

文章编号:1673-2049(2008)03-0061-05

双层桥面三桁刚性悬索加劲钢桁梁桥 全桥试验模型

刘永健¹, 张俊光¹, 黄健超², 刘 剑¹, 刘君平¹

(1. 长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 东莞市公路桥梁开发建设总公司, 广东 东莞 523010)

摘要:为了研究中国首座双层桥面三桁刚性悬索加劲钢桁梁桥——东江大桥的空间受力行为,并检验施工方案,针对其结构独特、受力复杂、施工难度大的特点,进行了全桥缩尺模型试验。详细介绍了东江大桥模型试验的目的、模型总体构造、截面设计原则、连接构造、施工过程模拟、支座设计以及试验加载等。从模型设计可以看出:该模型制造难度较大;研制的模型能够满足利用试验模拟施工全过程以及对结构局部进行测试的要求。

关键词:铝合金试验模型;模型设计;施工过程;试验加载

中图分类号:TU317.1 **文献标志码:**A

Test Model of Whole Bridge of Double-deck and Three Main Trusses Steel Bridge with Rigid Cable

LIU Yong-jian¹, ZHANG Jun-guang¹, HUANG Jian-chao², LIU Jian¹, LIU Jun-ping¹

(1. Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Dongguan Road & Bridge Development Construction Corporation, Dongguan 523010, Guangdong, China)

Abstract: In order to study spatial mechanical behavior and test construction project of Dongjiang Bridge (the first double-deck and three main trusses steel bridge with rigid cable in China), aimed at the character of unique structure and complicated stress, scale model was tested. Testing purpose, model total layout, section design principle, joint structure, construction stages simulation, support design and loading in test were given in detail. The model design shows that the test model is hard to make, and the test model can satisfy the requirements for simulating the whole construction process and for testing the local parts of the bridge structure.

Key words: aluminum-made test model; model design; construction process; loading in test

0 引 言

东江大桥是中国首座双层桥面刚性悬索加劲连续钢桁梁桥,大桥主桥全长为 432 m,跨径组成为 112 m+208 m+112 m,桥宽为 36 m,共 14 个车道,上层为双向 6 车道,下层为双向 8 车道。主桁立面

采用有竖杆的华伦式桁架,桁高为 10 m,节间长度为 8 m,上弦与上加劲弦之间用吊杆连接。主桁横向采用 3 桁结构,桁间距为 2×18 m。加劲弦部分呈悬索状,中支点处上加劲弦中心到上弦中心高度为 28 m。

该桥造型独特新颖,车道多、荷载大、受力复杂,

收稿日期:2008-05-13

基金项目:广东省交通厅科技项目(2007-15)

作者简介:刘永健(1966-),男,江西婺源人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:steellyj@126.com。

施工难度大,无现成经验和资料可以借鉴。为了探讨该新型结构的整体性能,全面系统地把握该桥的空间受力行为,检验施工方案的可行性,对施工阶段可能出现的各种异常情况进行预演,笔者对该桥进行了全桥全过程模型试验研究。整体模型试验是进行结构理论研究的重要手段之一,目前中国对许多新型桥梁结构均进行了整体模型试验,如中国首座三塔斜拉桥岳阳洞庭湖大桥^[1-3],斜拉索加劲的公路铁路两用板桁组合结构的芜湖长江大桥^[4],世界首座独塔、单跨悬吊钢混结合梁的自锚式悬索桥——广东佛山平胜大桥^[5],5片拱肋组合而成的变异自平衡无推力系杆拱钢桥——中山一桥^[6]等。本文试验模型的主要特点为:①模型杆件截面共有43种规格,需要连接的杆件、节点板数量近10 000件,杆件的截面设计和连接均较复杂;②模型试验要模拟该桥全部施工过程,其中包括中跨合龙时的支座顶升和桥面板安装前的纵横向内力调整,需对支座进行特殊设计;③该桥模型为3片主桁结构体系,难以应用杠杆原理施加配重,试验准确模拟了各个施工工况的加载。

本文中笔者主要介绍了该桥全桥模型试验的总体构造设计和上述3个特点。

1 模型的总体构造及设计

1.1 模型的总体构造

模型采用1:25的大比例缩尺,其全长为17.28 m,跨径组成为4.48 m+8.32 m+4.48 m,桥面宽为1.44 m,桥门架高为1.52 m,上、下弦中心高度为0.4 m,节间距为0.32 m,主桁中心距为0.72 m。加载模型见图1。



图1 加载模型

Fig. 1 Load Model

1.2 模型的设计

模型桁架杆件和混凝土桥面板均采用铝合金材料,模型采用几何相似、物理相似、边界相似及刚度

相似来对实桥进行模拟^[7]。模型选择铝合金材料是基于以下几点:①模型缩尺后受加载空间和试验场地的限制,配重施加难度较大,而铝合金材料的弹性模量与实桥钢材的弹性模量的比约为1:3,在应变相等的前提下,铝合金模型所需配重仅为钢材模型的1/3左右,可以大大减小结构配重;②易于加工制作,安装方便;③铝合金材料防腐性能好,造型美观,可以长期保存。

2 截面设计原则及连接方式

2.1 设计原则

该桥模型较为复杂,共有43种截面形式,模型制造的精度和质量必须得到保证,才能确保试验顺利完成。对模型杆件进行截面设计时,不仅要保证几何相似而且还要保证刚度相似,即按截面几何相似确定的截面外轮廓尺寸保持基本不变,再对截面各部分尺寸做微小调整以保证满足刚度相似,截面模量的相似偏差控制在容许范围之内。对于刚度相似来说:桁架等主要承受拉压力的构件,主要控制杆件的轴向刚度相似;上、下平联、吊杆等受力不大的构件轴向刚度误差可以适当放大;加劲弦、桥门架和横梁不仅要控制轴向刚度相似而且还要控制纵桥向和横桥向的抗弯刚度相似。部分杆件实桥截面与模型截面外形对照见表1。

2.2 杆件的连接

桁架节点连接构造如图2所示。实桥主桁采用整体节点,模型桥按1:25缩尺后采用整体节点很难模拟。该模型杆件的连接曾考虑过3种连接方式:①焊接;②杆件开模铸造整体连接;③铝合金板材通过铆钉拼接。鉴于该模型杆件数量庞大,连接困难,首先考虑的连接方式是焊接,

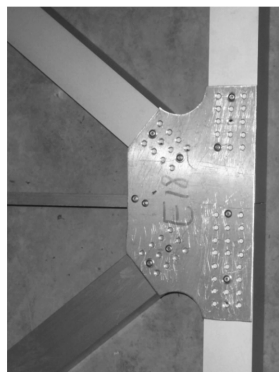
































图2 主桁节点

Fig. 2 Main Truss Joint

但由于铝合金的熔点较低、传热较快,经反复试验,焊接强度远低于母体强度,而且焊接件变形很大,焊接质量难以保证;其次考虑的是开模铸造整体连接,该连接方式存在的问题是模型所需的铝合金板材截面规格较多,但数量又不大,定做费用太高。通常对于全桥模型试验来说,主要研究的是全桥的整体而非节点局部的受力性能^[8-10],所以在保证节点的连

表 1 截面对照
Tab.1 Section Comparisons

构 件	实桥截面	模型截面
下弦杆		
		
上弦杆		
		
斜杆		
		
竖杆		
大竖杆		
加劲弦		
桥门架		
横梁		
		
纵梁		
平联		
吊杆		

接强度和刚度且节点不会发生破坏的前提下,模型试验最终选择采用节点板通过铆钉来连接杆件的连接方式。为了检验铆钉连接的强度和刚度,事先进行了大量试验。实践证明,此种连接方式满足试验要求。

对于加劲弦与大竖杆的连接,为了保证连接的强度和刚度,试验采用钢管内置的连接方式,即在加劲弦的内部套一个钢管,钢管作为一个整体贯穿大竖杆,然后将大竖杆与钢管用铆钉连接,最后加劲弦再与钢管相连,通过这种连接方式保证了加劲弦与大竖杆的共同受力,连接构造如图 3 所示。

3 施工过程模拟及支座设计

实桥钢梁的架设采用支架法和悬臂法相结合的方案。具体的施工步骤为:①两边跨采用支架法拼装,中跨采用悬臂法拼装至最大悬臂;②中跨合龙,采用在临时墩上安置千斤顶,将悬臂钢桁梁顶升至设计标高合龙;③安装刚性悬索和吊杆;④拆除临时墩并进行体系转换,即将南岸固定支座变为活动支

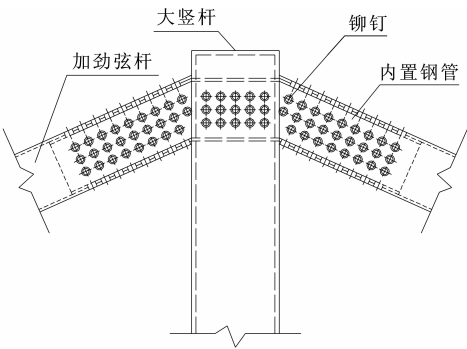


图 3 桥门架连接
Fig.3 Bridge Frames Connection

座;⑤通过调节边墩的 6 个支座进行纵向内力调整,调整中桁的 4 个支座进行横向内力调整;⑥进行桥面板和桥面铺装施工。

模型试验对上述主要施工过程进行了全过程模拟,其中对该桥首次提出的纵横向内力调整更是进行了精确模拟。实桥作为 3 片主桁结构,在设计过程中为了使 3 片主桁受力均匀,采用纵横向内力调整技术,即通过调整中桁和 4 个支座边墩 6 个支座的位移使 3 片主桁受力均匀。实桥钢梁纵横向内力调整,是在桥面板安装之前结合安装支座进行的。纵向内力调整通过将主桁两端支撑点(共 6 个支点)下落 38 cm 来实现;横向内力调整通过将主桁的中桁支撑点(共 4 个支点)下落 3.7 cm 来实现。按照模型桥与实桥 1:25 的相似关系,模型桥的纵向内力调整通过将主桁两端支撑点(共 6 个支点)下落 1.52 cm 来实现;横向内力调整通过将主桁的中桁支撑点(共 4 个支点)下落 0.15 cm 来实现,所以精确调整竖向位移的支座是该模型设计的难点之一。

模型桥的支座布置模拟实桥,共有 18 个支座,其中有 12 个模拟永久支座,6 个模拟临时支座,模型桥的支座平面布置如图 4 所示。

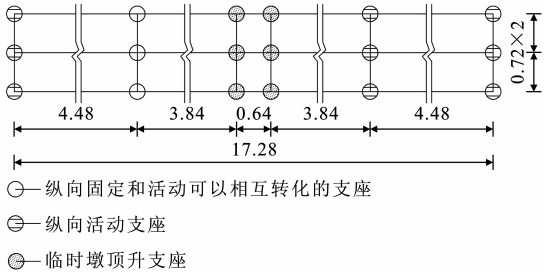


图 4 支座平面布置(单位:m)
Fig.4 Support Plane Layout (Unit:m)

实桥采用球形钢支座,模型桥对此也进行了模拟。模型按比例缩尺后下弦杆壁厚为 1~2 mm,壁厚很薄,采用球形支座与下弦杆直接接触极易发生局部变形,为此设计了可以精确调节主桁竖向位移

的支座。该支座由下弦杆下带纵向槽口的钢垫板、钢珠、螺杆、与螺杆相连的荷载传感器、可竖向连续调整位移的螺母等组成。利用这种支座,可以实现模拟体系转换的过程中由纵向固定支座到纵向活动支座的方便转化;利用这种支座,可以精确地调整支座的竖向位移,顺时针拧动传感器下方的螺母,支座便可升高,反之下降,并能准确测定支座升降过程中支座反力的变化,支座设计的剖面如图 5 所示,模型桥设计的纵向活动支座如图 6 所示。

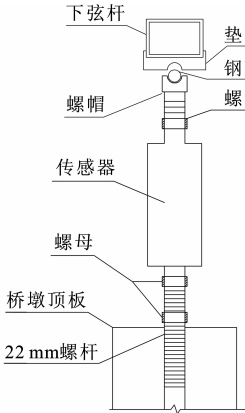


图 5 活动支座剖面
Fig. 5 Expansion Shoe Section

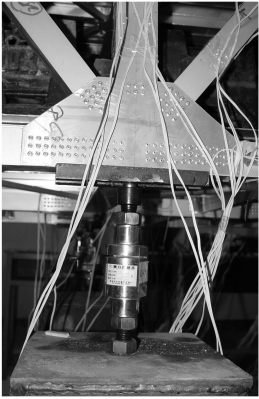


图 6 纵向活动支座
Fig. 6 Vertical Expansion Shoe

此种支座的主要优点有:①垫板增大了接触面积,可防止弦杆的局部破坏;②垫板开槽与下弦杆卡住,避免与下弦杆的螺栓连接;③模拟纵向固定和活动支座十分方便,只需将钢球两侧的焊接钢条去掉即可实现由固定支座变为活动支座;④可以精确调整位移,每拧动 1 圈螺母可调节 2.5 mm 竖向位移;⑤传感器可以准确测得支座反力;⑥钢球与滑板点接触,摩擦力小、活动自由。

4 试验加载

4.1 加载方法

模型恒载补偿的方法通常采用杠杆系统均匀施加。东江大桥作为双层空间 3 片主桁结构,受加载空间和试验场地的限制,杠杆系统难以施加配重,所以模型试验恒载配重及活载配重的加载方式均采用集中力的形式施加,即在模型桥面上直接施加砝码。

该模型桥的加载配重按相似关系计算得到配重质量,施加砝码约为 22 t,其中恒载补偿 19.76 t,包括结构自重补偿 8.40 t,桥面板补偿 7.47 t,桥面铺装补偿 3.89 t,活载补偿 2 t。

4.2 加载位置

为了确保模型试验结果的准确性,经过充分考

虑,恒载配重的施加先由有限元程序计算出实桥各节点的质量 m_p ,再按静、动力相似关系计算出模型桥对应节点的质量 m_m ,然后计算出模型桥自身节点质量 m'_m ,这样模型桥各个节点所需施加的配重为 $m_m - m'_m$,将配重近似分配到相应节点附近,如此施加配重,可得到较精确的试验结果。按上述方法可以得到钢梁自重和桥面铺装配重的横向加载位置在距边桁 288 mm 处,纵向加载位置在两根横梁间 160 mm 处,见图 7,桥面板配重的加载位置通过有限元方法计算得出在每根横梁的中间位置,见图 8。

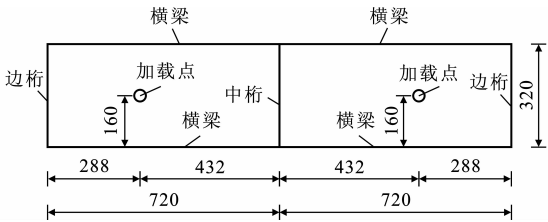


图 7 钢梁自重及桥面铺装横向加载(单位:mm)
Fig. 7 Steel Trusses Weight and Bridge Deck Pavement Transverse Load (Unit:mm)

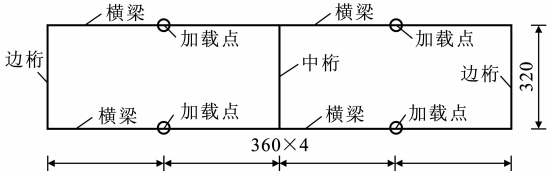


图 8 桥面板配重横向加载(单位:mm)
Fig. 8 Bridge Deck Weigh Transverse Load (Unit:mm)

活载配重的施加先利用有限元程序求出各测点的内力、位移等活载效应值及相应影响线数值;然后再对各活载效应相应的影响线峰值附近进行等效加载,使实桥测点位置的内力、位移等效应值与活载效应值相等,这样可求出活载作用的等效荷载;根据求得的实桥等效荷载,采用荷载相似关系,即可求得模型桥在各活载工况下所需施加的荷载。

5 结 语

该模型制造工艺复杂,模拟施工过程难度大,通过精确的杆件截面设计、保证连接强度和刚度的连接构造、支座的特殊设计、试验的准确加载等一系列措施才能取得满意的效果,该模型还有一些零部件的设计和制作难度较大,限于篇幅在此不做介绍。该模型的研制成功填补了双层桥面三桁刚性悬索加劲钢桁梁桥铝合金试验模型方面的空白。

参考文献:

References:

[1] 颜东煌,田仲初,陈常松,等. 岳阳洞庭湖大桥三塔斜

- 拉桥全桥动静力模型设计[J].长沙交通学院学报,1999,15(1):50-54.
- YAN Dong-huang, TIAN Zhong-chu, CHEN Chang-song, et al. Static and Dynamic Model Design of the Total Bridge of Yueyang Dongting Three Tower Cable-stayed Bridge[J]. Journal of Changsha Communications University, 1999, 15(1): 50-54.
- [2] 陈常松,颜东煌,田仲初,等.岳阳洞庭湖大桥模型动力相似理论分析[J].桥梁建设,2002(1):48-51.
- CHEN Chang-song, YAN Dong-huang, TIAN Zhong-chu, et al. Dynamical Similarity Theory Analysis to the Model of Yueyang Dongting Lake Bridge[J]. Bridge Construction, 2002(1): 48-51.
- [3] 李亚非,颜东煌,田仲初.大型三塔斜拉桥铝合金试验模型的研制[J].长沙交通学院学报,2000,16(3):37-41.
- LI Ya-fei, YAN Dong-huang, TIAN Zhong-chu. Development and Manufacture of a Large Aluminum Test Model of Three Tower Cable-stayed Bridge[J]. Journal of Changsha Communications University, 2000, 16(3): 37-41.
- [4] 王戒蹊.芜湖长江大桥整体模型(施工阶段)试验研究[J].桥梁建设,1999(4):26-31.
- WANG Jie-zao. Test Study of Integral Model of Wuhu Changjiang River Bridge at Construction Stage[J]. Bridge Construction, 1999(4): 26-31.
- [5] 胡建华,沈锐利,张贵明,等.佛山平胜大桥全桥模型试验研究[J].土木工程学报,2007,40(5):17-25.
- HU Jian-hua, SHEN Rui-li, ZHANG Gui-ming, et al. A Total Bridge Model Study of the Pingsheng Bridge in Foshan[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(5): 17-25.
- [6] 刘爱荣,张俊平,赵新生,等.中山一桥模型试验及理论分析[J].中国公路学报,2005,18(3):75-79.
- LIU Ai-rong, ZHANG Jun-ping, ZHAO Xin-sheng, et al. Model Test of the First Zhongshan Bridge and Theoretical Analysis[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(3): 75-79.
- [7] 刘永健,刘剑,朱铭,等.双层桥面三桁刚性悬索加劲钢桁梁桥全桥静动力模型设计[J].建筑科学与工程学报,2008,25(1):84-87.
- LIU Yong-jian, LIU Jian, ZHU Ming, et al. Static and Dynamic Model Design of Total Bridge of Double-deck and Three Main Trusses Steel Bridge with Rigid Cable[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering 2008, 25(1): 84-87.
- [8] 王天亮,程宝辉.沈阳市富民桥全桥模型试验研究方法介绍[J].桥梁建设,2004(增1):70-74.
- WANG Tian-liang, CHENG Bao-hui. Method of Overall Bridge Model Test and Study of Fumin Bridge in Shenyang[J]. Bridge Construction, 2004 (S1): 70-74.
- [9] 刘自明.桥梁结构模型试验研究[J].桥梁建设,1999(4):1-7.
- LIU Zi-ming. Test Study of Bridge Structure Models[J]. Bridge Construction, 1999(4): 1-7.
- [10] 彭振华.三桁刚性悬索加劲钢桁梁关键技术研究[D].上海:同济大学,2007.
- PENG Zhen-hua. Study on Crucial Technique of Three Main Trusses Steel Bridge with Rigid Cable[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.

《土木工程学报》2009年征订通知

《土木工程学报》是中华人民共和国住房和城乡建设部主管,中国土木工程学会主办的土木工程类综合性学术期刊,以土木工程界中高级工程技术人员为主要读者对象;内容主要报道结构工程、土力学及基础工程、隧道及地下工程、公路桥梁工程、交通工程、建设管理、防灾减灾及计算机应用等在科研、设计、施工等方面的重要成果及发展状况,重视刊登结合工程实践的论著,并报道行业综述、科技信息和动态,促进各国土木工程界的学术交流。

《土木工程学报》创刊于1954年3月,现为美国《工程索引》(Ei)核心期刊、中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊),被中国科学引文数据库、中国期刊网、中国学术期刊(光盘版)全文数据库、万方网数据库等收录。

《土木工程学报》为月刊,大16开本,每期定价20元,全年共240元。国内外公开发行,国内邮发代号2-582,国外发行代号M288。《土木工程学报》2009年征订工作已经开展,欢迎各界有关单位及个人订阅。

地址:北京市三里河路9号建设部内 电话:(010)58934211 网址:www.cces.net.cn

邮编:100835 传真:(010)58933912 E-mail:tumuxuebao@263.net