道)+0.5 m(机非分隔墩)+3.5 m(非机动车道)+2.0 m(人行道)+0.3 m(栏杆)=39.6 m。

结构体系采用塔梁固结,主梁采用预应力混凝土变截面箱型梁,梁底曲线按照2.5次抛物线线形过渡,其中墩顶梁高为6.4 m,高跨比为1∶28;跨中梁高为3.5 m,高跨比为1∶51。

塔身截面采用刻槽、倒角的矩形截面,主塔标准截面段纵桥向宽度4.5 m,横桥向宽度2.5 m,塔根部宽度在纵桥向渐变加厚至6.0 m,塔顶部切斜角进行渐变。

下部结构主墩采用墙式墩的形式,桥墩采用圆角的矩形截面,横桥向宽16.7 m,纵桥向厚4 m,截面横向刻2道装饰槽。基础采用直径为1.2 m的钻孔灌注桩基础,承台采用矩形承台,承台厚2.5 m。支座采用摩擦摆式支座。荷载标准采用公路-Ⅰ级,人群荷载按3.5 kN/m取值设计。桥梁纵、横断面图见图1、图2。

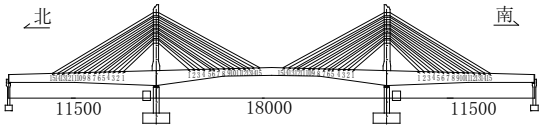


图1　桥梁纵断面图(单位:cm)

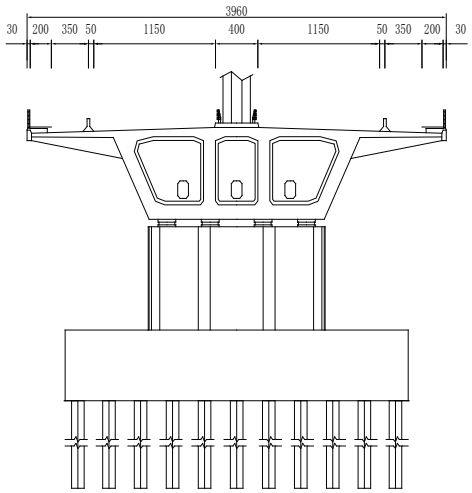


图2　桥梁横断面图(单位:cm)

2　试验方案

2.1　有限元分析

采用有限元软件MIDAS Civil建立全桥空间计算模型[13-14],材料参数见表1,斜拉索初拉力见表2。

表1　材料参数表

材料名称	弹性模量/MPa	泊松比	容重/(kN·m^{-3})
C55混凝土	3.55×10^4	0.2	25.0
1860级钢绞线	1.95×10^5	0.3	78.5

表2　斜拉索初拉力一览表

拉索编号	初始索力/kN	拉索编号	初始索力/kN
1~6、15	5 100	10、11	5 600
7~9	5 900	12~14	5 300

全桥空间计算模型中除斜拉索采用桁架单元外,其他均采用梁单元模拟;北侧边墩边界条件采用竖向及横向约束,南侧边墩边界条件采用横向约束,北侧桥塔边界条件采用竖向及横向约束,南侧桥塔边界条件采用竖向、纵向及横向约束。全桥模型共637个节点、576个单元。

全桥空间有限元模型图见图3。

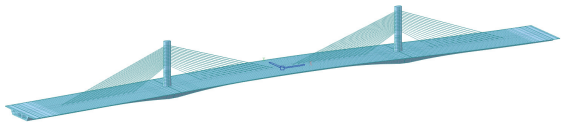


图3　全桥空间有限元模型图

2.2　静载试验概述

通过有限元分析提取各控制截面的内力影响线,并确定相应的静载试验工况,荷载试验效率依据规范控制在0.85~1.05之间[15]。

静载试验工况及控制断面见表3。

表3　静载试验工况及控制断面

工况	测试控制断面	试验工况
1	中跨跨中截面	中载下中跨跨中最大正弯矩及挠度工况
2		偏载下中跨跨中最大正弯矩及挠度工况
3	边跨跨中截面	中载下边跨跨中最大正弯矩及挠度工况
4		偏载下边跨跨中最大正弯矩及挠度工况
5	主墩墩顶截面	中载下主墩墩顶最大负弯矩工况
6		偏载下主墩墩顶最大负弯矩工况
7	主塔塔脚截面	中载下塔脚截面最大弯矩工况
8	主塔塔顶截面	中载下塔顶截面最大水平位移工况

静力试验荷载采用三轴载重汽车作为等效加载车辆,车辆参数见表4,具体要求如下:

(1)试验车装载后,要经地磅称重。称重主要指标有:前轴实际重量、后轴实际重量,满载后总重量。

(2)所有试验车辆均要称重,满载后车辆实际总重量应在400 kN左右,其重量误差在5%以内,并记录每辆试验车实际重量值。

2.3　加载控制

为了了解桥梁结构应变和变位随加载内力增加的变化关系和防止结构意外损坏,试验荷载需逐级

表4　试验加载车辆技术指标

轴距/m		轮距/m	重量/kN			
前轴与中轴	中轴与后轴		前轴	中轴	后轴	总重
3.5	1.4	1.8	80	160	160	400

增加。

静载试验分为3级加载,加载分级用车辆数量来控制,这样便于试验过程的车辆调配和指挥。根据实际加载车辆的位置,可以精确计算出加载效率,当最后一辆车加上后,就达到了试验加载的目标。在每一测试截面加载试验中,加载方式为单次逐级递加到最大荷载,然后分级卸载到零荷载。

加载采用等效内力法,即按照试验实际加载时在控制截面产生的控制内力值与设计荷载下的理论计算内力值等效的原则进行加载。限于篇幅,本文仅列出中载下中跨跨中最大正弯矩及挠度工况的加载示意图,见图4。

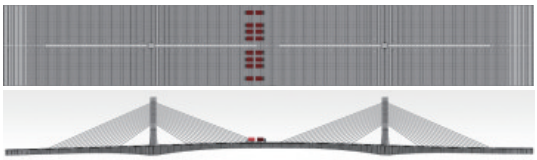


图4　中跨最大正弯矩和挠度工况下车辆布置

2.4　测点布置

针对主梁应变的测点布置在中跨及边跨试验断面上,每个断面布置16个应变测点,全桥主梁共布置48个应变测点;针对主塔应变的测点布置在塔根断面上,每个断面布置4个应变测点。

挠度测点沿纵桥向布置,其中主跨按8分点布置,边跨按4分点布置,横桥向每个断面东、西侧各布置1个测点。

箱梁断面应变和位移测点布置图见图5;主塔根部断面应变测点布置图见图6。

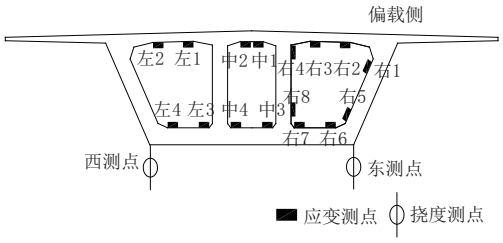


图5　箱梁断面应变和位移测点布置图

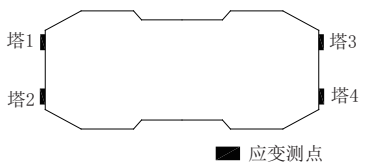


图6　主塔根部断面应变测点布置图

2.5　动载试验概述

依据《公路桥梁荷载试验规程》(JTG/T J21-01—2015),对桥梁进行动载试验。

(1)脉动试验。该试验主要测定桥梁的固有振动频率。通过布置在主跨跨中位置的941B拾振器,采用东方所INV3062T0采集系统测定桥跨结构在环境激励作用下的动力反应,采样频率为5.12 Hz。

(2)行车试验。在桥面无附加荷载及障碍物的工况下,用1辆40 t重车,分别以10、20、30 km/h的速度匀速驶过桥跨结构,利用BJQN-V型结构体多点位移检测系统记录桥梁在各行车速度下的动力反应。

3　静载试验数据分析

3.1　主梁挠度分析

限于篇幅,本节仅对关键工况进行分析。工况1下加载100%后主梁挠度测试结果见表5,全桥挠度曲线图见图7;工况3下加载100%后主梁挠度测试结果见表6,全桥挠度曲线图见图8。

表5　工况1下加载100%后主梁挠度测试结果

测点位置		总变形/mm	残余变形/mm	弹性变形/mm	理论值/mm	相对残余/%	校验系数
东测线	K1-1/4	13.6	0.3	13.3	18.9	2.21	0.70
	K1-1/2	23.0	0.5	22.5	29.8	2.17	0.75
	K1-3/4	16.1	0.2	15.9	20.7	1.24	0.77
	K2-1/8	-12.4	-1.0	-11.4	-18.8	8.06	0.61
	K2-1/4	-30.3	-1.5	-28.8	-41.7	4.95	0.69
	K2-3/8	-48.6	-1.8	-46.8	-64.3	3.70	0.73
	K2-1/2	-60.4	-2.1	-58.3	-79.8	3.48	0.73
	K2-5/8	-58.5	-1.3	-57.2	-75.0	2.22	0.76
	K2-3/4	-39.3	-1.8	-37.5	-52.0	4.58	0.72
	K2-7/8	-18.8	-1.0	-17.8	-25.1	5.32	0.71
	K3-1/4	26.6	2.0	24.6	31.8	7.52	0.77
	K3-1/2	30.8	2.4	28.4	35.8	7.79	0.79
	K3-3/4	21.8	1.7	20.1	26.5	7.80	0.76
西测线	K1-1/4	14.7	0.9	13.8	18.9	6.12	0.73
	K1-1/2	22.2	0.9	21.3	29.8	4.05	0.71
	K1-3/4	16.9	1.1	15.8	20.7	6.51	0.76
	K2-1/8	-12.7	-1.0	-11.7	-18.8	7.87	0.62
	K2-1/4	-30.9	-1.4	-29.5	-41.7	4.53	0.71
	K2-3/8	-50.3	-2.2	-48.1	-64.3	4.37	0.75
	K2-1/2	-64.4	-2.0	-62.4	-79.8	3.11	0.78
	K2-5/8	-60.8	-2.2	-58.6	-75.0	3.62	0.78
	K2-3/4	-41.7	-1.9	-39.8	-52.0	4.53	0.77
	K2-7/8	-18.6	-0.9	-17.7	-25.1	4.84	0.71
	K3-1/4	21.5	1.4	20.1	31.8	6.51	0.63
	K3-1/2	29.6	1.2	28.4	35.8	4.05	0.79
	K3-3/4	21.7	1.4	20.3	26.5	6.45	0.77

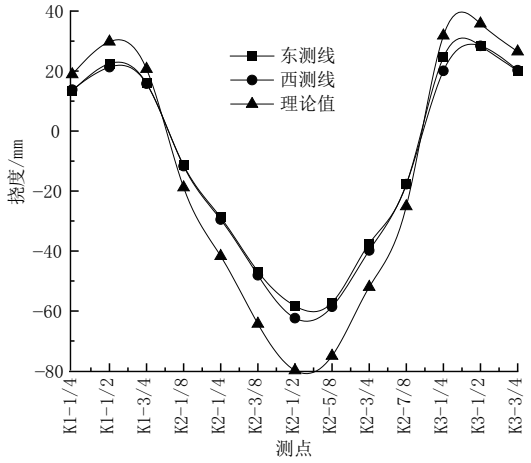


图7　工况1下全桥挠度曲线图

表6　工况3下加载100%后主梁挠度测试结果

测点位置		总变形/mm	残余变形/mm	弹性变形/mm	理论值/mm	相对残余/%	校验系数
东测线	K1-1/4	-5.2	0.2	-5.4	-8.2	-3.85	0.66
	K1-1/2	-8.0	-0.5	-7.5	-11.3	6.25	0.66
	K1-3/4	-4.9	-0.6	-4.3	-6.9	12.24	0.62
	K2-1/8	5.3	0.5	4.8	7.4	9.43	0.65
	K2-1/4	10.5	0.7	9.8	15.8	6.67	0.62
	K2-3/8	17.7	1.1	16.6	25.3	6.21	0.65
	K2-1/2	27.1	1.0	26.1	34.1	3.69	0.76
	K2-5/8	28.3	1.2	27.1	37.6	4.24	0.72
	K2-3/4	24.7	0.8	23.9	32.7	3.24	0.73
	K2-7/8	15.1	0.6	14.5	18.6	3.97	0.78
	K3-1/4	-21.6	-1.2	-20.4	-25.7	5.56	0.79
	K3-1/2	-41.9	-2.8	-39.1	-48.4	6.68	0.81
	K3-3/4	-26.1	-1.7	-24.4	-34.6	6.51	0.71
西测线	K1-1/4	-6.4	-0.2	-6.2	-8.2	3.12	0.76
	K1-1/2	-9.9	-0.7	-9.2	-11.3	7.07	0.81
	K1-3/4	-5.4	-0.2	-5.2	-6.9	3.70	0.75
	K2-1/8	5.1	0.3	4.8	7.4	5.88	0.65
	K2-1/4	11.0	0.6	10.4	15.8	5.45	0.66
	K2-3/8	18.4	0.1	18.3	25.3	0.54	0.72
	K2-1/2	25.1	1.0	24.1	34.1	3.98	0.71
	K2-5/8	28.4	0.8	27.6	37.6	2.82	0.73
	K2-3/4	25.3	0.9	24.4	32.7	3.52	0.75
	K2-7/8	15.3	0.9	14.4	18.6	5.88	0.77
	K3-1/4	-20.9	-0.8	-20.1	-25.7	3.83	0.78
	K3-1/2	-39.1	-1.0	-38.1	-48.4	2.56	0.79
	K3-3/4	-28.2	-0.9	-27.3	-34.6	3.19	0.79

由表5、表6可见:在试验荷载作用下,主梁各测点实测最大挠度与理论计算值相比均小于1.0,受力状态偏于安全。中跨、边跨荷载响应下最大挠度与计算跨径的比值分别为1/2 980和1/2 745,远小于《公路斜拉桥设计规范》(JTG/T 3365-01—2020)规定的1/500限值。

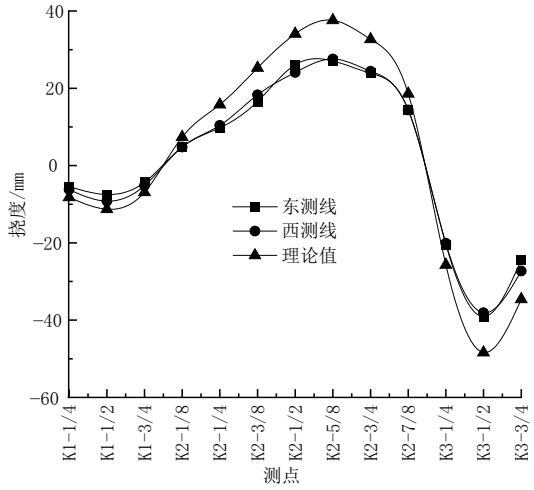


图8　工况3下全桥挠度曲线图

由图7、图8可见:在中跨、边跨最大挠度工况下,东、西侧挠度曲线形态与理论曲线基本一致,表明主梁纵向刚度分布均匀、受力合理。

3.2　应变分析

同理,本节也仅对关键工况进行分析。工况1下加载100%后中跨跨中截面应变测试结果见表7;工况3下加载100%后塔脚截面应变测试结果见表8。

由表7可知:中跨最大正弯矩工况下的应变校验系数范围为0.57~0.74,荷载卸载后,各测点相对残余均满足《公路桥梁荷载试验规程》要求,小于规定的20%限值,表明结构处于弹性受力阶段,承载能力满足要求。

由表8可知:塔脚最大弯矩工况下的主塔截面测点应变校验系数范围在0.68~0.86之间,各测点相对残余均满足《公路桥梁荷载试验规程》要求,小于规定的20%限值,表明结构处于弹性受力阶段,承载能力满足要求。

3.3　塔顶偏位分析

在工况8加载100%作用下,塔顶测点偏位测试结果见表9。

由表9可知:塔顶偏位的校验系数为0.73,塔顶测点的相对残余变形满足《公路桥梁荷载试验规程》要求,小于规定的20%限值[,表明结构处于弹性变形阶段。

3.4　索力测试分析

在工况1、工况3及工况5加载100%作用下,选取北边跨15#拉索作为测试对象,结果见表10。

由表10可知:边跨最大正弯矩工况下的索力校验系数范围为0.77~0.78,中跨最大正弯矩工况下的索力校验系数均为0.90,墩顶最大负弯矩工况下的

表 7　工况 1 下加载 100% 后中跨跨中截面应变测试结果

箱室	测点	总应变	弹性应变值	理论应变值	校验系数	残余应变值	相对残余值/%
右箱室(东侧)	右 1	-29.2×10^{-6}	-27.1×10^{-6}	-41.9×10^{-6}	0.65	-2.1×10^{-6}	7.19
	右 2	-36.7×10^{-6}	-35.2×10^{-6}	-53.2×10^{-6}	0.66	-1.5×10^{-6}	4.09
	右 3	-39.1×10^{-6}	-37.5×10^{-6}	-56.7×10^{-6}	0.66	-1.6×10^{-6}	4.09
	右 4	-33.5×10^{-6}	-32.3×10^{-6}	-47.8×10^{-6}	0.68	-1.2×10^{-6}	3.58
	右 5	35.5×10^{-6}	38.1×10^{-6}	61.1×10^{-6}	0.62	-2.6×10^{-6}	−7.32
	右 6	42.2×10^{-6}	43.4×10^{-6}	71.6×10^{-6}	0.61	-1.2×10^{-6}	−2.84
	右 7	41.9×10^{-6}	40.5×10^{-6}	71.6×10^{-6}	0.57	1.4×10^{-6}	3.34
	右 8	35.3×10^{-6}	37.1×10^{-6}	61.5×10^{-6}	0.60	-1.8×10^{-6}	−5.10
中箱室	中 1	-29.8×10^{-6}	-31.7×10^{-6}	-55.7×10^{-6}	0.57	1.9×10^{-6}	−6.38
	中 2	-30.3×10^{-6}	-32.4×10^{-6}	-55.7×10^{-6}	0.58	2.1×10^{-6}	−6.93
	中 3	50.2×10^{-6}	47.8×10^{-6}	71.6×10^{-6}	0.67	2.4×10^{-6}	4.78
	中 4	53.7×10^{-6}	51.6×10^{-6}	71.6×10^{-6}	0.72	2.1×10^{-6}	3.91
左箱室(东侧)	左 1	-30.3×10^{-6}	-33.1×10^{-6}	-56.7×10^{-6}	0.58	2.8×10^{-6}	−9.24
	左 2	-30.6×10^{-6}	-34.2×10^{-6}	-53.2×10^{-6}	0.64	3.6×10^{-6}	−11.76
	左 3	51.6×10^{-6}	49.7×10^{-6}	71.6×10^{-6}	0.69	1.9×10^{-6}	3.68
	左 4	55.2×10^{-6}	53.1×10^{-6}	71.6×10^{-6}	0.74	2.1×10^{-6}	3.80

表 8　工况 3 下加载 100% 后塔脚截面应变测试结果

测点号	实测值	实测弹性值	理论值	校验系数	残余值	相对残余值/%
塔 1	38.0×10^{-6}	32.3×10^{-6}	38.0×10^{-6}	0.85	5.7×10^{-6}	15.00
塔 2	35.0×10^{-6}	32.7×10^{-6}	38.0×10^{-6}	0.86	2.3×10^{-6}	6.52
塔 3	-27.7×10^{-6}	-28.1×10^{-6}	-41.1×10^{-6}	0.68	0.4×10^{-6}	−1.37
塔 4	-28.1×10^{-6}	-29.6×10^{-6}	-41.1×10^{-6}	0.72	1.5×10^{-6}	−5.41

表 9　塔顶测点偏位测试结果

测点	总变形/mm	残余变形/mm	弹性变形/mm	理论值/mm	相对残余/%	校验系数
主塔测点	23.5	1.6	21.9	29.9	6.81	0.73

表 10　索力测试结果

工况	测点号	索力增量值/kN	理论值/kN	校验系数
1	NBE15	222.6	246.5	0.90
	NBW15	220.8	246.5	0.90
3	NBE15	−87.8	−112.9	0.78
	NBW15	−87.2	−112.9	0.77
5	NBE15	133.0	184.3	0.72
	NBW15	132.0	184.3	0.72

索力校验系数均为 0.72,受力表现出较好的一致性和对称性。

4　动载试验数据分析

4.1　自振频率分析

经分析,桥梁竖向 1 阶实测频率为 0.593 8 Hz,理论基频为 0.385 8 Hz,0.593 8/0.385 8=1.54＞1.1,依据《公路桥梁承载能力检测评定规程》(TG/T J21—2011)第 5.9.2 条,该结构刚度良好。

4.2　行车试验数据分析

根据 2.5 节行车试验方法测定主跨跨中在行车车辆荷载作用下的动挠度曲线,结果见图 9 至图 11。

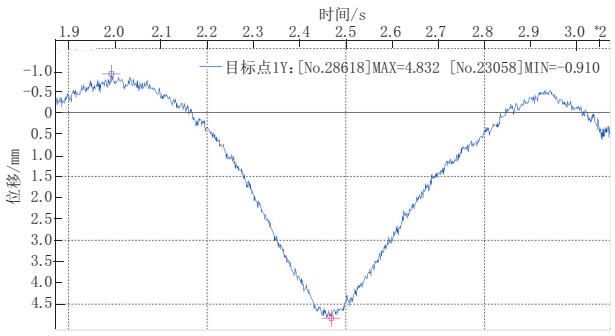


图 9　中跨在 10 km/h 行车速度下的动挠度曲线

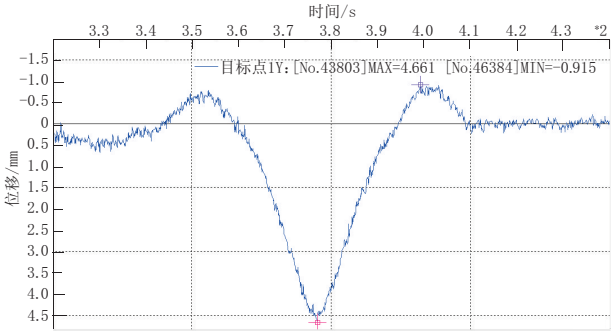


图 10　中跨在 20 km/h 行车速度下的动挠度曲线

由图 9 至图 11 可获得该桥的冲击系数,见表 11。

由表 11 可知,当重车行车速度为 10 km/h 时,活载冲击系数为 0.002;当重车行车速度为 20 km/h 时,活载冲击系数为 0.008;当重车行车速度为 30 km/h

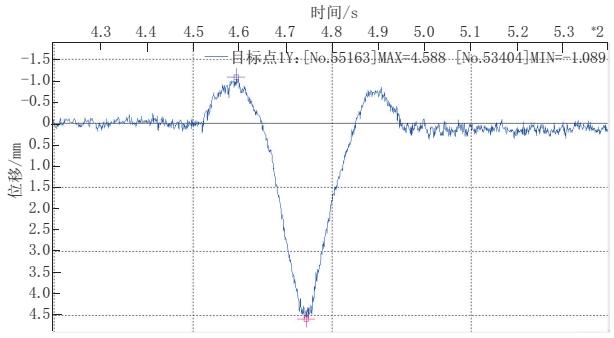


图 11　中跨在 30 km/h 行车速度下的动挠度曲线

时,活载冲击系数为 0.004。表明在不同行车速度下,冲击系数呈现出一致性,且均小于《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)第 4.3.2 条规定的 0.05。

表 11　中跨行车试验结果

测试部位	行车速度/(km·h^{-1})	最大动挠度幅值 f_{dmax}/mm	冲击系数μ
主跨跨中	10	4.832	0.002
	20	4.661	0.008
	30	4.588	0.004

5　结　语

(1)各工况下结构受力及变形校验系数均小于 1.0,各测点相对残余均小于规范限值,结构整体处于线弹性工作阶段,承载能力及刚度均满足设计要求。同时全桥实测挠度曲线分布规律与理论计算结果基本吻合,主梁纵桥向刚度分布正常。

(2)各工况索力校验系数均小于 1.0,结构整体处于弹性受力状态,且东西两侧索力校验系数基本一致,桥梁结构受力反应对称性良好。

(3)动载试验中桥跨主梁实测竖向 1 阶大于理论计算 1 阶,表明结构整体刚度储备充足。

(4)行车试验表明在不同车速作用下,桥梁结构振动响应平稳,未出现异响、过大振动等异常现象,运营性能良好。

(5)通过成桥荷载试验评定,该桥承载能力、刚度及动力特性均满足设计与规范要求;试验方法与分析结果可为同类型大跨度预应力混凝土矮塔斜拉桥的设计优化、施工及成桥检测评估提供直接参考。

参考文献:

[1] 周世雄,吴健宇,高锐涛.矮塔斜拉桥有限元分析及静荷载试验评价[J].交通世界,2025(32):156-159.
[2] 马明雷.基于动静载试验的斜拉桥初始状态研究[J].城市道桥与防洪,2023(5):177-181;23.
[3] 黄波,沈洁,王盼盼,等.预应力混凝土矮塔斜拉桥静载试验研究[J].建筑结构,2023,53(增刊1):1733-1736.
[4] 桂水荣,雷鸣宇,陈水生,等.矮塔斜拉桥动静力特性对结构参数敏感性影响分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2023,39(1):79-87.
[5] 彭放枚,侯攀.双塔单索面矮塔斜拉桥荷载试验承载能力评估[J].河南科技,2021,40(13):85-89.
[6] 肖鸣,杨鑫炎.超宽三塔斜拉桥结构静动力行为试验研究[J].城市道桥与防洪,2025(12):78-82.
[7] 祝孝成,刘晋华.某双塔单索面预应力混凝土矮塔斜拉桥成桥荷载试验研究[J].北方交通,2020(9):35-38.
[8] 苏鹏,李恒,阳浩.独塔双索面斜拉桥荷载试验研究[J].公路交通技术,2024,40(2):133-142;149.
[9] 杨茂华,黎东龙.某矮塔单索面斜拉桥荷载试验分析[J].公路与汽运,2019(4):139-142;145.
[10] 赖锦兴.双塔单索面预应力混凝土斜拉桥荷载试验分析[J].福建交通科技,2021(9):22-26;40.
[11] 刘芳智.某五塔单索面矮塔斜拉桥动静载荷试验研究[J].工程技术研究,2023,8(11):30-32.
[12] 刘远凯.大跨度双塔扇形索面斜拉桥荷载试验研究[J].西部交通科技,2024(6):103-105;145.
[13] 许航,朱传超.独塔混合梁斜拉桥荷载试验研究[J].工程建设与设计,2024(3):.105-107.
[14] 张家豪,李逢祥,刘治,等.独塔双索面斜拉桥荷载试验研究[J].北方建筑,2026,11(1):92-96.