

# 基于实际工作状态的多跨悬索桥中间塔静力试验模型设计

吉林<sup>1</sup>, 王陶<sup>2</sup>, 吴寒亮<sup>2</sup>

(1. 江苏省长江公路大桥建设指挥部, 江苏泰州 225321; 2. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

**[摘要]** 与传统两塔悬索桥相比,多塔连跨悬索桥中间塔的约束条件、工作环境及荷载作用等均有较大差别,其对全桥安全性和使用性有显著影响。基于泰州大桥的实际工作状态(中间塔的纵向最不利工况),采用静力相似理论设计中间塔缩尺模型。通过对原桥中间塔和试验模型的数值仿真分析,从内力、位移及应变等方面比较分析原桥和试验模型的相似关系,结果表明,以几何尺寸和材料弹性模量为基本相似量所设计的试验模型,能满足中间塔主要静力性能的试验要求。

**[关键词]** 悬索桥;中间塔;实际工作状态;相似理论;数值仿真;模型试验

**[中图分类号]** TM 344.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2012)05-0066-05

## 1 前言

泰州长江公路大桥(以下简称“泰州大桥”)为三塔两主跨悬索结构桥梁,其中间塔采用纵向“人”字形钢结构,塔高 191.5 m,两条斜腿在塔底的叉开量为 34.75 m。中间塔横向为门式框架结构,设两道横梁,上横梁顶高程为 197.0 m,下横梁顶高程为 65.9 m。钢塔柱采用单箱多室截面。为减小塔柱截面风阻力系数,改善涡振性能,将塔柱外侧切去 4 个矩形角。塔柱壁板厚度为 50 mm、60 mm,腹板厚度为 44~56 mm,采用板式加劲肋,每间隔 2~4 m 设置一道横隔板,横隔板厚度 16 mm。

三塔两跨悬索桥的前期研究表明,中间塔的核心问题在于最不利工况下,其刚度能保证加载跨加劲梁竖向挠度在一定范围之内。为了能准确评价泰州大桥中间塔,设计制作能真实代表原型的中间塔模型至关重要。文章介绍了泰州大桥中间塔的模型设计制作,并从有限元分析、测试对比两方面,与原型

中间塔响应进行比较,以验证模型设计的合理性和有效性。

## 2 试验模型设计

### 2.1 中间塔模型静力相似准则

在静力作用下,按照线弹性静力问题考虑中间塔的力学行为,所涉及的物理量共有 13 个,即几何尺寸  $l$ 、面积  $A$ 、线位移  $\delta$ 、角位移  $\varphi$ 、截面惯性矩  $I$ 、应力  $\sigma$ 、弹性模量  $E$ 、泊松比  $\mu$ 、应变  $\varepsilon$ 、容重  $\rho$ 、集中荷载  $F$ 、弯矩  $M$  和分布荷载  $q$  等。静力问题 13 个物理量须满足平衡方程、相容方程、几何方程、物理方程、边界条件,其效应函数关系可表示为<sup>[1]</sup>

$$f(l, A, \delta, \varphi, I, \sigma, E, \mu, \varepsilon, \rho, F, q, M) = 0 \quad (1)$$

该方案根据钢结构中间塔的实际情况,按照应变相等条件进行中间塔静力模型设计。以几何尺寸  $l$  和材料弹性模量  $E$  为基本物理量,确定几何相似常数  $C_l = l_p/l_m$  和弹模相似常数  $C_E = E_p/E_m$  (其中  $p$

**[收稿日期]** 2012-03-12

**[基金项目]** 国家科技支撑计划资助项目(2009BAG15B02);交通行业联合科技攻关项目(2008-353-332-180);江苏省“333 高层次人才培养工程”专项资助

**[作者简介]** 吉林(1962—),男,江苏海安县人,研究员级高级工程师,研究方向为特大跨径桥梁关键技术;E-mail:JI-WANG@sina.com

表示原型,  $m$  表示模型)。采用量纲分析方法, 可得相似关系如表 1 所示。

表 1 静力模型试验相似性关系

Table 1 Similarity between the tested model and prototype

原型参数	相似性判据 $\pi$	模型参数
长度 $l_p$	—	$l_m = l_p / C_l$
面积 $A_p$	$\pi_1 = A / l^2$	$A_m = A_p / C_l^2$
惯性矩 $I_p$	$\pi_2 = I / l^4$	$I_m = I_p / C_l^4$
线位移 $\delta_p$	$\pi_3 = \delta / l$	$\delta_m = \delta_p / C_l$
角位移 $\varphi_p$	$\pi_{11} = \varphi$	$\varphi_m = \varphi_p$
弹模 $E_p$	—	$E_m = E_p$
泊松比 $\mu_p$	—	$\mu_m = \mu_p$
应力 $\sigma_p$	$\pi_7 = \sigma / E$	$\sigma_m = \sigma_p / C_E$
应变 $\varepsilon_p$	$\pi_8 = \varepsilon$	$\varepsilon_m = \varepsilon_p$
容重 $\rho_p$	$\pi_9 = \rho l / E$	$\rho_m = \rho_p C_l / C_E$
集中力 $F_p$	$\pi_{10} = F / (E l^2)$	$F_m = F_p / (C_l^2 C_E)$
弯矩 $M_p$	$\pi_5 = M / (E l^3)$	$M_m = M_p / (C_l^3 C_E)$
分布力 $q_p$	$\pi_6 = q / E l$	$q_m = q_p / (C_l C_E)$

## 2.2 模型材料、缩比、断面形式的确定

泰州大桥中间塔原型为钢结构, 模型制作确定采用 Q345 钢材, 在弹性阶段可以满足与原型 Q370qD、Q420qD 两种材料弹性模量相似常数为

$C_E = 1.0$  的要求。在模型选材过程中曾比较过有机玻璃材料, 这种材料优点在于价格便宜, 加工容易。但是通过截面计算发现难以满足应变相等这一相似原则, 因而放弃。

中间塔模型尺寸缩比主要取决于场地条件和经费预算。较小的缩尺比例肯定能更好地照顾到模型的构造细节, 并降低加工难度, 但会对加载能力、测试条件方面有更高要求, 而较大的缩尺比则必然降低目标响应的可探测性。最终确定模型缩尺比例  $C_l = 50$ , 综合考虑了场地条件、制作精度要求、加载能力、便于后期测试等因素。

按照  $C_l = 50$  模型缩尺比例, 模型壁板厚度为 0.8 ~ 1.2 mm 的薄钢板, 这不但导致焊接加工难度极大, 而且在尺寸上要做到与原型截面 (见图 1) 完全几何相似几乎不可能。为此, 在模型设计过程中采用了以下几个原则:

1) 模型高度、宽度等总体结构尺寸严格符合相似关系。

2) 放弃追求模型截面几何尺寸相似, 严格保证模型各截面纵桥向弯曲刚度、截面面积的相似性。

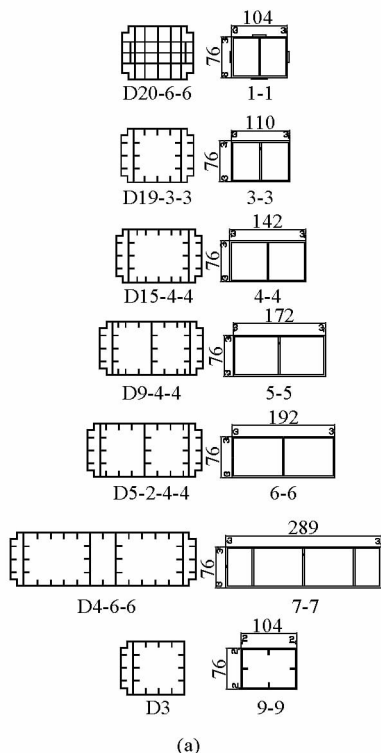


图 1 泰州大桥中间塔模型及断面形式

Fig. 1 Full view of the experiment and sections of the model

3) 尽量避免设置纵向加劲肋、加劲横隔板, 满足条件 2) 前提下, 整体和局部稳定性通过调整壁板厚度来满足, 结构总体满足《钢结构设计规范》要求。

采用上述原则, 塔身壁板厚度调整为 2 ~ 3 mm 的钢板, 大幅降低了工艺难度。模型最终高度 3 830 mm, 横桥向上口宽 696 mm、下口宽 852 mm, 纵桥向斜腿叉开量 695 mm, 桥塔截面尺寸 76 ~ 289 mm。中间塔模型及断面形式如图 1 所示。

### 2.3 中间塔模型加工及制作要求

1) 中间塔静力模型壁板多采用 2 ~ 3 mm 的薄钢板, 施焊时设刚性内、外模, 固定于台座上采用逆焊法焊接, 以控制焊接变形和扭转翘曲。

2) 上塔柱、下横梁节段制作时, 沿高度方向分成若干节段拼接而成, 焊缝打磨平整, 组焊成型的主塔构件应采用低温回炉、或其他方法消除塔身焊接应力。

3) 模型组装成型应保证两塔柱, 上、下横梁保持在同一平面内, 塔柱两底座的下平面应处于同一平面上。模型各部件安装高程误差应控制在 2 mm 以内, 垂直度误差也控制在 2 mm 以内, 两主塔中心距的相对安装精度为 1/3 000。

## 3 原型、模型计算、实测结果比较

通过对比中间塔原型、模型的计算及实测结果, 来探讨模型与原型的相似性。采用空间壳单元, 分别建立中间塔原型、模型的有限元模型。根据前期

研究, 泰州大桥一跨满载另一跨空载为其纵向最不利工况, 此工况与恒载组合情形下, 中间塔顶荷载及相似换算荷载如表 2 所示。

表 2 中间塔纵向最不利工况下外荷载

Table 2 Load of middle tower under the most unfavorable load case

工况	竖向力/kN	纵向力/kN
恒 + 活(原型)	149 541	13 001
恒 + 活(模型)	59.8	5.2

### 3.1 位移结果分析

沿高度方向从上到下选取 7 个截面, 理论与实测位移结果如表 3 所示。表 3 中  $\delta_p/(\delta_m C_l)$  为反映模型与原型的相似程度指标, 该值接近 1.0 表明二者相似, 反之则不相似。

表 3 中模型/原型计算位移的相似程度在 1.11 ~ 0.85, 实测位移的相似程度在 1.47 ~ 0.58, 均显示了良好的相似性。分析表 3 的数据还能发现以下规律:

1) 中间塔刚度的关键指标: 塔顶纵向位移, 计算值的相似程度达 1.05, 实测值的相似程度达到 1.04, 显示出非常良好的相似性。

2) 模型和原型具有一致的纵向变形形态, 1、2、3、4 截面纵向均为正, 5、6 截面纵向位移均为负。

3) 模型分叉点附近纵向位移的相似程度降低, 塔柱在分叉点附近位移响应量值小, 且截面特性变化较大是原因之一。

表 3 中间塔纵向最不利工况下位移结果

Table 3 Results of middle tower displacements under the most unfavorable load case

序号		中间塔标高/m		中间塔纵桥向位移 $U_x$ /mm			
		原型( $H_p$ )	模型( $H_m$ )	原型计算	模型计算	模型实测	$\delta_p/(\delta_m C_l)$ (计算/实测)
1	上塔柱	200.00	4.000	1 923.27	36.77	36.95	1.05/1.04
2	上塔柱	158.00	3.160	1 044.08	20.30	20.91	1.03/1.00
3	上塔柱	108.50	2.170	309.33	5.92	7.58	1.05/0.82
4	分叉点	78.50	1.570	56.51	1.02	1.96	1.11/0.58
5	下塔柱加载侧	56.30	1.126	-30.49	-0.71	-0.41	0.86/1.48
6	下塔柱加载侧	32.65	0.653	-23.05	0.54	-0.43	0.895/1.07
7	下塔柱加载侧	11.30	0.226	0.00	0.00	0.01	—

由于中间塔塔顶具有较大的纵向位移, 为进一步比较原型/模型的纵向位移特性, 有限元分析还比较了大位移对结构刚度矩阵、荷载矩阵的影响, 即计入中间塔的几何非线性。比较分以下 3 种工况考虑

(见图 2): a. 主缆传递荷载, 未考虑几何非线性; b. 主缆传递荷载, 考虑几何非线性; c. 自重 + 主缆传递荷载, 考虑几何非线性。塔顶位移如图 2(b) 所示。

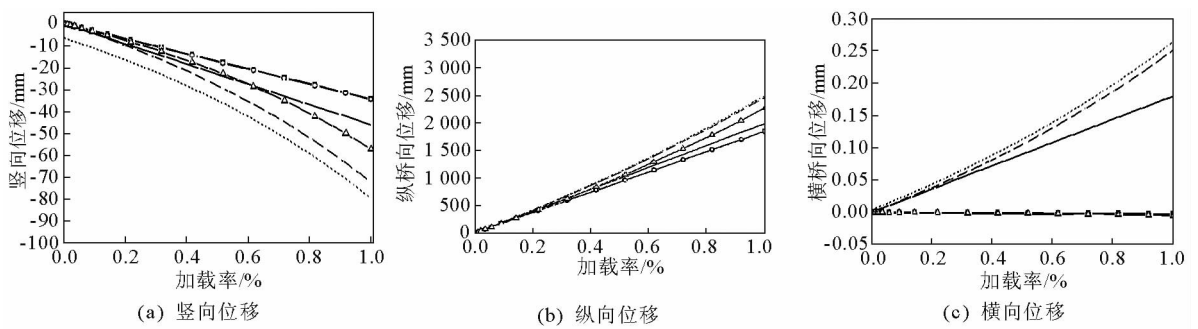


图2 纵向最不利工况下的位移分析

Fig. 2 Calculated displacements under the most unfavorable load case

注:—为原桥中塔(主缆传递荷载);- - -为原桥中塔(主缆传递荷载),考虑几何非线性;·····为原桥中塔(自重+主缆传递荷载),考虑几何非线性;—□—为试验模型(主缆传递荷载);—○—为原桥中塔(主缆传递荷载),考虑几何非线性;—△—为原桥中塔(自重+主缆传递荷载),考虑几何非线性

计算结果显示,纵向最不利工况下,未考虑几何非线性情况时,模型与原桥的纵桥向位移计算结果接近,最大偏差为7%。加入几何非线性因素时中间塔原型、模型的位移计算结果已经不能用相似关系来比较,姑且列出计算结果。当考虑结构几何非线性时,原桥中塔的竖向和纵桥向位移分别增大57%和24%,试验模型的竖向和纵桥向位移分别增大0.5%和0%;当考虑自重及结构几何非线性时,原桥中塔的竖向和纵桥向位移分别增大73%和26%,试验模型的竖向和纵桥向位移分别增大66%和22%。

### 3.2 应变结果分析

沿高度方向从上到下选取7个截面的理论与实

测应变结果如表4所示。表中 $\varepsilon_p/\varepsilon_m$ 反映模型与原型应变的相似程度。其中,模型/原型计算应变的相似程度在1.48~0.98,实测应变的相似程度在1.66~0.63,同样显示了较高的相似度。从表4的数据还可以看出:

- 1) 应力计算及实测结果较高的相似度,显示了中间塔模型对于原型的相似性。
- 2) 中间塔计算应变较好的相似度,表明按照保证截面抗弯刚度相似,而不是追求截面几何尺寸相似,也能做到模型与原型的相似。
- 3) 塔顶部位为荷载施加点,局部的应力集中是造成该部位应力相似度较低的原因。

表4 纵向最不利工况下中塔应变结果

Table 4 Results of middle tower strain under the unfavorable load case

序号	中间塔标高/m	中间塔竖向应变 $\varepsilon_{11}/10^{-6}$					
		原型( $H_p$ )	模型( $H_m$ )	原型计算	模型计算	模型实测	( $\varepsilon_p/\varepsilon_m$ )· $C_l$ (计算/实测)
1	上塔柱	200.00	4.000	-153	-103	-92	1.48/1.66
2	上塔柱	158.00	3.160	-528	-437	-524	1.21/1.24
3	上塔柱	108.50	2.170	-784	-681	-736	1.15/1.06
4	分叉点	78.50	1.570	-953	-843	-938	1.13/1.02
5	下塔柱加载侧	56.30	1.126	-822	-803	-790	1.02/1.04
6	下塔柱加载侧	32.65	0.653	-275	-281	-439	0.98/0.63
7	下塔柱加载侧	11.30	0.226	-173	-144	-185	1.20/0.94

注:负值表示压应变

## 4 结语

笔者介绍了具有复杂截面形式的钢结构中间塔模型,通过该案例,可以得出以下结论:

- 1) 计算、实测两方面的对比结果,均表明了中间塔模型具有较高的相似性。
- 2) 保证总体结构尺寸相似,截面刚度相似,放松截面几何尺寸相似等措施,可以满足中间塔静力

模型对相似性的要求。

3)对于截面形式复杂的钢结构,模型截面设计的难点在于平衡薄钢板熔焊工艺难度与截面的相似性要求,通过保证稳定性指标,调整钢板厚度降低工艺要求等措施,模型可以获得较好的相似性。

#### 参考文献

- [1] 李忠献. 工程结构试验理论与技术 [M]. 天津:天津大学出版社,2004.

## Model design of static experiment for the middle tower of multi-span suspension bridge based on actual working conditions

Ji Lin<sup>1</sup>, Wang Tao<sup>2</sup>, Wu Hanliang<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Provincial Yangtze River Highway Bridge Construction Commanding Department, Taizhou, Jiangsu 225321, China; 2. Research Institute of Highway, Ministry of Transportation, Beijing 100088, China)

[ **Abstract** ] Compared to the tower of common two-span suspension bridges, the middle towers of multi-span suspension bridges have several different characteristics, such as the constraints, service conditions and loads, etc, which affect the safety and applicability of the bridges. In this paper, a small-scale model was designed for the middle tower of Taizhou Bridge, based on its actual working conditions. By the finite element method, the similarities between the experiment and the prototype were investigated from three aspects, including the internal forces, displacements and strains. It is demonstrated from the investigation that, with the geometric size and material modulus as the essential parameters, the designed model herein can satisfy the requirements of mechanical properties of experiment.

[ **Key words** ] suspension bridge; middle tower; actual working conditions; similarity theory; numerical simulation; model testing