

蝴蝶拱桥活载受力行为的试验研究*

黄海云, 张俊平, 刘爱荣, 禹奇才
(广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 中山市长江大桥是世界上首座已建成的蝴蝶拱公路桥。为验证结构体系的可靠性与设计的合理性, 基于静载试验实测数据及有限元分析结果, 对该桥在试验荷载作用下的受力行为进行了分析和研究, 研究结果表明: 该桥传力流畅, 变形态势合理, 承载能力能满足设计荷载的要求; 主要构件的几何尺寸、刚度匹配较好; 闭合结构在活载作用下能够平衡部分恒载反应, 基本实现推力自平衡。

关键词: 蝴蝶拱桥; 非对称拱肋; 静载试验; 有限元法

中图分类号: TU317.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2010)01-0053-05

Experimental Study on Behavior of a Butterfly-Shape Arch Bridge under Live Load

HUANG Haiyun, ZHANG Junping, LIU Airong, YU Qicai

(School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The Changjiang Bridge in Zhongshan city is the first butterfly-shape arch bridge used in highway in the world. To verify the reliability of this structure system and the rationality of design, a experimental study on mechanics behavior of this bridge under live load was carried out. Based on the measured data of static load test and the calculation results of finite element method, some problems concerned in the design of butterfly-shape bridge were solved.

Key words: butterfly-shape arch; unsymmetrical arch rib; static load test; finite element method

蝴蝶拱桥作为一种造型独特的空间拱梁组合体系桥, 最早出现在英国贝德福特(Bedford)城的大奥斯(Great Ouse)河上^[1], 用作公路桥梁的结构形式, 则源于林同炎先生提出的广西南宁大桥设计方案构思^[2]。蝴蝶拱桥结构造型的主要特点是: 两片不对称的、向外伸展的拱肋与曲线的主梁、端横梁共同构成一个闭合的、自平衡的空间结构体系, 由于其形状如展开双翅的蝴蝶, 故名蝴蝶拱。由于蝴蝶拱桥造型奇特, 受力独特复杂, 目前国内对此种结构还存在一些疑虑和问题, 主要集中在以下几个方面: ①两拱肋的线型、倾角、刚度等因素对拱肋、曲线钢箱梁受力影响极大且比较敏感, 但合理线型往往难以确定; ②在自重、桥面荷载

(二期恒载、活载)作用下, 该桥拱肋受力态势存在明显差异, 在比较理想的状况下, 桥面荷载可以平衡相当部分的结构自重效应, 闭合的拱肋基本不产生水平推力; ③可调节因素多, 既可以通过拱肋的刚度比、线型来分配各个构件的受力, 也可以通过曲线梁的半径或刚度、吊杆的初张力来调整各拱肋的受力; ④拱肋的受力非常复杂, 拱肋截面上同时存在双向弯曲、扭转、轴力、剪力等力素^[2-9]。对于钢肋拱桥在活载作用下的受力行为特性, 国外学者已作了不少相关的研究工作^[10-12], 但对于蝴蝶拱桥的研究却并不多见。

中山长江大桥主桥是世界上已建成的第一座蝴蝶拱公路桥, 于2008年4月竣工, 概貌如图1所

* 收稿日期: 2009-01-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50878059); 广东省自然科学基金资助项目(7001897); 建设部科技计划资助项目(2007-K3-10).

作者简介: 黄海云(1972年生), 女, 讲师; E-mail: helen_hhy@126.com

示。该桥的主跨 110 m，桥面宽 30.4 m，外拱肋竖向矢高 29 m、向平曲线外侧倾斜 13.5°，内拱肋竖向矢高 30 m、向平曲线内侧倾斜 35.5°，拱肋采用变截面椭圆形钢肋拱，主梁为平曲线半径 650 m 正

交异性板钢箱梁、通过端横梁与拱肋固结。该桥的设计荷载为城 - A 级汽车荷载。为进一步验证结构体系的可靠性与设计的合理性，检验在活载作用下结构受力性能，为其它类似桥梁提供设计依据，本文结合静载试验实测数据及有限元分析结果，就蝴蝶拱活载受力行为进行了试验研究，相关问题简述如下。

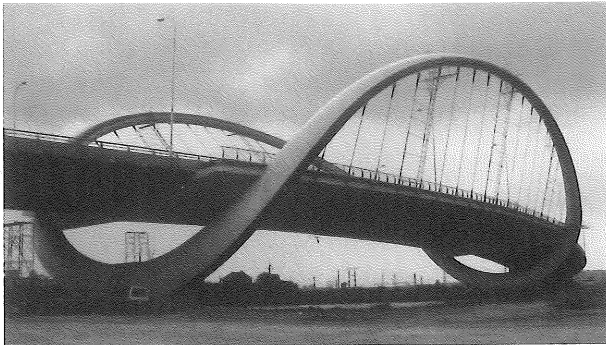


图 1 中山长江大桥蝴蝶拱桥概貌
Fig. 1 Photo of the butterfly-shape arch of Changjiang Bridge in Zhongshan city

1 试验方案设计

本文利用 MIDAS、ANSYS 分析软件分别建立了空间杆系有限元计算模型及空间实体 - 板壳 - 杆系有限元模型 (如图 2 所示)，以分析蝴蝶拱桥在活载作用下的受力行为。其中，杆系有限元模型主要用于设计活载的移动荷载分析，以确定内外拱肋、钢箱 (主) 梁、横梁等主要受力部件的控制截面的最不利内力，实体 - 板壳 - 杆系有限元模型主要用于试验荷载反应 (变形和应变) 的计算分析。

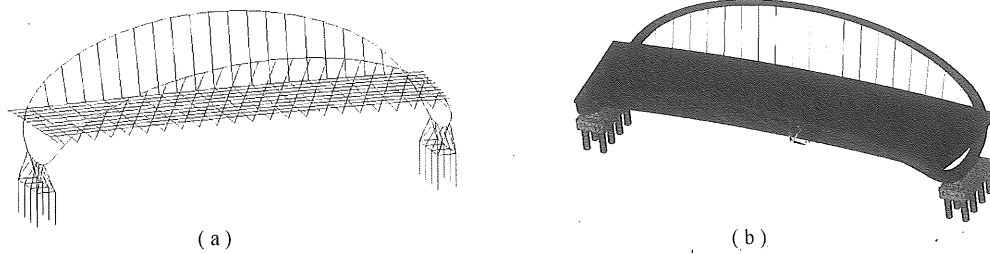


图 2 蝴蝶拱桥有限元计算分析模型
Fig. 2 Finite element models of the butterfly-shape arch bridge
(a) 杆系有限元模型; (b) 实体 - 板壳 - 杆系有限元模型

为了使蝴蝶拱桥的内拱肋、外拱肋、钢箱梁的控制截面内力达到其最不利设计内力，以及拱肋拱顶的位移达到其最不利设计位移，现场静载试验按两个阶段共采用 14 辆 30 t 重车进行加载。两阶段的试验荷载布置分别如图 3 所示，其中，一阶段加

载由工况 1 ~ 工况 5 组成，为加载重车靠内拱肋侧加载；二阶段加载由工况 6 ~ 工况 10 组成，为加载重车靠外拱肋侧加载，在上述加载方案下，能使主要构件控制截面的内力或位移达到加载效率 85% 以上^[13]。

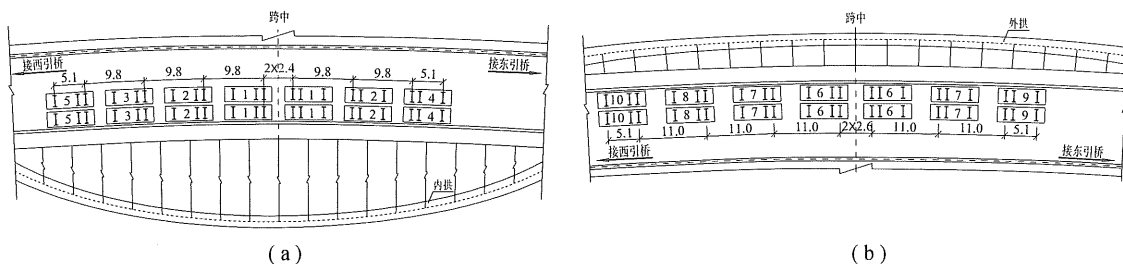


图 3 各阶段试验荷载布置图 (单位: m)
Fig. 3 The layout drawing of heavy vehicles in each test stage (unit: m)
(a) 一阶段工况 1 ~ 5 载位; (b) 二阶段工况 6 ~ 10 载位

全桥在拱肋、钢箱梁布设了变形和应变测点，以测量结构在试验荷载下的位移和应力反应^[13]。其中，内、外拱肋的拱顶截面、L/4 截面、与端横梁相交截面（端部截面）以及拱肋根部截面（拱肋与拱座相交截面）分别设置了变形测点和应变测试截面，每个应变测试截面在其长、短对称轴的两端点分别设置了应变测点；钢箱梁的桥面纵向和跨中截面横桥向共布置了 11 个变形（挠度）测点，钢箱梁的底板下缘均匀布置了 5 个应变测点。此外，在内、外拱的最长、最短吊杆处布置了振频测点，以测量吊杆轴力。

2 主要测试结果分析

限于篇幅，以下简要介绍蝴蝶拱桥现场静载试

验的主要测试结果，见表 1、表 2、图 4、图 5。

(1) 由变形结果可知：①内、外拱肋均呈现向桥中轴线偏转的态势，最大实测偏转角分别为 0.10° 、 -0.02° ，说明此种结构体系的活载变形可以相当程度地平衡拱肋的恒载变形；②纵梁桥面的最大实测挠度 -60.0 mm ，与跨径的比值约为 $1/1\ 800$ ，说明纵梁具有足够的抗弯刚度；③在总体变形量值方面，内、外拱肋与纵梁桥面的最大变形量值基本相当，说明三者的刚度基本匹配。④在试验荷载作用下，纵梁桥面向曲线内侧的最大偏转角 (-0.10°) 大于向曲线外侧的最大偏转角 (0.05°)，内拱肋偏转角总是大于外拱肋偏转角，说明该桥的内、外拱肋的几何要素及刚度等要素的配合尚未达到最佳状态。

表 1 控制截面变形实测值与计算值的比较¹⁾⁻³⁾

Table 1 The comparison of deflection measured values with calculated values in the control sections

截面位置	位移	内拱肋侧加载满载 (工况 5)			外拱肋侧加载满载 (工况 10)		
		实测值/mm	计算值/mm	实测值/计算值	实测值/mm	计算值/mm	实测值/计算值
外拱肋 L/4	横向	-5.2	-8.0	0.65	-6.4	-4.2	1.52
	竖向	-1.0	-2.2	0.45	-15.2	-13.8	1.10
外拱肋 L/2	横向	-7.3	-12.9	0.57	-10.2	-13.1	0.78
	竖向	-6.6	-8.4	0.79	-32.5	-32.9	0.99
外拱肋偏转角/ $^\circ$		$-1.6\text{e}-2$	$-3.1\text{e}-2$	0.52	$-5.8\text{e}-3$	$-1.4\text{e}-2$	0.42
内拱肋 L/4	横向	21.1	29.9	0.71	14.3	18.1	0.79
	竖向	3.7	6.0	0.62	8.9	8.9	1.00
内拱肋 L/2	横向	52.8	55.1	0.96	25.1	28.6	0.88
	竖向	3.8	5.3	0.72	9.2	9.4	0.98
内拱肋偏转角/ $^\circ$		$1.0\text{e}-01$	$1.1\text{e}-01$	0.94	$5.7\text{e}-02$	$6.4\text{e}-02$	0.90
纵梁 L/2	竖向	-60.0	-59.4	1.01	-38.4	-38.2	1.01
	偏转角/ $^\circ$	$-1.0\text{e}-1$	$-9.5\text{e}-2$	1.10	$5.1\text{e}-2$	$4.3\text{e}-2$	1.17

1) 拱肋的竖向位移以向上为正、反之为负，横向位移以向平曲线外侧为正、反之为负；2) 拱肋、纵梁的偏转角以向平曲线外侧偏转为正，反之为负；3) 纵梁跨中截面竖向位移为该截面的最大竖向位移值。

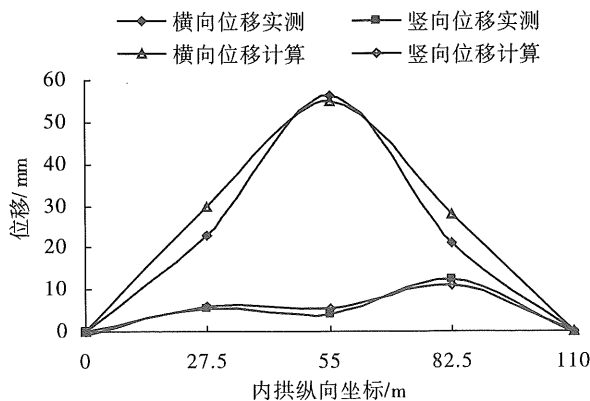


图 4 工况 5 内拱肋实测位移曲线与计算曲线
Fig. 4 The measured and calculated deflection curves of the inside arch rib in case 5

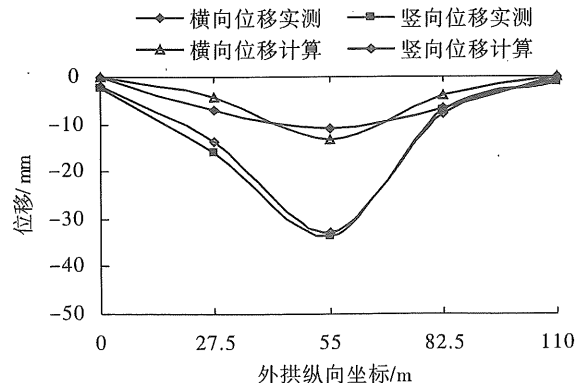


图 5 工况 10 外拱肋实测位移曲线与计算曲线
Fig. 5 The measured and calculated deflection curves of the outside arch rib in case 10

(2) 由应变测试结果可知: ①两拱肋各测试截面的应变分布存在差异, 端部、拱顶截面的上缘及远离桥轴线的侧缘显著受压, 说明此种结构体系在活载作用下的双向弯曲等空间比较突出; ②经理论计算, 该桥内、外拱肋端部截面在试验荷载所产生的压应变分别能抵消 90%、60% 的恒载拉应变; 内拱肋拱顶处试验荷载所产生的拉应变约能抵消 5% 的恒载压应变, 说明活载作用可以相当程度地

平衡结构体系的恒载反应; ③在试验活载作用下, 内拱肋顶截面上缘实测最大压应力约为 30 MPa, 考虑恒载作用后压应力约达 150 MPa, 与拱肋钢板的抗压强度 (295 MPa) 相比仍有较大的安全储备; ④纵梁跨中截面的实测拉应变值稍小于拱肋的实测压应变值, 但基本属于同一量级, 说明纵梁与拱肋的刚度基本匹配。

表 2 控制截面应变实测值与计算值¹⁾⁻²⁾

Table 2 The comparison of strain measured values with calculated values in the control sections

/ $\mu\epsilon$

截面	测点位置	工况 5		截面	测点位置	工况 10	
		实测值	理论值			实测值	理论值
内拱肋端部	上缘	-29	-39	外拱肋端部	上缘	-39	-34
	外侧缘	14	18		外侧缘	-19	-9
	下缘	-10	12		下缘	11	-2
	内侧缘	-52	-44		内侧缘	-11	-13
内拱肋 L/4	上缘	-66	-68	外拱肋 L/4	上缘	-59	-84
	外侧缘	-53	-62		外侧缘	-57	-83
	下缘	-64	-57		下缘	-61	-82
	内侧缘	-71	-61		内侧缘	-68	-82
内拱肋 L/2	上缘	-138	-120	外拱肋 L/2	上缘	--	-140
	外侧缘	6	4		外侧缘	-75	-94
	下缘	8	-6		下缘	--	-36
	内侧缘	-102	-115		内侧缘	-67	-69
纵梁 L/2	下缘	80	89	纵梁 L/2	下缘	55	50

1) 表中外侧缘是指平曲线外侧, 内侧缘是指平曲线内侧; 2) 纵梁 L/2 截面下缘的应变值为该截面的最大值。

3 结 论

通过试验实测与理论计算数据的比较与分析, 对中山长江大桥蝴蝶拱桥, 可以得出如下结论。

(1) 该蝴蝶拱桥的内外拱肋与铅垂面的夹角、主梁的曲线半径等对受力行为有显著影响的几何要素设置较为合理, 在活载作用下, 结构的变形态势、量值可以相当程度地平衡恒载反应, 采用闭合的拱肋结构也基本上实现了推力的自平衡。

(2) 从实测数据来看, 该桥内拱肋、外拱肋、纵梁等构件的变形、应变数据在最大量值较为接近, 说明该桥各主要构件的刚度匹配性较好, 受力较为合理, 但仍有进一步优化的空间。

(3) 实测数据与理论计算结果比较接近, 说明理论计算模式比较成功地模拟和分析蝴蝶拱桥的空间受力行为。

参考文献:

- [1] 倪立群, 林英, 任淑琰. 桥型设计探索 - 中承式蝶形双曲拱桥[J]. 世界桥梁, 2006(4): 7-9.
- [2] 谢肖礼, 白光耀, 韩文学等. 南宁大桥空间结构分析[J]. 公路与汽运, 2005, 12: 109-112.
- [3] 辛丽华. 中承式外倾拱桥的美学与力学[J]. 公路, 2007(2): 43-45.
- [4] 王清泉, 吴冲. 非对称外倾式钢箱拱桥扁平弯钢箱梁扭转与翘曲[J]. 结构工程师, 2006, 22(1): 34-37.
- [5] 孙应桃, 陈淮, 杨雅平, 等. 拱肋倾角变化对斜靠式拱桥动力性能的影响[J]. 世界桥梁, 2008, 1: 46-49
- [6] 周和林. 广东省中山市蝴蝶拱桥空间模型计算分析[J]. 四川建筑科学研究, 2004, 30(3): 31-32.
- [7] 张俊平, 刘爱荣, 李永河, 等. 蝴蝶拱桥的模型试验与理论研究[J]. 桥梁建设, 2007, 2: 15-17.

(下转第 61 页)

3 结 论

采用 Tripos 公司的商用软件 sybyl7.3 对 28 个二芳基脲类 VEGFR-2 酪氨酸激酶抑制剂进行了 3D-QSAR 研究, 构建了一个预测能量较强的 CoMFA 模型, 其交叉验证系数 $q^2 = 0.681$, 非交叉验证系数 $r^2 = 0.958$, 统计方差比 $F = 64.964$; 影响药效的立体场和静电场的贡献分别为 65.7% 和 34.3%。CoMFA 模型的三维等值图设计高活性的化合物提供了参考。

参考文献:

- [1] GUO P, XU L, PAN S, et al. Vascular endothelial growth factor isoforms display distinct activities in promoting tumor angiogenesis at different anatomic sites[J]. *Cancer Res*, 2001, 61 (23): 8569 - 8577.
- [2] FERRARA N, DAVIS-SMYTH T. The biology of vascular endothelial growth factor[J]. *Endocr Rev*, 1997, 18 (1): 4 - 25.
- [3] SHINKARUK S, BAYLE M, LAIN G, et al. Vascular endothelial cell growth factor (VEGF), an emerging target for cancer chemotherapy[J]. *Curr Med Chem Anti Cancer Agents*, 2003, 3(2): 95 - 117.
- [4] CROSS M J, DIXELIUS J, MATSUMOTO T, et al. VEGF-receptor signal transduction[J]. *Trends Biochem Sci*, 2003, 28: 488 - 494.
- [5] 茆勇军, 张佩璇, 田广辉, 等. 血管内皮生长因子受体酪氨酸激酶抑制剂的研究进展[J]. *中国新药杂志*, 2008, 17(7): 544 - 550.
- [6] JI Z Q, AHMED A A, ALBERT D H, et al. 3-Amino-benzo[d]isoxazoles as novel multitargeted inhibitors of receptor tyrosine kinases[J]. *J Med Chem*, 2008, 51: 1231 - 1241.
- [7] DAI Y J, HARTANDI K, JI Z Q, et al. Discovery of N-(4-(3-amino-1H-indazol-4-yl) phenyl)-N'-(2-fluoro-5-methylphenyl) urea (ABT-869), a 3-aminoindazole-based orally active multitargeted receptor tyrosinekinase inhibitor[J]. *J Med Chem*, 2007, 50: 1584 - 1597.
- [8] DAI Y, HARTANDI K, SONI N B, et al. Identification of aminopyrazolopyridine ureas as potent VEGFR/PDGFR multitargeted kinase inhibitors[J]. *Bioorg Med Chem Lett*, 2008, 18: 386 - 390.
- [9] CRAMER R D, PATTERSON D E, BUNCE J D. Comparative molecular field analysis (CoMFA). 1. Effect of shape on binding of steroids to carrier proteins[J]. *J Am Chem Soc*, 1988, 110: 5959 - 5967.
- [10] MIYAZAKI Y, MATSUNAGA S, TANG J, et al. Novel 4-amino-furo[2,3-d]pyrimidines as Tie-2 and VEGFR2 dual inhibitors[J]. *Bioorg Med Chem Lett*, 2005, 15: 2203 - 2207.
- [8] 刘爱荣, 张俊平, 王定文, 等. 蝴蝶拱桥的有限元分析及模型试验研究[J]. *中南公路工程*, 2006, 31(5): 59 - 62.
- [9] 李健, 辛克贵, 张崇厚, 等. 梁拱组合体系桥梁的设计实例[J]. *河北工程大学学报: 自然科学版*, 2008, 25(1): 5 - 8.
- [10] KURANISHI Shigera, YABUKI Tetsuya. Required out-of-plane rigidities of steel arch bridges with two main arch ribs subjected to vertical and lateral loads [R]. The Technology Reports of Tohoku University, Sendai, Japan, 1981, 46: 47 - 72.
- [11] YONGLIN P I, TRAHIR N S. Out-of-plane inelastic buckling and strength of steel arches[J]. *Journal of the Structural Engineering, ASCE*, 1998 (2): 174 - 183.
- [12] YABUKI Tetsuya, VINNAKOTA Sriramulu, KURANISHI Shigera. Lateral load effect on load carrying capacity of steel arch bridge structures [J]. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 1983, 10(109): 2434 - 2449.
- [13] 黄海云, 赵新生, 刘爱荣. 中山市长江大桥主桥动静载试验检测评估报告[R]. 广州: 广州大学, 2008.

(上接第 56 页)