

文章编号:1673-2049(2008)01-0084-04

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

刘永健¹, 刘 剑¹, 朱 铭², 邓淑飞¹, 张俊光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:介绍了东江大桥双层桥面三桁刚性悬索加劲钢桁梁全桥静动力模型的设计方法。在刚度相似法的基础上进行改进, 确定合适的相似比, 有效地解决了模型与实桥各部分结构弹性模量相似比不一致的模型设计问题; 并通过增加附加质量的方法, 使得模型桥各部分的角频率与实桥的角频率具有一致的相似比。最后介绍了模型试验自重荷载及活载加载的有限元计算方法。该方法解决了加载点多且分布不均匀的难题。

关键词:双层桥面; 刚性悬索; 静动力模型; 相似比; 模型设计

中图分类号: TU317.1 **文献标志码:** A

Static and Dynamic Model Design of Total Bridge of Double-deck and Three Main Trusses Steel Bridge with Rigid Cable

LIU Yong-jian¹, LIU Jian¹, ZHU Ming², DENG Shu-fei¹, ZHANG Jun-guang¹

(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: A design method for the static and dynamic test model of Dongjiang Bridge (double-deck and three main trusses steel bridge with rigid cable) was introduced. It presented an advance method based on stiffness similarity to ascertain equal similar relationships, which more effectively solved the design problem of model with difference of elastic modulus ratio in different parts between model and practicality, and through increasing additional mass, coherent similarity ratio of frequency between model and practicality was got. At last, authors introduced a calculation method of self-weight and moving load of model in brief. The method solves the trouble brought by many points of load and uneven mass.

Key words: double-deck; rigid cable; static and dynamic model; similarity ratio; model design

0 引言

近年来,随着中国桥梁工程事业的发展,越来越多的大跨径桥梁相继建造,这些桥梁有的结构特殊,

有的采用新材料、新工艺,结构的整体也表现出独特性。尽管目前有限元仿真分析程序能够对复杂结构进行精确分析,然而全桥模型试验仍然是解决桥梁工程领域科研和设计中出现新问题时不可缺少的手

收稿日期:2008-01-24

基金项目:国家西部交通建设科技项目(2006 318 812 112);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,博士生导师,工学博士,E-mail:steellyj@126.com。

段^[1-2]。例如世界首座独塔、单跨悬吊钢混结合梁的自锚式悬索桥——广东佛山平胜大桥(跨径350 m)^[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(主跨 350 m)^[4],均进行了整桥模型试验,用以研究桥梁结构的动、静力等结构受力特性。

1 工程概况

东江大桥是东莞市莞深高速公路与环城路上跨越东江南支流的一座双层公路特大桥,上部结构采用的是双层桥面三桁刚性悬索加劲连续钢桁梁。该大桥全长 432 m,跨径为 112 m+208 m+112 m。全桥共 14 个车道,上层的莞深高速公路为双向 6 车道,下层的北五环路为双向 8 车道,上、下层均为左右两幅桥,每幅桥宽 16.25 m。主桁立面采用有竖杆的华伦式桁架,上弦与上加劲弦之间用吊杆连接。主桁横向采用 3 桁结构,桁高为 10 m,节间长度为 8 m,节间距为 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。主桥布置如图 1 所示。

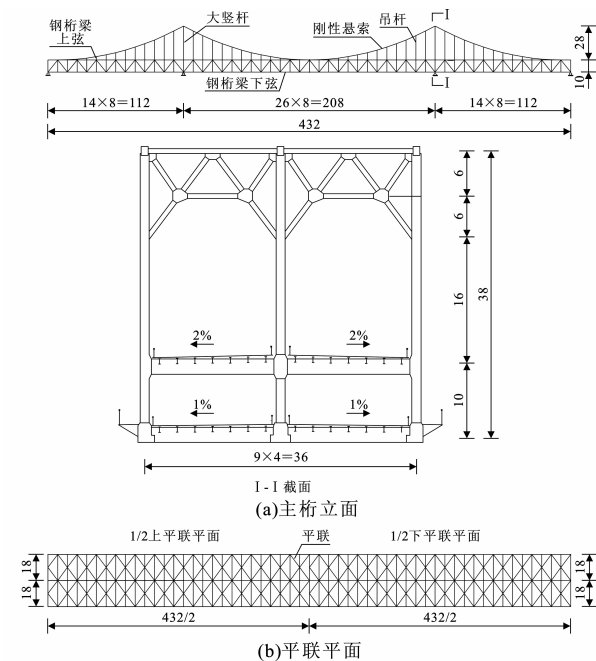


图 1 主桥布置(单位:m)

Fig.1 Main Bridge Layouts (Unit:m)

东江大桥是中国第 1 座双层公路桥,主桥为 3 片主桁双层桥面,整体空间效应突出,结构受力均较复杂^[5]。鉴于东江大桥结构形式上的新颖性及技术上的先进性和复杂性,为了全面研究此类桥型的整体性能,找出内在受力规律,了解大桥的静、动力性能、超载能力和稳定安全系数,进行全桥模型试验是一种很有效的手段。

2 模型总体设计

东江大桥模型试验要模拟施工过程,为了得到比较精确和理想的试验结果和数据,缩尺比的选择至关重要。广东佛山平胜大桥的全桥模型试验采用 1:20 的比例缩尺,芜湖长江大桥全桥模型试验采用 1:50 的比例缩尺。在综合考虑试验内容、模型材料、制作精度及试验场地的基础上,东江桥模型采用 1:25 的大比例缩尺,其全长为 4.48 m+8.32 m+4.48 m=17.28 m,全宽为 1.44 m,高为 1.52 m,上、下弦中心高差为 0.4 m,节间距为 0.32 m,主桁中心距为 0.72 m。模型材料均采用铝合金材料。实桥与模型材料对比如表 1 所示。

表 1 实桥及模型材料对比

Tab.1 Material Comparisons Between Practical Bridge and Model

实 桥		模 型		模型与实桥的
材料	弹性模量/MPa	材料	弹性模量/MPa	弹性模量比
钢材	2.06×10^5	铝合金	7.08×10^4	1/2.9
混凝土	3.45×10^4	铝合金	7.08×10^4	2.1/1

3 相似关系

对于模型试验,确定试验模型与实桥之间的相似关系是很重要的,只有满足一定的相似关系,才能保证试验模型与实桥的受力性能一致,分析过程中抓住影响结构受力变形的最主要因素,略去某些次要因素,并利用某些特性简化相似条件,以保证结构重要构件模拟的准确性。

3.1 静力模型相似分析

桥梁结构的整体静力分析一般用杆系有限元法^[6]。该方法最基本的方程就是单元刚度方程,由梁柱单元的单元刚度方程可得以下相似准数

$$\left. \begin{aligned} PL/(EA\delta) &= 1 \\ PL^3/(EA\delta) &= 1 \\ PL^2/(EI\Psi) &= 1 \\ ML^2/(EI\delta) &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: P 、 M 分别为作用力和力矩; A 、 I 分别为截面积和抗弯惯性矩; δ 、 Ψ 分别为位移和转角; L 为单元长度。

另外,由材料力学公式有 $\epsilon = P/(EA) + M/(EW)$, W 为抗弯模量, $\sigma = E\epsilon$,可得相似准数

$$\left. \begin{aligned} P/(EA\epsilon) &= 1 \\ M/(EW\epsilon) &= 1 \\ \sigma/(E\epsilon) &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

以材料自重作为外荷载,有 $\gamma AL=P$,可得相似准数

$$\gamma AL/P=1 \tag{3}$$

在式(1)~(3)的 8 个相似准数中,有 12 个物理量: $L、A、I、W、P、M、E、\delta、\Psi、\varepsilon、\sigma、\gamma$,因此,应根据试验要求指定一些相似常数,然后再根据这 8 个相似准数确定其余相似常数。

对于东江大桥,实桥采用了钢材和混凝土 2 种材料,而模型选材时都采用铝合金,因而同一结构中存在 2 种弹模比。对于这种情况,一般工程中的做法^[7-15]是将结构的 $EA、EI、EW$ 作为复合物理量,按相应比例缩尺后得到模型的 $EA、EI、EW$ 。由于 $EA、EI$ 反映的是结构的轴向和弯曲刚度,因此称之为刚度相似法。

在东江大桥的模型制作中,笔者在上述方法的基础上进行改进:对于钢桁杆件,将 E 作为单独的物理量,按截面特性相似进行模拟,这样所得结构的 $EA、EI、EW$ 与按刚度相似法所模拟的 $EA、EI、EW$ 存在着一个比例关系,即弹性模量比 $\lambda_E (\lambda_E=E_{Al}/E_s)$;对于混凝土桥面板,按照比例 λ_E 进行刚度相似模拟,即模型中桥面板的刚度也是按刚度相似法所模拟的 λ_E 。这样整个模型的刚度都是按刚度相似法模拟的 λ_E ,所需配重也缩减为原来的 λ_E (若使用杠杆法加载所需配重更小)。

综上所述,东江大桥静力模型采用的相似原则如表 2 所示。

表 2 模型及实桥的相似关系

Tab. 2 Similar Relationships Between Model and Practical Bridge

物理量	钢桁杆件	混凝土桥面板
弹性模量	$E_m/E_p=\lambda_E=1/2.9$	$E_m/E_p=\lambda_E=2.1/1$
面积	$A_m/A_p=\lambda^2=1/25^2$	$A_m/A_p=\lambda_E\lambda^2/\lambda_E=1/25^2/6.09$
惯性矩	$I_m/I_p=\lambda^4=1/25^4$	$I_m/I_p=\lambda_E\lambda^4/\lambda_E=1/25^4/6.09$
密度	$\rho_m/\rho_p=\lambda_E/\lambda=25/2.9$	$\rho_m/\rho_p=\lambda_E/\lambda=25/2.1$
应力	$\sigma_m/\sigma_p=\lambda_E=1/2.9$	$\sigma_m/\sigma_p=\lambda_E=2.1$
应变	$\varepsilon_m/\varepsilon_p=1$	$\varepsilon_m/\varepsilon_p=1$
集中荷载	$p_m/p_p=\lambda_E\lambda^2=1/25^2/2.9$	$p_m/p_p=\lambda_E\lambda^2=1/25^2/2.9$
线荷载	$q_m/q_p=\lambda_E\lambda=1/25/2.9$	$q_m/q_p=\lambda_E\lambda=1/25/2.9$
位移	$f_m/f_p=\lambda=1/25$	$f_m/f_p=\lambda=1/25$

由表 2 相似关系分析可见,对于由不同材料组成的结构,在进行相似比为 λ 的静力模型设计时,可先根据模型材料与实桥材料的弹性模量比 λ_E ,确定一个合适的相似比例 $\lambda_E EA$ (或 $\lambda_E EI$),模型的各个部分均按照此比例进行刚度相似模拟,可达到模型与实桥 ε 相等的目的,同时可减少配重。

3.2 动力模型相似分析

在模型桥的动力试验中,要求模型桥与实桥之

间首先具有 2 种基本的相似,即几何相似和运动学相似,模型桥与实桥之间的所有重要力学量都可建立某种简单的、确定的关系^[16]。该试验的动力试验主要是测试结构的自振特性,因此,相似关系可根据结构的自由振动公式来分析。结构无阻尼自由振动方程为

$$(\mathbf{K}-\omega^2\mathbf{M})\mathbf{x}=0 \tag{4}$$

式中: \mathbf{K} 为结构刚度矩阵,刚度元素有 $EA/L、EI/L^3$ 等; \mathbf{M} 为质量矩阵,对于集中质量矩阵,元素为 ρAL , ρ 为材料密度; \mathbf{x} 为位移列阵; ω 为角频率。

于是可得相似准则

$$EA/(L^2\omega^2\rho A)=1 \tag{5}$$

$$EI/(L^4\omega^2\rho A)=1 \tag{6}$$

根据静力相似关系可得

$$\lambda_\omega=[\lambda_{EI}/(\lambda^4\lambda_\rho\lambda_A)]^{1/2} \tag{7}$$

$$\lambda_\omega=[\lambda_{EA}/(\lambda^2\lambda_\rho\lambda_A)]^{1/2} \tag{8}$$

式(7)、(8)是等价的,对于类似东江大桥这种空间桁架结构,截面面积对结构刚度的贡献所占比重较大,且模型截面的选取也以面积相似为主,因此取式(8)进行动力相似分析。

东江大桥实桥用的钢材、混凝土和模型用的铝合金材料的弹性模量比分别为 $E_{Al}/E_s=1/2.9、E_{Al}/E_h=2.1/1$,密度比分别为 $\rho_{Al}/\rho_s=1/2.9、\rho_{Al}/\rho_h=1$ 均不相同,故采用以下步骤进行动力相似分析。

(1)对结构钢杆件部分进行相似分析,由上述相似关系可知: $\lambda=1/25, \lambda_{EA}=\lambda_E\lambda^2=1/25^2/2.9, \lambda_A=\lambda^2=1/25^2, \lambda_\rho=1/2.9$,代入式(8),得 $\lambda_\omega=25$ 。

(2)对结构混凝土桥面板部分进行相似分析,由上面相似关系可知: $\lambda=1/25, \lambda'_{EA}=\lambda_E\lambda^2=1/25^2/2.9, \lambda'_A=\lambda_E\lambda^2/\lambda_E=1/25^2/6.09, \lambda'_\rho=1$,代入式(7),得 $\lambda'_\omega=25\sqrt{2.1}$ 。

(3)由步骤 1、2 可以看出, $\lambda_\omega、\lambda'_\omega$ 并不与实桥具有一样的比例关系,这样将给动力特性测试带来不便,为了使结构的模型中杆件和桥面板具有相同的角频率比,可将模型桥面板的密度 ρ_m 增大到按 1:25 比例缩尺的 2.1 倍,由于桥面板的质量不大,可通过增加节点附加质量的方式实现(附加质量与模型应固定好,且应尽量降低其对结构刚度的影响),这样模型的钢杆件部分与混凝土桥面板部分的角频率与实桥对应部分具有一致的比例关系,即模型桥的角频率为实桥的 25 倍。

4 试验加载

4.1 结构自重荷载

从相似关系分析可知,在静力相似分析时,材料

密度的相似常数很大,模型材料不可能有这么大的重度,因此,可以采用配重的方法来模拟,配重根据各主要构件荷载传递的路径来进行,尽量使各构件符合实际的受力特点。

东江大桥作为双层空间桁架结构,空间效应十分显著,且杆件类型多样,全桥质量分布很不均匀,这给配重的施加带来了困难。为了确保模型试验结果的准确性,经过充分考虑,恒载配重的施加可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,就可得到较精确的试验结果,经初步计算,结构自重所需配重约 16 t。

4.2 活 载

模型桥的活载内力计算不同于实桥。实桥计算时是根据实际的汽车车列、人群荷载,通过有限元计算软件求出内力及位移影响线,然后求出活载在影响线上的最不利荷载位置和最大影响量;而模型桥也按照这种方法布载,工作就将变得繁琐。实际上,直接利用实桥的活载计算结果所得到的最不利荷载情况,再根据相似关系推算模型桥上的布载,既简单又合理。具体方法如下:

(1)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。

(2)对各活载效应相应的影响线峰值附近进行等效加载,使得实桥测点位置的内力、位移等效应值与活载效应值相等,这样就求得活载作用下的等效荷载^[17]。

(3)根据求得的实桥等效荷载,采用表2中的荷载相似关系,就可求得模型桥在各活载工况下所需施加的荷载。

5 结 语

(1)笔者在刚度相似法的基础上进行改进,更有效地解决了模型与实桥各部分结构材料弹性模量相似比不一致的模型设计问题,同时减少了静力模型的配重。

(2)采用附加质量的方法来增加模型桥面板的质量,从而使得模型的角频率与实桥的角频率具有一致的比例关系。

(3)通过有限元方法对动、静力模型中恒载和活载配重的计算及加载方法进行了介绍,较好地解决了配重施加方法及分配问题。

参考文献:

References:

- [1] 章关永. 桥梁结构试验[M]. 北京:人民交通出版社, 2002.
ZHANG Guan-yong. Model Test of Bridge Structures [M]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [2] 刘自明. 桥梁结构模型试验研究[J]. 桥梁建设, 1999, 29(4): 1-7.
LIU Zi-ming. Test Study of Bridge Structure Models [J]. Bridge Construction, 1999, 29(4): 1-7.
- [3] 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.
- [4] 王戒躁. 芜湖长江大桥整体模型(施工阶段)试验研究[J]. 桥梁建设, 1999, 29(4): 26-31.
WANG Jie-zao. Test Study of Integral Model of Wu-hu Changjiang River Bridge at Construction Stage [J]. Bridge Construction, 1999, 29(4): 26-31.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 石志源, 王 博, 曾明根. 双层桥面钢管混凝土拱桥试验模型设计及理论分析[J]. 桥梁建设, 2003, 33(4): 34-36.
SHI Zhi-yuan, WANG Bo, ZENG Ming-gen. Design and Analysis of Test Model of Double-deck Concrete-filled Steel Tube Arch Bridge [J]. Bridge Construction, 2003, 33(4): 34-36.
- [8] 崔 军, 孙炳楠, 楼文娟, 等. 钢管混凝土桁架拱桥模型试验研究[J]. 工程力学, 2004, 21(5): 83-86.
CUI Jun, SUN Bing-nan, LOU Wen-juan, et al. Model Test Study on Concrete Filled Steel-tube Truss Arch Bridge [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(5): 83-86.
- [9] 任伟平, 李小珍, 李 俊, 等. 公轨两用钢桁桥轨道横

