

A Static Load Test of Bixi Bridge in Changshu

Shijin Zhong¹, Jie Yu^{2*}, Wen Sun³

¹Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong-Liverpool University, Suzhou

²School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing

³Jiangsu Fasten Material Analysis & Inspecting Co., Ltd., Jiangyin

Email: *970950409@qq.com

Received: Jul. 10th, 2014; revised: Aug. 13th, 2014; accepted: Aug. 22nd, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In order to test whether the construction quality of Bixi Bridge in Changshu meets the design requirements, and to ensure the safety of the bridge, the structure was analyzed and a static load test program was developed according to the design loads and the relevant specifications. Then the test data were analyzed. Test results showed that: the actual capacity and deformation of the bridge are consistent with the theoretical results. The strength and stiffness of the structure meet the design requirements. The stress moves back to zero well after unloading and the structure works are in an elastic state. The performance of the bridge meets the requirements of design and security operations.

Keywords

Bixi Bridge, Static Load Test, Stress, Displacement, Calibration Coefficient

常熟碧溪大桥静力荷载试验

仲时进¹, 于杰^{2*}, 孙文³

¹西交利物浦大学土木工程系, 苏州

²东南大学土木工程学院, 南京

³江苏法尔胜材料分析测试有限公司, 江阴

Email: *970950409@qq.com

收稿日期: 2014年7月10日; 修回日期: 2014年8月13日; 录用日期: 2014年8月22日

*通讯作者。

摘要

为了检验常熟碧溪大桥施工质量是否符合设计要求, 保证桥梁使用的安全性, 根据设计荷载和有关规范进行了结构分析, 制定了静载试验方案, 并对试验数据进行了分析。试验结果显示: 大桥实际承载力及变形状态与理论计算基本吻合, 结构的强度和刚度满足设计要求, 卸载后回零良好, 结构工作时处于弹性状态, 桥梁工作性能满足设计和安全运营要求。

关键词

碧溪大桥, 静载试验, 应力, 位移, 校验系数

1. 引言

预应力混凝土矮塔斜拉桥是介于连续梁与斜拉桥之间的一种新桥型。与普通连续梁相比, 该桥型增加了斜拉索参与全桥受力; 但与一般斜拉桥不同, 其是主梁参与主要受力[1]-[2]。为了掌握该类桥梁结构的承载能力及评价桥梁的运营质量, 有必要在通车前进行了荷载试验, 对桥塔、主梁及拉索进行全面检查。检验桥梁结构与施工质量; 验证桥梁结构设计理论和计算方法; 直接了解桥梁结构承载情况, 借以判断桥梁结构实际的承载能力; 积累科学技术资料, 充实与发展桥梁计算理论和施工技术[3]-[6]。

本文以常熟市碧溪大桥为工程背景, 通过静载试验结果分析, 确定试验桥的实际承载能力。

2. 工程背景

位于江苏省常熟市境内的碧溪大桥, 主桥为双塔双索面混凝土梁矮塔斜拉桥, 跨径布置为 $41.6 + 80 + 41.6$ m, 桥面宽 32 m。索塔为矩形截面, 索塔下部尺寸为 200×350 cm, 上部尺寸从 200×250 cm 变化到 200×400 cm, 为现浇钢筋混凝土结构。主塔为塔梁墩固接, 副塔为塔梁固接梁底设支座。主塔高从主梁顶面起算为 15.8 m, 主塔下部为等截面上部为变截面的现浇钢筋混凝土结构。主梁为双肋板式截面, 纵梁为 200×200 cm 现浇后张拉预应力混凝土结构; 横梁为变截面后张预应力混凝土结构, 两塔下部各集中设置三道, 其余部位每隔 5 m 设置一道; 桥面板为横向预应力混凝土板式结构, 分为机动车道板和非机动车道板, 机动车道板厚 30 cm, 非机动车道板厚 15~40 cm。桥塔和主梁材料均为 C50 混凝土。斜拉索采用双索面扇形布置, 每个塔 7 对索, 全桥共 28 对; 斜拉索在梁底锚固, 在塔上采用分丝管型索鞍贯通; 斜拉索由环氧喷涂钢绞线组成, 单根钢绞线直径为 15.2 mm, 应力幅 250 Mpa, 标准强度为 1860 Mpa。

大桥荷载等级: 公路-A 级, 人群荷载为 3.6kN/m^2 ; 结构立面图如图 1 所示。

3. 结构有限元分析计算

在荷载试验前应用 MIDAS/CIVIL010 建立碧溪大桥空间杆系有限元模型。主塔和主梁采用空间梁单

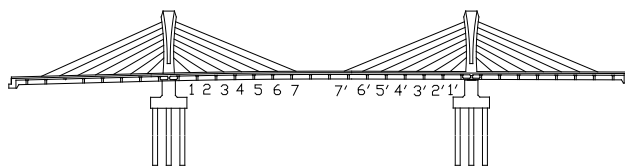


Figure 1. The main bridge elevation of Bixi bridge
图 1. 碧溪大桥主桥立面图

元模拟，主梁按照横截面面积和主梁纵向抗弯刚度等效原则等效到两个矩形主梁上，以共节点的方式组成空间平面框架。斜拉索采用桁架单元进行模拟，应用 Ernst 公式换算拉索弹性模量来考虑拉索的垂度效应影响。塔墩梁固结处采用梁单元共节点方式处理，塔底固结处理，塔梁固结、梁底设支座采用节点弹性连接方式模拟，连接刚度按照支座实际约束刚度数据进行模拟。全桥计算模型共划分 365 个单元，其中梁单元 309 个，桁架单元 56 个。全桥整体分析主要材料计算参数根据实际情况采用表 1 中数据取值。

全桥空间有限元模型如图 2 所示。根据设计荷载，对于大桥进行了最不利荷载作用下的结构影响线分析。

4. 主要测试项目与测点布置

为了测定大桥在最不利设计荷载作用下大桥主要各控制截面的应力和变形，根据大桥设计等级和结构影响线分析结果，碧溪大桥静载试验测试项目包括主梁控制截面挠度、主梁控制截面应力、斜拉索内力增量和结构温度场等。具体为索塔根部主梁截面、中跨四分点主梁截面、塔梁连接处索塔截面作为应力测试截面，共 10 个应力测试截面，如图 3 所示。主梁中跨四分点截面、边跨二分点截面作为位移测试点，如图 4 所示。

根据测试截面内力等效原则，采用 6 辆 300 kN 三轴重车进行布载，使测试控制截面的试验荷载效率满足检测规程的要求。试验前对所有试验车辆称重过磅，以保证试验荷载效率在合理的范围内。

表 2 给出了详细的试验工况、加载车辆布置、监测与主要观测项目。图 5 为试验车辆布置图。

Table 1. The main calculation parameters of the finite element model
表 1. 结构有限元分析主要计算参数表

材料	弹性模量 Mpa	泊松比	线膨胀系数	容重 kN/m ³
混凝土	3.45E + 04	0.22	1.20E - 05	26.2
斜拉索钢束	1.9995E + 05	0.3	1.20E - 05	77.09
预应力钢筋	1.95E + 05	0.3	1.20E - 05	78.34

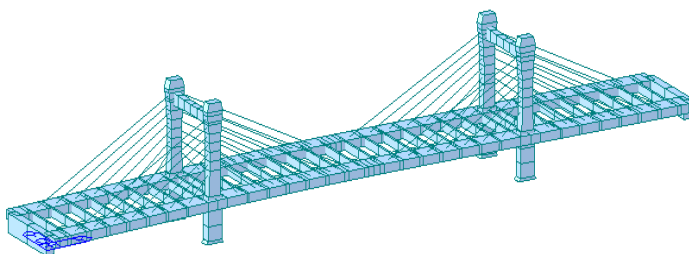


Figure 2. The main calculation parameters of the finite element model
图 2. 碧溪大桥空间有限元模型

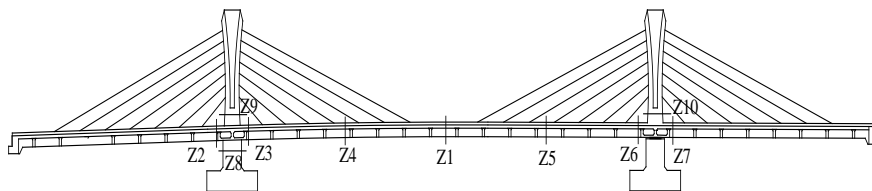


Figure 3. Longitudinal arrangement of stress control section
图 3. 应力控制截面纵向布置示意图

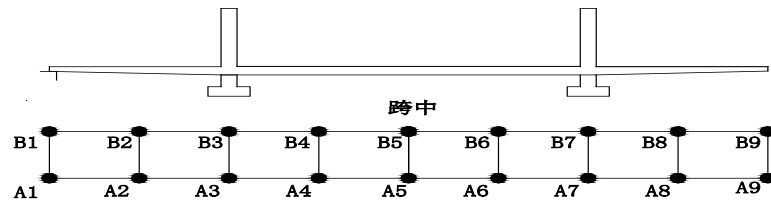


Figure 4. The arrangement of displacement measuring point
图 4. 位移测点布置图

Table 2. A summary of the static load test and vehicle arrangement
表 2. 静载试验工况与车辆布置汇总表

工况号	加载布置与车辆位置	检验内容与主要观测项目	效应系数
1	边跨跨中附近对称加载 4 辆车排成 1 行，分布在 4 个车道，横向对称布载	跨中最大正弯矩与挠度最不利位置 边跨跨中截面应力与挠度	0.82
2	中跨四分点附近对称加载 6 辆车排成 2 行，前后 3 辆，横向对称加载	最大正弯矩与挠度最不利位置 跨中截面应力与挠度、索塔应力、索力增量	0.88
3	中跨跨中附近对称加载 6 辆车排成 2 行，前后 3 辆，车距缩小 8 m	跨中最大正弯矩与挠度最不利位置 跨中截面应力与挠度、索塔应力、索力增量	0.96
4	中跨跨中附近偏向加载 4 辆车排成 2 行，前后 2 辆，车距与工况 3 相同	跨中最大正弯矩与挠度最不利位置 跨中截面应力与挠度	0.83

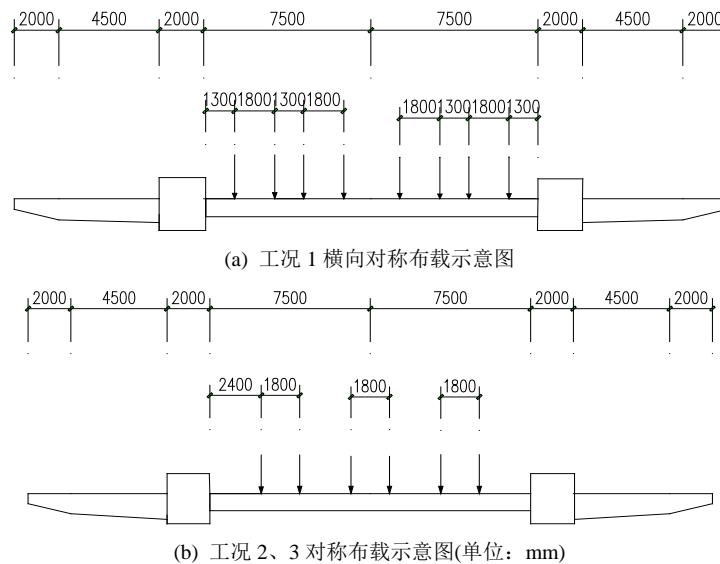


Figure 5. The sketch map of vehicle arrangement and symmetric loading (cases 1 - 3)
图 5. 工况 1~3 对称加载车辆布置示意图(单位: mm)

5. 静载试验评价方法

对于预应力混凝土桥梁，主要通过实测结构的校验系数 ξ 和残余应变来反映桥梁结构的相关工作性能：

1) 校验系数 ξ

实测结构的校验系数 ξ 是挠度或应力试验值与理论计算值之比，他反映了结构的实际工作状态。

对于应力值： $\xi = \frac{\text{实测应力}}{\text{理论应力}}$ ；对于挠度值： $\xi = \frac{\text{实测挠度}}{\text{理论挠度}}$ ；

实测结构校验系数是一个重要的评定指标，可以从中判断桥梁的承载能力状况。当 $\xi \leq 1$ 时说明结构

的计算偏于安全，结构的承载能力有一定的安全储备。应力校验系数越小，说明主梁的强度储备越高；挠度校验系数越小，说明主梁的刚度越好。

2) 相对残余变位或应变

根据量测数据可以计算弹性变位、残余变位或应变。设： S_i 加载前测试值； S_l 加载后测试值， S_u 卸载后测试值。则计算可得：总变位(或总应变)： $S_t = S_l - S_i$ ；弹性变位(或弹性应变)： $S_e = S_l - S_u$ ；残余变位(或残余应变)： $S_p = S_l - S_e = S_u - S_i$ ；相对残余变位或应变： $S'_p = \frac{S_p}{S_t} \times 100\%$ 。

如果相对残余变位或应变小，说明主梁处于弹性工作状态。按规程要求，相对残余变形应小于 20%。

6. 试验结果分析

根据计算分析，本次静载试验共进行 4 个工况，挠度测点 18 个，应力测点共 10 个截面共 64 个。其中主梁每个截面 8 个应力检测点，每个塔截面 4 个应力检测点。试验结果表明：试验荷载作用下，各试验桥跨测试截面的实测应力、挠度、斜拉索力小于计算值，应力校验系数为 0.65~0.87、位移校验系数为 0.5~0.89。混凝土主梁结构应力的横向分布与计算值的横向分布相符。

表 3 给出了主梁中跨主要控制截面 Z1、Z4、Z5 及塔梁连接处 Z3 截面主梁底板测试应力分析结果。表 4 给出了跨中对称加载工况下各个测点挠度测试数据分析。可以看出：各测试截面的应力校验系数均小于 1，结构的承载能力满足正常使用的要求，且有一定的安全储备。各挠度测试截面的挠度校验系数均小于 1，结构的刚度满足设计的要求，实际结构刚度大于理论计算刚度。

中跨主梁截面下缘实测最大混凝土拉应力增量为 3.73 MPa。荷载卸除后，残余应变较小，最大实测相对残余应变为 4.2%，小于检测规程限值 20%。

7. 结语

通过静载试验实测结果与理论分析，该桥的整体受力性能结论如下：

Table 3. The girder stress of the main control section in cross bridge

表 3. 跨中主要控制截面主梁底板测试应力分析

工况	截面	测试值	计算值	校验系数	相对
	(梁底)	(MPa)	(MPa)		残余应变
工 况 1	Z1	-1.3	-1.91	0.68	2.30%
	Z3	0.2	0.27	0.74	1.60%
	Z4	-1.3	-1.52	0.85	-0.90%
	Z5	0.03	0.04	0.75	2.40%
工 况 2	Z1	0.7	0.93	0.75	3.10%
	Z3	-1.2	-1.71	0.7	-0.30%
	Z4	2.2	2.82	0.78	0.70%
	Z5	1.7	2.46	0.69	4.20%
工 况 3	Z1	2.1	3.39	0.62	-2.10%
	Z3	-0.2	-0.26	0.77	1.50%
	Z4	2.5	3.73	0.67	2.80%
	Z5	1.2	1.82	0.66	3.20%

Table 4. The deflection data of symmetrical loading (case 3) in cross bridge

表 4. 跨中对称加载(工况 3)挠度测试数据分析

测点编号	测试值(mm)	理论值(mm)	校验系数	测点编号	测试值(mm)	理论值(mm)	校验系数
A1	2.31	3.08	0.75	B1	2.18	3.08	0.71
A2	2.68	4.39	0.61	B2	3.54	4.39	0.81
A3	0.83	1.20	0.69	B3	0.74	1.2	0.62
A4	-11.9	-20.52	0.58	B4	-11.14	-20.52	0.54
A5	-23.92	-44.30	0.54	B5	-22.37	-44.3	0.50
A6	-15.38	-25.21	0.61	B6	-13.99	-25.21	0.55
A7	0.82	1.26	0.65	B7	1.13	1.26	0.89
A8	6.41	12.09	0.53	B8	7.78	12.09	0.64
A9	0.13	0.18	0.73	B9	0.11	0.18	0.61

1) 碧溪大桥试验桥跨结构经历了荷载效率为 0.82~0.93 静力试验加载, 试验加载过程中未出现异常现象, 试验桥跨测试截面结构受力正常。

2) 在试验荷载作用下, 结构实际承载力及变形状态与理论计算基本吻合, 各测试项目在相应工况下校验系数在应力校验系数 0.65~0.87 之间, 位移校验系数处于 0.5~0.89 之间。说明结构的强度和刚度满足设计要求, 卸载后回零良好。

3) 从桥梁应力、变形、索力等测试结果可知: 实测结果与计算值吻合较好, 桥梁结构工作状态处于弹性范围, 结构实际强度、刚度和承载能力满足设计及规范要求, 桥梁工作性能满足设计和安全运营要求。

基金项目

江苏省交通厅重大项目: (2011Y03-6), 江苏省自然科学基金项目(BK2012562)。江苏省“333”高层次人才培养工程项目。

参考文献 (References)

- [1] 缪长青, 王义春, 黎少华 (2012) 矮塔混凝土斜拉桥成桥索力优化. *东南大学学报*, **3**, 526-530.
- [2] 王永安, 刘世同, 谭红梅, 肖汝诚 (2006) 斜拉桥索力优化理论研究. *公路*, **5**, 31-34.
- [3] 郑平伟, 侍刚, 秦金环, 等 (2006) 渝怀线长寿长江大桥荷载试验研究. *桥梁建设*, **S1**, 134-136.
- [4] 宋一凡, 贺拴海 (2002) 公路桥梁荷载试验与结构评定. 人民交通出版社, 北京.
- [5] 王红霞, 何祖发, 侍刚 (2008) 阿深黄河特大桥静动载试验. *世界桥梁*, **4**, 46-49.
- [6] 蔡登山, 党志杰 (2003) 军山长江公路大桥主桥静动力特性试验研究. *世界桥梁*, **1**, 38-41.