

DOI: 10.7511/jslx20230503001

基于模型试验的双缆多塔悬索桥力学特性研究

柴生波, 王克文, 王秀兰*, 吴 骞

(西安科技大学 建筑与土木工程学院, 西安 710054)

摘要:为验证双缆多塔悬索桥力学特性,基于理论公式和数值分析开展了双缆多塔悬索桥模型试验。根据设计参数分别建立了传统体系和双缆体系有限元模型,对比分析了两种体系结构变形和桥塔应力;模型试验验证了双缆体系塔梁变形公式精度和动力特性。研究表明,双缆体系试验模型塔梁变形理论值与实测值及模拟值吻合良好,说明试验模型整体精度较好,验证了理论公式精度。实测与有限元模拟发现第一阶振型模态均为加劲梁一阶反对称竖弯,结构固有频率实测值与模拟值误差为6.97%,验证了模型结构振型模态和固有频率。传统体系中塔位移和加载跨加劲梁挠度是双缆体系的3倍左右,非加载跨加劲梁挠度为4倍左右;传统体系中塔塔底应力是双缆体系的3倍左右,证明双缆体系较传统体系能够有效减小中塔位移、加劲梁挠度和中塔塔底应力。

关键词:桥梁工程;力学特性;模型试验;多塔悬索桥;双缆;振型模态

中图分类号:U448.25;O302

文献标志码:A

文章编号:1007-4708(2024)06-1020-09

1 引言

多塔悬索桥在不平衡活载作用下,中塔由于缺少边跨主缆有效约束,塔顶产生较大纵向位移,主缆与鞍座间抗滑安全性难以保障^[1-3]。采用双缆体系能增大桥塔纵向刚度,现有对双缆多塔悬索桥的研究以理论分析和数值模拟为主要研究手段。张清华等^[4]对双缆体系特有的上下缆荷载分配和上下缆垂跨比等因素进行研究,对比分析了传统体系和双缆体系悬索桥竖向刚度差异^[5],发现双缆体系能够有效提高结构竖向刚度。柴生波等^[6,7]通过一系列假定推导了双缆体系对桥塔的约束刚度表达式及荷载在上下缆之间的转移量与塔顶位移的关系,研究了单跨施加均布荷载时加载跨挠度求解方法;王秀兰等^[8]以主缆与中塔鞍座的抗滑安全系数和加劲梁挠度为控制指标,分析双缆体系主缆垂跨比对结构变形、主缆抗滑稳定性及主缆用钢量的影响,得到了双缆体系适宜垂跨比取值。柴生波等^[9-11]通过构建等效弹簧模型,提出了一种计算加载跨两侧纵向约束刚度的解析方法,推导了双缆多塔悬索桥加载跨挠度的解析计算公式。王秀兰

等^[12]基于结构布置形式及结构参数进行主缆抗滑稳定性研究,提出采用同一根主缆作为相邻两跨的上缆和下缆的一种新型双缆布置方案,研究了新体系中各参数之间的关系,推导了双缆多塔悬索桥的抗滑安全系数。柴生波等^[13]通过数值模拟,研究双缆体系空缆下主缆抗滑安全性,得出满足抗滑性能的主缆垂度范围。

现阶段双缆多塔悬索桥研究未开展模型试验,为进一步明确双缆多塔悬索桥力学特性,验证已有计算理论,本文开展了双缆多塔悬索桥模型试验。通过试验实测塔梁变形及动力特性,并与理论值和模拟值对比,验证双缆体系理论公式和动力特性。

2 基本理论

2.1 主缆面积

多塔悬索桥最不利荷载工况为单跨满载,如图1所示,此时中塔塔顶位移及塔底弯矩最大^[5-7]。

为解决多塔悬索桥该荷载工况下中塔处主缆滑移问题,采用上缆变下缆布局^[12],如图2所示。

因采用同一根主缆,故上下缆面积相等,令主缆面积为 A_c ,根据文献^[12]

收稿日期:2023-05-03;修改稿收到日期:2023-06-07.

基金项目:国家自然科学基金(51808448,51608440)资助项目.

作者简介:王秀兰*(1986-),女,博士,副教授(E-mail:wxl2011wzl@163.com).

引用本文:柴生波,王克文,王秀兰,等.基于模型试验的双缆多塔悬索桥力学特性研究[J].计算力学学报,2024,41(6):1020-1028.

CHAI Sheng-bo, WANG Ke-wen, WANG Xiu-lan, et al. Study on mechanical properties of double-cable multi-tower suspension bridge based on model test [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(6): 1020-1028.

$$\frac{q_t}{q_b} = \frac{8f_t[\sigma]\cos[\arctan(4n_t)] - \gamma L^2}{8f_b[\sigma]\cos[\arctan(4n_b)] - \gamma L^2} \quad (1)$$

$$A_c = \frac{q_t f_b \cos[\arctan(4n_b)] - q_b f_t \cos[\arctan(4n_t)]}{\gamma f_t \cos[\arctan(4n_t)] - \gamma f_b \cos[\arctan(4n_b)]} \quad (2)$$

式中 q_t 和 q_b 分别为上下缆承担恒载, f_t 和 f_b 分别为上下缆垂度, n_t 和 n_b 分别为上下缆垂跨比, L 为跨度, A_c 为主缆面积, γ 为主缆重度, $[\sigma]$ 为主缆容许应力。

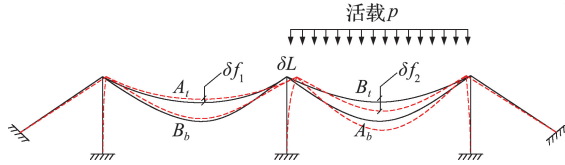


图1 双缆体系变形
Fig. 1 Deformation of double-cable system

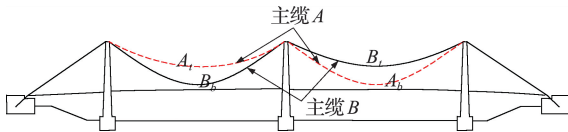


图2 双缆体系主缆布置
Fig. 2 Layout of cable of double-cable system

2.2 双缆体系主缆纵向刚度

通过简化双缆多跨悬索桥为等效弹簧模型,推导了双缆体系主缆纵向刚度^[9-12]

$$K_c = \frac{L^2}{8\delta L} \left(\frac{w_t + a\delta L}{f_t - b\delta L} + \frac{w_b - a\delta L}{f_b - b\delta L} - \frac{w_t}{f_t} - \frac{w_b}{f_b} \right)$$

$$a = \frac{3}{16L} \left(\frac{1}{f_t} - \frac{1}{f_b} \right) / \left(\frac{1}{E_t A_t u(n_t)} + \frac{1}{E_b A_b u(n_b)} \right) \quad (3)$$

$$b = \frac{3L}{16} \left(\frac{1}{f_t} - \frac{1}{f_b} \right) / \left(1 + \frac{E_t A_t u(n_t)}{E_b A_b u(n_b)} \right) - \frac{3L}{16f_t}$$

$$u(n) = 8 \left(\frac{16}{3} n^2 - \frac{128}{5} n^4 \right) / \left(1 + \frac{8}{3} n^2 - \frac{32}{5} n^4 \right)$$

式中 E_t 和 E_b 分别为上下缆弹性模量, A_t 和 A_b 分别为上下缆面积, δL 为活载作用下中塔塔顶位移, w_t 和 w_b 分别为上下缆所承担恒载。最不利荷载工况下,中塔塔顶不平衡水平力解析式为

$$\delta H = \frac{P_t L^2}{8f_t} + \frac{P_b L^2}{8f_b} - K_c \delta L \quad (4)$$

式中 P_t 和 P_b 分别为上下缆所承担活载,其中 $P_b = P u(n_b) / [u(n_b) + u(n_t)]$, $P_t = P - P_b$ 。中塔塔顶位移为

$$\delta L = \delta H / (2K_c + K_t) \quad (5)$$

式中 K_t 为单侧桥塔刚度。在最不利荷载工况下,双缆体系中塔向加载跨一侧产生纵向位移,非加载跨主缆垂度随之发生改变,恒载在非加载跨的上下缆间转移,如图1所示。荷载转移量为

$$q_z = \left\{ \frac{3}{16L} \left(\frac{1}{f_t} - \frac{1}{f_b} \right) / \left(\frac{1}{E_t A_t u(n_t)} + \frac{1}{E_b A_b u(n_b)} \right) \right\} \delta L \quad (6)$$

恒荷载转移后非加载跨垂度变小, n_b 变为 n'_b ,即

$$n'_b = \left[f_b - \left(\frac{3}{16} \frac{L}{f_b} - \frac{n_b}{2} \right) \delta L \right] / (L + \delta L) \quad (7)$$

得加载跨最大挠度解析式为

$$\delta f_2 = \left(\frac{3}{16} \frac{L}{f_b} - \frac{n_b}{2} \right) \delta L + \frac{(q_z + p_b)(L - \delta L)^2}{E_b A_b u(n_b)} \quad (8)$$

得非加载跨最大挠度解析式为

$$\delta f_1 = \left(\frac{3}{16} \frac{L}{f_b} - \frac{n_b}{2} \right) \delta L + \frac{q_z(L + \delta L)^2}{E_b A_b u(n_b)} \quad (9)$$

3 模型设计及试验方案

3.1 模型设计

试验模型主要参数列入表1,试验考虑材料相似性,主缆及吊索选用钢丝绳,加劲梁采用钢板,桥塔采用钢材^[14-16],构件材料参数列入表2。双缆多塔悬索桥目前无实桥,考虑实桥成桥合理性,模型试验相似性理论考虑几何条件、物理条件和边界条件。再结合理论公式和数值分析拟定设计参数、荷载工况和试验方案^[17,18],试验模型为双缆两跨悬索桥,主缆均通过吊索与桥面系相连,模型如图3和图4所示。桥塔由鞍座、塔柱和底座三部分组成,横梁带螺杆以调节不同支撑边界,钢箱梁及桥塔设计参数列入表3。钢箱梁各节段均设加劲肋,中塔处(为非标准段长度最长)数量最多,其余标准段数量相同,节段间通过高强螺栓栓接。钢箱梁中布置圆钢管横梁,其两端开孔与吊索相连,桥面系布置如图5所示。锚碇用方形钢管焊接箱体各面,

表1 试验模型主要参数(单位:mm)

Tab. 1 Principal parameters of the test model (unit:mm)

参数	数值	参数	数值
模型全长 L	24413	下缆垂度 f_b	1190.5
主跨跨度 l	8333	桥塔高度 H	2500
上缆垂度 f_t	694.4	吊杆间距 d	250

表2 构件材料参数

Tab. 2 Parameters of component material

构件	材料	E/GPa	$\gamma/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$
桥塔	Q235	206	78.5
钢箱梁	Q235	206	78.5
横梁	Q235	206	78.5
主缆	钢丝绳	89.25	78.5
吊杆	钢丝绳	89.25	78.5

最后用螺栓栓接。拟定双缆体系参数^[19]为 $q = 3 \text{ kN/m}$, $n_t = 1/12$, $n_b = 1/7$, $[\sigma] = 200 \text{ MPa}$, $\gamma = 78.5 \text{ kN/m}^3$, 将以上参数代入式(1,2)得 $q_t = 1.166 \text{ kN/m}$, $q_b = 1.834 \text{ kN/m}$, $A_c = 7.854 \times 10^{-5}$

m^2 , $D_c = 10 \text{ mm}$, 主缆均选用直径 10 mm 钢丝绳, 经理论计算吊索均选用直径 4 mm 钢丝绳, 依据以上参数初步建立双缆体系有限元模型, 进行塔梁变形理论值试算。

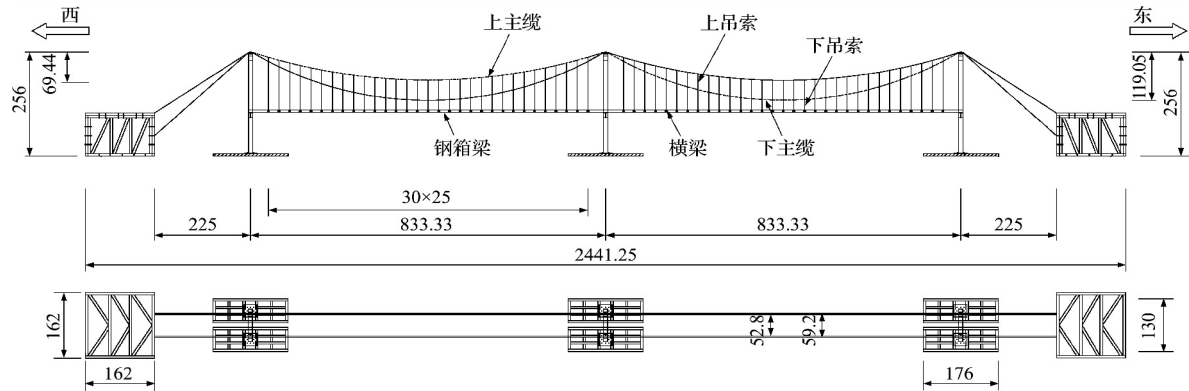


图3 试验模型设计(单位:cm)
Fig. 3 Design diagram of test model (unit:cm)



(a) 成桥模型 (a) Model of the bridge-forming state
(b) 上缆变下缆布局 (b) Top to bottom cable layout
(c) 加载 (c) Loading
(d) 加劲梁测点布置 (d) Layout of stiffening girder measure point

图4 试验模型
Fig. 4 Test model

表3 构件设计参数

Tab. 3 Designing parameters of component

分项	钢箱梁					塔柱			
	宽度/mm	高度/mm	顶板厚/mm	底板厚/mm	腹板厚/mm	边长/mm	壁厚/mm	重量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$	面积/ cm^2
数值	480	60	3	2	2	100	3.5	16.981	21.632

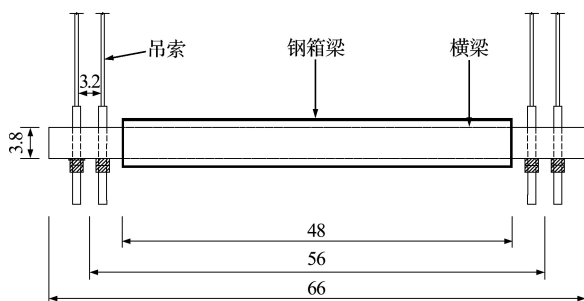


图5 桥面系布置(单位:cm)
Fig. 5 Layout of bridge deck system (unit:cm)

3.2 测点布置及试验方案

试验荷载工况, 活载 $P = 0.5 \text{ kN/m}$, 考虑满跨加载(最不利荷载工况)和半跨加载^[19]如图6所示。

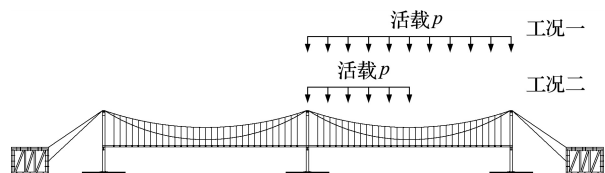


图6 荷载工况加载
Fig. 6 Loading diagram of load condition

试验模型自重较小,为达 3 kN/m 恒载需加设混凝土块配重。第一阶段先拼装加劲梁,一期自重均由上缆承担;第二阶段施加恒载配重,上下缆依竖向垂度完成恒载分配,上缆恒载为一期自重+二期分配重量;下缆恒载为二期分配重量。实际恒载列入表 4,据此修正有限元模型和理论值。

表 4 试验实际恒载(单位:kN/m)
Tab. 4 Trial actual constant load(unit:kN/m)

主缆	一期自重	恒载配重	自然分配	实际恒载
上缆	0.347		0.729	1.076
下缆	—	2.653	1.924	1.924

试验模型的成桥垂度值如图 7 所示,可知上缆垂度设计值和实际值最大差值为 2.88%,下缆为 2.82%,均在 3% 以内,据实际恒载和垂度修正有限元模型和理论值。试验前利用模型自重消除主缆和吊杆非弹性变形,静力量测包括桥塔位移和加劲梁变形,加劲梁变形测点为两跨 1/4 跨、1/2 跨和 3/4 跨处,桥塔位移测点为中塔和两个边塔;动力量测包括试验模型振型模态与结构固有频率,各跨中均布置一个磁电式速度传感器,如图 8 和图 9 所示。

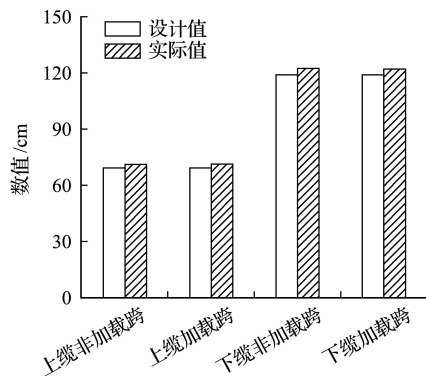


图 7 模型成桥垂度值
Fig. 7 Sag value of completion state of model



(a) 中塔塔顶测点
(a) Middle tower-top measuring point
(b) 全跨加劲梁测点
(b) Full-span stiffening girder measurement point

图 8 静力特性测点
Fig. 8 Measuring point of static characteristic



(a) 传感器安装
(a) Sensor installation
(b) 数据采集
(b) Data acquisition

图 9 动力特性测点
Fig. 9 Measuring point of dynamic characteristic

4 主要试验结果

4.1 理论计算值

由表 3 桥塔数据计算得 $K_t = 82.93 \text{ kN/m}$, 求解主缆纵向刚度 K_c , 令 $\delta L_0 = 0.001 \text{ m}$, 反复迭代得 $K_c = 75.357 \text{ kN/m}$; $\delta L = 6.875 \text{ mm}$ 。双缆体系满跨加载时非加载跨恒载由下缆向上缆转移, 需求出荷载的转移量, 根据式(6~9)计算加载跨及非加载跨跨中竖向挠度理论值, 结果列入表 5。

表 5 理论计算值
Tab. 5 Theoretical calculating values

项次	数值
恒载集度 $q/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	3
活载集度 $p/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	0.5
荷载转移量 $q_z/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	0.136
主缆弹性模量 $E_c/\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$	8.925×10^7
单根主缆面积 A_c/m^2	7.854×10^{-5}
主缆变化垂度 n'_b	0.146
主缆竖向刚度 $u(n'_b)$	0.770
塔顶水平位移 $\delta L/\text{mm}$	6.875
非加载跨竖向挠度 $\delta f_1/\text{mm}$	10.036
加载跨竖向挠度 $\delta f_2/\text{mm}$	14.685

4.2 有限元计算值

利用 Midas 程序分别建立传统体系和双缆体系有限元模型, 吊索及主缆为桁架单元, 加劲梁和桥塔为梁单元。半漂浮体系边界条件为主梁与主塔下横梁主从约束, 约束主梁的竖向和横向位移; 全漂浮体系主梁无竖向约束。分别计算上下缆及吊杆受力以初始内力赋予有限元模型, 索力公式 $H = ql^2/8f$, 其中 f 为主缆成桥垂度, q 为恒载, l 为跨度。钢箱梁中圆钢管为横梁, 外径为 38 cm, 构件材料列入表 2。模型自重 0.347 kN/m; 根据等效缆公式传统体系 $f_c = 1/9^{[7]}$, 两种体系参数列入表 6, 基于参数表建立两种体系有限元模型。

表6 双缆体系和传统体系参数
Tab.6 Table of double-cable system and traditional system parameters

类别	项次	数值
双缆体系	恒载集度 $q/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	3
	活载集度 $p/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	0.5
	上缆垂度 f_u/mm	694.4
	下缆垂度 f_b/mm	1190.5
	单根主缆直径 D_c/mm	10
	上吊索直径/mm	4
	下吊索直径/mm	4
传统体系	恒载集度 $q/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	3
	活载集度 $p/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	0.5
	主缆垂度 f_c/mm	925.92
	单根主缆直径 D_c/mm	20
	吊索直径/mm	8

试验钢箱梁节段间用钢垫板及螺栓连接,加劲梁整体刚度有折减,经计算折减系数为0.6,据此调整有限元模型,两种体系空间模型如图10所示。

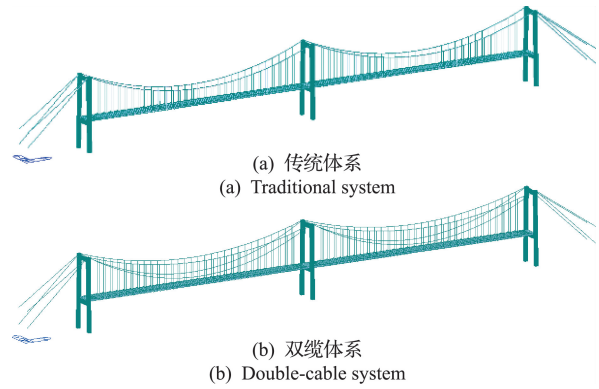


图10 多塔悬索桥有限元模型

Fig.10 Finite element model of multi-tower suspension bridge

4.2.1 塔梁变形有限元计算值

两种体系在满跨加载、半跨加载作用下塔梁变形模拟值列入表7和表8。由表7可知,满跨加载作用下传统体系的中塔位移和加载跨加劲梁竖向挠度是双缆体系的3倍左右,非加载跨加劲梁竖向挠度为4倍左右。由表8可知,半跨加载作用下传

表7 满跨加载塔梁变形(单位:mm)

Tab.7 Deformations of tower-girder under the full-span load(unit:mm)

类别	中塔位移	非加载跨			加载跨		
		L/4	L/2	3L/4	L/4	L/2	3L/4
双缆体系	7.055	8.816	10.139	7.764	-11.499	-15.253	-12.774
传统体系	23.368	32.543	39.296	29.201	-34.25	-45.394	-37.392

表8 半跨加载塔梁变形(单位:mm)

Tab.8 Deformations of tower-girder under the half-span load(unit:mm)

类别	中塔位移	非加载跨			加载跨		
		L/4	L/2	3L/4	L/4	L/2	3L/4
双缆体系	3.290	4.462	5.214	2.742	-10.269	-7.650	-1.211
传统体系	5.651	8.327	9.861	6.275	-12.931	-11.372	-4.437

统体系的中塔位移和非加载跨加劲梁竖向挠度是双缆体系的近2倍,传统体系加载跨加劲梁竖向挠度明显大于双缆体系。以上数据说明双缆体系能有效减小中塔塔顶位移和加劲梁竖向挠度,双缆体系主缆竖向刚度较传统体系更大。

4.2.2 中塔塔底应力有限元计算值

桥塔由塔柱、鞍座和底座组成,满跨加载作用下两种体系中塔塔底应力如图11所示,可知传统体系中塔塔底应力是双缆体系的3倍左右,说明双缆体系能明显减小中塔塔底应力。

4.3 满跨加载试验结果

4.3.1 全漂浮体系边界条件

试验模型在全漂浮体系边界条件下,塔顶水平位移 δL 、非加载跨竖向挠度 δf_1 和加载跨竖向挠度

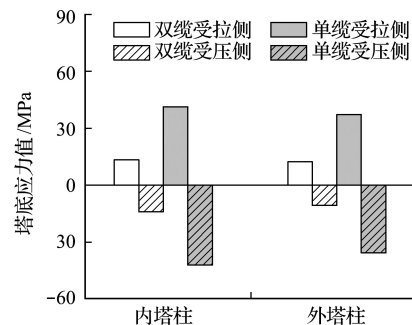


图11 中塔应力值

Fig.11 Stress values of middle-tower

δf_2 理论值列入表5,由表5可知, $\delta L = 6.875 \text{ mm}$, $\delta f_1 = 10.036 \text{ mm}$, $\delta f_2 = 14.685 \text{ mm}$ 。边塔内外塔柱塔顶水平位移 δL 实测值不完全相同,经实测差值在 $\pm 0.05 \text{ mm}$ 内,最大误差 1.5%,符合要求,边

塔塔顶位移和加劲梁水平位移如图 12 所示,模拟值和实测值测点对应(变形正负号参考 Civil 程序坐标,下同),可知以上数据中非加载跨边塔塔顶位移实测值与模拟值差值最大为 9.60%,说明全漂浮体系及满跨加载下试验模型实测值与模拟值符合程度良好,试验模型具有良好的精度。中塔位移及加劲梁挠度理论值、模拟值和实测值如图 13 所示,可知中塔水平位移 δL 理论值、模拟值和实测值三者最大差值为 2.44%;非加载跨竖向挠度 δf_1 为 0.86%;加载跨竖向挠度 δf_2 为 3.80%,差值均在 5%以内,说明理论值与模拟值及实测值吻合程度良好,计算公式具有较高精度。

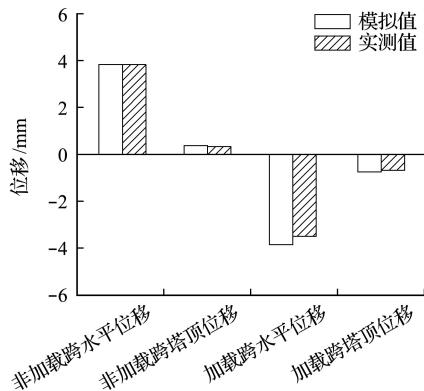


图 12 边塔塔顶及加劲梁水平变形
Fig. 12 Horizontal deformation of the side tower-top and stiffening girder

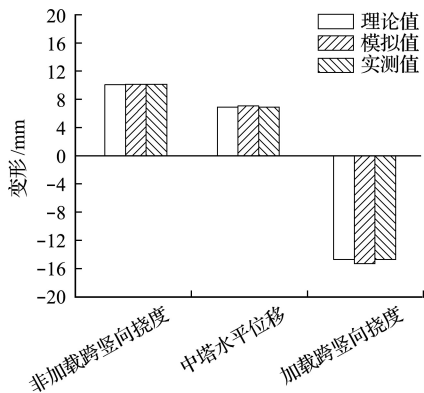


图 13 中塔塔顶及加劲梁跨中变形
Fig. 13 Deformation of middle tower-top and the mid-span of stiffening girder

4.3.2 半漂浮体系边界条件

在半漂浮体系边界条件下塔梁位移如图 14 所示(图中 L 为加载跨, NL 为非加载跨,下同),可知加载跨边塔塔顶位移实测值及模拟值差值最大为 8.50%;加载跨加劲梁跨中挠度差值为 7.93%,桥塔及加劲梁位移实测值与模拟值差值均在 10%以内,说明满跨加载及半漂浮体系下实测值与模拟值吻合程度良好。

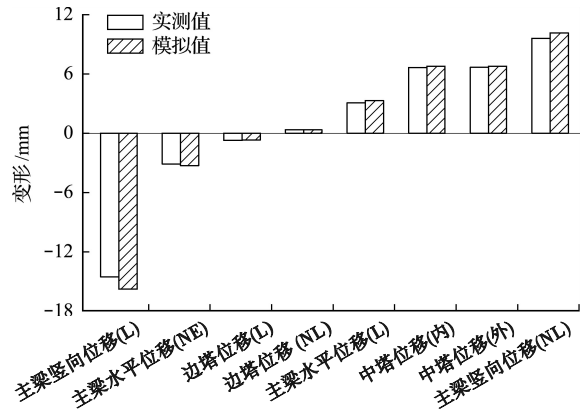
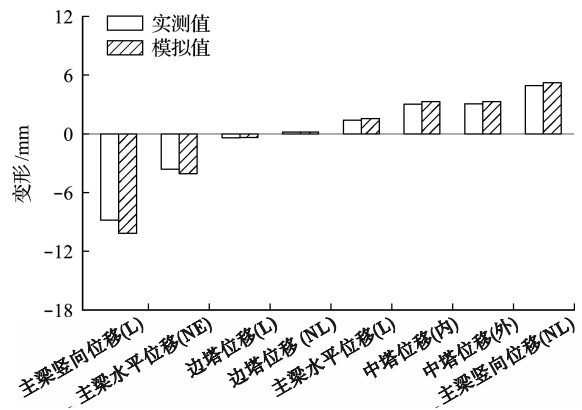


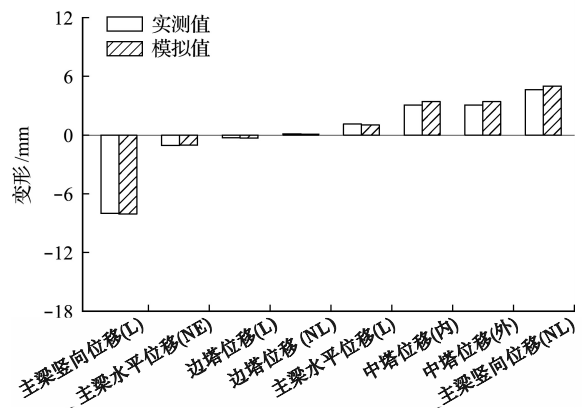
图 14 满跨加载半漂浮体系塔梁变形
Fig. 14 Deformations of tower-girder of semi-floating system under the full span load

4.4 半跨加载试验结果

半跨加载作用下,加载跨加劲梁最大竖向变形在 1/4 跨附近,全漂浮体系和半漂浮体系的塔梁位移结果如图 15 所示。从图 15(a)可以看出,加载跨加劲梁竖向挠度实测值与模拟值差值最大为 13.36%,原因是半跨加载时中塔处加劲梁节段加劲肋比标准段数量多,故局部刚度较大,故跨中竖向挠度实测



(a) 全漂浮体系
(a) Full-floating system



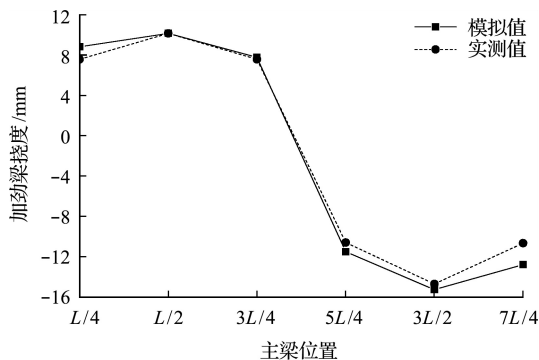
(b) 半漂浮体系
(b) Semi-floating system

图 15 半跨加载塔梁变形
Fig. 15 Deformations of tower-girder under the half span load

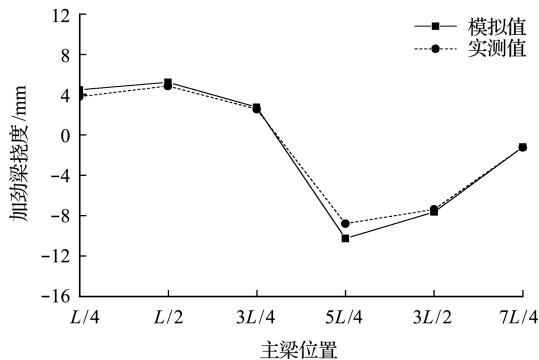
值较小,其余差值均在 15% 以内;从图 15(b)可以看出,非加载跨边塔塔顶位移实测值与模拟值差值最大为 14.53%,原因是半漂浮体系的竖向支撑分担了少量桥面活载,边塔实际变形相对较小。说明满跨加载和半跨加载作用下模型实测值与模拟值符合良好,双缆静力变形特性得到验证。

4.5 塔梁变形结果对比

满跨加载和半跨加载作用下双缆体系加劲梁挠度模拟值和实测值如图 16 所示。从图 16(a)可以看出,满跨加载作用下双缆体系加载跨加劲梁跨中挠度模拟值与实测值差值为 3.66%;主梁 $7L/4$ (加载跨,下同)处模拟值与实测值差值最大为 16.7%,原因是加劲梁端部的吊索受力较大,故实测值偏小,其余位置两者差值均在 15% 以内。从图 16(b)可以看出,半跨加载作用下双缆体系加载跨加劲梁 $L/4$ 处模拟值与实测值差值为 14.25%,其余位置差值均在 15% 以内。说明双缆体系加劲梁挠度模拟值与实测值拟合良好,双缆体系模型试验具有良好的精度。



(a) 满跨加载
(a) Full-span loading



(b) 半跨加载
(b) Half-span loading

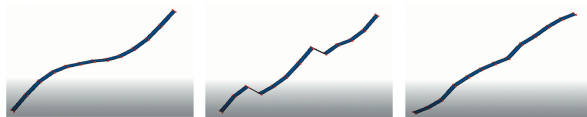
图 16 加劲梁挠度值

Fig. 16 Deflection value of stiffening girder

4.6 振型模态试验结果

恒载作用下加劲梁振型模态测量采用人工激励方式,利用 DHDAS 动态信号采集分析系统输

出测量结果,实测得出第一阶振型模态为加劲梁一阶反对称竖弯;第二阶振型模态为加劲梁二阶反对称竖弯;第三阶振型模态为加劲梁二阶正对称竖弯,如图 17 所示。其均与有限元模拟结果相同,试验模型振型模态与结构固有频率主要对比第一阶模态。模型试验结构固有频率模拟值与实测值如图 18 所示,可以看出,第一阶模态结构固有频率模拟值与实测值误差为 6.97%,说明实测值与模拟值吻合良好,振型模态和结构固有频率得到了验证。



(a) 第一阶模态 (a) First-order mode
(b) 第二阶模态 (b) Second-order mode
(c) 第三阶模态 (c) Third-order mode

图 17 试验模型振型模态实测值

Fig. 17 Measured value of the vibration mode of the test model

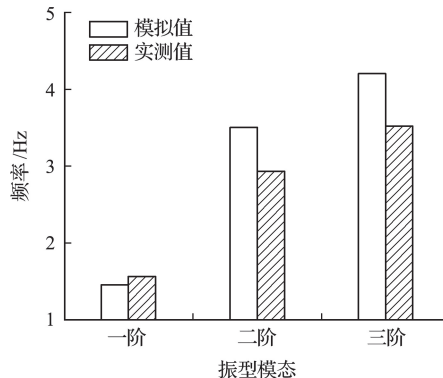


图 18 试验模型振型模态结果

Fig. 18 Results of the vibration mode of the test model

5 结论

(1) 全漂浮体系和半漂浮体系边界条件下,满跨加载双缆多塔悬索桥模型试验塔梁变形实测值与模拟值误差均在 10% 以内;半跨加载在 15% 以内,说明试验模型整体精度良好。

(2) 在全漂浮体系及满跨加载作用下,双缆多塔悬索桥加载跨跨中挠度理论与实测值及模拟值最大误差为 3.80%;其余误差均在 5% 以内,三者吻合程度良好,说明理论计算公式具有较高的精度。

(3) 满跨加载作用下传统体系的中塔位移和加载跨加劲梁挠度模拟值是双缆体系的 3 倍左右,非加载跨加劲梁挠度为 4 倍左右;半跨加载作用下传统体系的中塔位移和非加载跨加劲梁挠度模拟值是双缆体系的近 2 倍;传统体系中塔塔底应力模拟值是双缆体系的 3 倍左右,说明双缆体系能有效减小中塔塔顶位移、加劲梁挠度和中塔塔底应力。

(4) 双缆多塔悬索桥试验模型振型模态和结

构固有频率模拟值与实测值主要对比第一阶模态,实测与有限元模拟得出第一阶振型模态均为加劲梁一阶反对称竖弯,试验模型第一阶模态结构固有频率实测值与模拟值误差为 6.97%,两者吻合良好,验证了双缆体系振型模态和试验模型固有频率。

参考文献(References):

- [1] Gimsing P N J. *Cable Supported Bridges: Concept and Design*[M]. Chi Chester: John Wiley, 1997.
- [2] Fukuda T. Analysis of multispan suspension bridges [J]. *Journal of the Structural Division*, 1967, **93**(3): 63-86.
- [3] Daniel R A, Van Dooren F J, De Meijer R H. Comparison of a single and double eain span suspension bridge for the western Scheldt crossing [A]. 34th International Symposium on Bridge and Structural Engineering [C]. 2010.
- [4] 张清华,张莹,程震宇,等.双缆悬索桥的静力特性及其关键影响因素[J].西南交通大学学报,2020, **55**(2): 238-246. (ZHANG Qing-hua, ZHANG Ying, CHENG Zhen-yu, et al. Static behavior and key influencing factors of double-cable suspension bridge [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2020, **55**(2): 238-246. (in Chinese))
- [5] 柴生波,肖汝诚,孙斌.双缆悬索桥体系的力学特性(I)[J].华南理工大学学报(自然科学版),2011, **39**(12): 159-164. (CHAI Sheng-bo, XIAO Ru-cheng, SUN Bin. Mechanical properties of double-cable suspension bridge system (I) [J]. *Journal of South China University of Technology* (Natural Science Edition), 2011, **39**(12): 159-164. (in Chinese))
- [6] 柴生波,肖汝诚,孙斌.双缆悬索桥体系的力学特性(II)[J].华南理工大学学报(自然科学版),2012, **40**(2): 23-28. (CHAI Sheng-bo, XIAO Ru-cheng, SUN Bin. Mechanical properties of the double main cables suspension bridge (II) [J]. *Journal of South China University of Technology* (Natural Science Edition), 2012, **40**(2): 23-28. (in Chinese))
- [7] 柴生波,肖汝诚.双缆悬索桥体系的力学特性(III)[J].华南理工大学学报(自然科学版),2013, **41**(8): 120-126. (CHAI Sheng-bo, XIAO Ru-cheng. Mechanical properties of double main cable suspension bridge (III) [J]. *Journal of South China University of Technology* (Natural Science Edition), 2013, **41**(8): 120-126. (in Chinese))
- [8] 王秀兰,张云龙,柴生波,等.双缆多塔悬索桥主缆垂跨比的合理取值[J].公路交通科技,2021, **38**(7): 51-59. (WANG Xiu-lan, ZHANG Yun-long, CHAI Sheng-bo, et al. Reasonable value of main cable sag span ratio of double-cable multi-pylon suspension bridge [J]. *Journal of Highway and Transportation Technology*, 2021, **38**(7): 51-59. (in Chinese))
- [9] Chai S B, Xiao R C, Li X N. Longitudinal restraint of a double-cable suspension bridge [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2014, **19**(4): 06013002.
- [10] Wang X L, Chai S B, Xu Y. Deformation characteristics of double-cable multispan suspension bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, **21**(4): 06015007.
- [11] Wang X L, Chai S B. Determining the middle tower stiffness value in an in-plane double-cable triple-tower suspension bridge [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2018, **23**(7): 06018001.
- [12] Wang X L, Chai S B, Xu Y. Sliding resistance of main cables in double-cable multispan suspension bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2017, **22**(3): 06016011.
- [13] 柴生波,吴骞,王秀兰,等.双缆悬索桥空缆状态主缆抗滑安全性研究[J].计算力学学报,2023, **40**(3): 366-374. (CHAI Sheng-bo, WU Qian, WANG Xiu-lan, et al. Study on anti-sliding safety safety of main cable in the cable-finished state of double-cable suspension [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2023, **40**(3): 366-374. (in Chinese))
- [14] 柴生波,王秀兰,任翔.双缆多跨悬索桥力学性能及主缆用钢量研究[J].建筑科学与工程学报,2015, **32**(6): 74-81. (CHAI Sheng-bo, WANG Xiu-lan, REN Xiang. Study on mechanical properties and steel consumption of double-cable multi-span suspension bridge [J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2015, **32**(6): 74-81. (in Chinese))
- [15] Cao H Y, Qian X D, Zhou Y L, et al. Feasible range for midtower lateral stiffness in three-tower suspension bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2018, **23**(3): 06017009.
- [16] 陈艾荣,陈文明.多跨悬索桥的性能[A].中国公路学会桥梁和结构学会 2001 桥梁学术研讨会论文集 [C].北京:人民交通出版社,2001. (CHEN Ai-rong, CHEN Wen-ming. Performance of multi-span suspension bridge [A]. Bridge Academic Seminar of Bridge and Structural Engineering Commission of China Highway & Transportation Society in 2001 [C]. 2001. (in Chinese))
- [17] JTG/T D65-05-2015.公路悬索桥设计规范[S].北京:人民交通出版社,2015. (JTG/T D65-05-2015. Design Specifications for Design of Highway Suspension Bridges [S]. Beijing: China Communications

Press, 2015. (in Chinese))

- [18] 肖汝诚. 桥梁结构体系[M]. 北京:人民交通出版社, 2013. (XIAO Ru-cheng. *Bridge Structural Systems* [M]. Beijing: China Communications Press, 2013. (in Chinese))
- [19] 张云龙, 王秀兰, 柴生波. 双缆多塔悬索桥塔梁受力特

性研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2021, 46(5): 1177-1187. (ZHANG Yun-long, WANG Xiu-lan, CHAI Sheng-bo. Research on mechanical characteristics of the tower and girder of double-cable multi-tower suspension bridge[J]. *Journal of Guangxi University* (Natural Science Edition), 2021, 46(5): 1177-1187. (in Chinese))

Study on mechanical properties of double-cable multi-tower suspension bridge based on model test

CHAI Sheng-bo, WANG Ke-wen, WANG Xiu-lan*, WU Qian

(School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, shaanxi, China)

Abstract: In order to verify the mechanical characteristics of a double-cable multi-tower suspension bridge, based on the theoretical formula and numerical analysis, the double-cable multi-tower suspension bridge model is tested. According to the design Parameters. The traditional system and double-cable system finite element model are respectively established, two kinds of architecture deformation and bridge-tower stress are analyzed. The model test verifies the accuracy and dynamic characteristics of the double-cable system. The study shows that the theoretical results of the double-cable system test model agree well with the measured and simulation results. It also shows that the overall accuracy of the test model is good, which confirms the accuracy of the theoretical formula. The measured and finite element simulation results indicate that the first mode of the system is the first vertical bending mode of the stiffening girder, and the error between the measured and simulated results of the first natural frequency is 6.97%. In the traditional system, the deflections of the tower and loading span stiffening girder are about 3 times and the non-loading span stiffening girder about 4 times that of the double-cable system. In the traditional system, the bottom stress of the tower is about 3 times that of the double-cable system, which shows that the double-cable system can effectively reduce the displacement, the stiffening girder deflection and the bottom stress of the middle-tower.

Key words: bridge engineering; mechanical properties; model test; multi-tower suspension bridge; double-cable; mode of vibration