

文章编号:1671-8879(2009)02-0046-05

自锚式悬索与斜拉组合体系桥梁使用阶段模型试验

徐 岳, 邹存俊, 任更锋, 陈万春

(长安大学 旧桥检测与加固技术交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘 要:为充分了解自锚式悬索与斜拉组合体系桥梁使用阶段的受力性能,以实桥为工程依托,基于相似理论,建立了缩尺比例为 1:20 的全桥试验模型,并进行了使用阶段模型试验。分析了自锚式悬索与斜拉组合体系桥梁使用阶段主梁的变形规律、主缆的线形变化特征以及主塔的受力特性。研究表明:使用阶段实测模型主塔最大应力增量为 2.08 MPa;斜拉区受力变化对悬索区结构影响明显;全桥对称加载主跨跨中挠度比主跨对称加载减小了 14.3%。

关键词:桥梁工程;自锚式悬索;斜拉;组合结构;模型试验;空间杆系;有限元模型

中图分类号:U448.216

文献标志码:A

Model test of self-anchored suspension and cable-stayed combination bridge in service stage

XU Yue, ZOU Cun-jun, REN Geng-feng, CHEN Wan-chun

(Key Laboratory for Bridge Detection and Reinforcement Technology of Ministry of Communications, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to describe the mechanical behavior of self-anchored suspension and cable-stayed combination bridge under service stage, the full bridge model with scale ratio 1:20 is built based on the similarity theory. Through the model test, the deformations of main cables and main girders are analyzed. The mechanical characteristics of the tower are also studied. The results show that: the maximum increase of tower stress is 2.08 MPa in service stage; the change of force in cable-stayed bridge has great effects on the deformation of self-anchored suspension; compared with the case of symmetrically loading on main span, the deflection of main span decreased by 14.3% in the case of symmetrically loading on the full bridge. 3 tabs, 9 figs, 6 refs.

Key words: bridge engineering; self-anchored suspension; cable-stayed; composite structure; model test; spatial member; finite element model

0 引 言

自锚式悬索与斜拉组合体系桥梁是一种新型结构桥梁,其主塔一侧为自锚式悬索桥,另一侧为斜拉桥,二者有机结合。作为现代城市的桥梁,在实现桥

梁本身使用功能的同时,也要体现桥梁的美观和社会效益。然而,国内外目前几乎没有关于该类型桥梁的受力性能研究方面的报道。Yuzuru 等^[1]和 Powers 等^[2]分别对日本 Nagisa 大桥和美国 North Avenue 大桥进行了结构特征分析,但其桥型为混

收稿日期:2008-04-16

基金项目:国家西部交通建设科技项目(2005 318 223 16);江苏省交通科学研究计划项目(06Y19b)

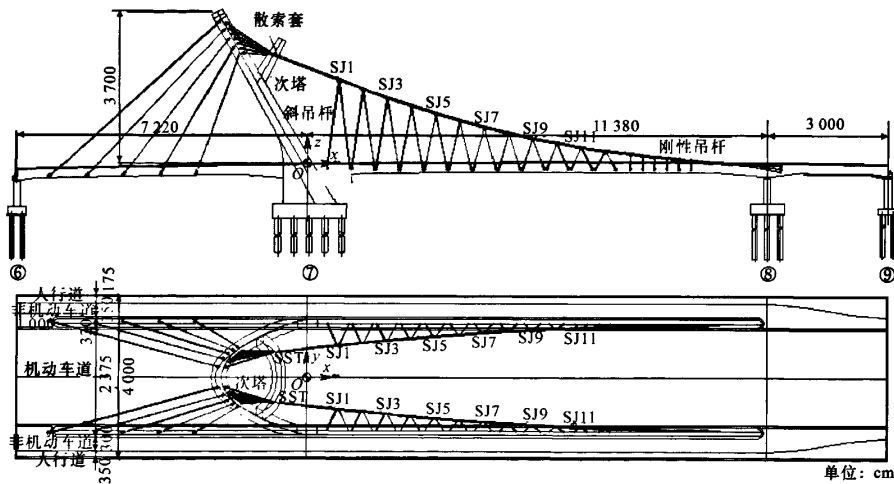
作者简介:徐 岳(1958-),男,陕西乾县人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:yx1958@163.com。

合结构体系,即悬索和斜拉结构位于同一跨内,与本文的组合结构并不相同。为此,本文通过模型试验这一有效、可靠的手段,研究这种桥型使用阶段的力学行为,并校核设计计算方法,验证结构的安全性。

1 依托工程

本文依托工程为中国首座自锚式悬索与斜拉组合体系桥梁。跨径组合为 72.2 m+113.8 m+30 m,主桥桥面宽为 40 m。主桥采取拱门独塔 3 跨自锚式悬索与斜拉组合体系,中跨采用悬索结构,主缆锚固于纵梁端部,另一端经过次塔后散成 7 根次缆锚固于主塔,成空间缆索体系;边跨采用斜拉结构;

短跨为预应力混凝土梁,如图 1 所示。
主塔采用变截面拱形结构,向边跨 30°倾斜,高 37 m。上方设置次塔柱,次塔柱与主塔柱交角为 60°。主梁采用箱形结构,主跨跨中部分 87 m 范围内采用混凝土-钢结合梁,其余部分采用预应力混凝土箱梁。主塔边跨设置 5 根斜拉背索,主缆、斜拉索及柔性吊杆均采用成品钢丝绳。主缆由 7 根次缆组成,采用 $\Phi 7 \times 397$ ($\Phi 7 \text{ mm} \times 397$ 根)成品钢丝绳。斜拉索为 $\Phi 7 \times 253$ 成品钢丝绳,采用双层 PE 防护。普通吊杆全桥共 48 根(24 对),采用 $\Phi 7 \times 73$ 钢丝;刚性吊杆全桥共 12 根(6 对),采用 $\Phi 113$ 的 40CrNiMoA 合金钢。



注:SST、SJ1、SJ3、SJ5、SJ7、SJ9、SJ11 均为主缆位移增量测点编号。

图 1 实桥总体构造

2 模型试验

2.1 试验目的及内容

通过模型试验,研究使用阶段主缆和主梁的变形特征,分析主塔、主缆及索的受力特性。

2.2 模型材料及相似关系

由于实桥结构形式复杂、材料多样,为保证模型结构的相似性,试验采用铝合金、钢材等作为模型材料。钢、铝合金等金属材料制作模型具有以下优点:①具有较高的弹性极限,在弹性范围内有较好的线弹性性质;②材料性能稳定,荷载-变形的时间效应不明显;③导热性好,应变片受温度影响小,测量精度高;④铝合金性能与混凝土接近;⑤加工制作精度高。缺点是金属的弹性模量较大,钢的弹性模量与实桥相等,铝合金的弹性模量一般为混凝土的 2 倍,要求试验载荷、加载设备能力都较大,需通过结构配

重来克服这些缺点。由于模型设计中采用多种材料组合,弹性模量常数大小不一,把弹性模量 E 作为单独物理量来分析较难处理,所以需将抗压刚度 EA 、抗弯刚度 EI 分别作为复合物理量来进行刚度相似^[3-6]。根据相似理论确定相关的相似常数,如表 1 所示。

表 1 模型试验主要的相似常数

几何常数	集中心力常数	抗压刚度常数	抗弯刚度常数	应变常数
20	400	400	160 000	1

2.3 模型制作

根据相似常数确定模型细部及总体构造,模型全长为 10.8 m,其中边跨 3.61 m,中跨 5.69 m,短跨 1.5 m,主塔在桥面上高度为 1.85 m,细部尺寸如表 2(见下页)所示。

实桥箱形结合梁腹板及底板采用钢材模拟,实

表 2 模型与原型尺寸参数

结构类型		顶板/ mm	隔板/ mm	加劲肋/ mm	中腹板/ mm	斜腹板/ mm	底板/ mm
结合梁	原型	340	16.0	10.0	16.0	16	16
	模型	8	0.8	0.5	0.8	1	1
箱梁	原型	280	40.0(160)		450.0	450	400
	模型	6	10.0(40)		14.0	14	12
主塔	原型	40	20.0(40)	40.0			
	模型	2	1.0(2)	2.0			

注:括号中数字为个别隔板尺寸。

桥结合梁混凝土桥面板及混凝土箱梁采用铝合金模拟。模型主梁设计在考虑几何相似条件的基础上,保证截面的刚度相似。采用铝合金的主梁模型,箱壁及桥面板厚度在按几何缩尺得到的基础上减半,并对各部分尺寸进行微小调整。

根据主塔结构特点,试验模型采用钢材制作,主塔模型以塔顶为分界线,分成 2 个对称塔段加工,然后进行拼装焊接。由于模型主塔与主梁采用的材料不同,塔梁连接形式为螺栓连接。

索缆材料的选取考虑索缆的可张拉性、可测量性,同时兼顾模型试验的可操作性。模型主缆选用 $\Phi 8.3$ 的钢芯钢丝绳,模型斜拉索为 $\Phi 8$ 钢丝,柔性 and 刚性吊杆分别采用 $\Phi 5$ 钢丝和 $\Phi 10$ 丝杠。

2.4 支座形式及模拟

实桥分别在 6 号、8 号、9 号墩设置 4 个、2 个、4 个盘式支座,横桥向布置。为模拟各墩的支撑情况,专门设计制作微型“球”支座。具体制作方法是在 2 块方形钢板中间安放钢珠,通过钢珠来实现结构的转动。在其中一块钢板上设置球形槽,限定钢珠的位置;另一块钢板沿桥纵向开槽,保证钢珠能够在槽内滑动,从而实现结构的水平位移。模型支座布置模拟实桥,并在每个模型支座下设置压力传感器,共计 10 个。

2.5 加载系统

模型桥采用铝合金和钢,按缩尺比例 1 : 20 制成,其质量远达不到实桥质量的 1/20,故需对结构进行配重。模型配重根据各主要构件荷载传递的路径相同来进行,尽量使各构件符合实际的受力特点。主塔荷载补偿以集中荷载的形式,通过挂篮施加;主缆恒载补偿采用沿索长度方向挂重的方式引入;考虑到主梁配重很大,主梁荷载补偿(考虑施工荷载、人行道荷载、人行栏杆荷载等)采用杠杆系统加载(1 : 6)实现。模型配重如图 2~图 5 所示。

2.6 测点布置

全桥试验模型测点包括索力测点、位移测点及

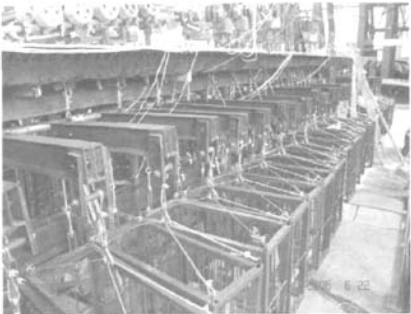


图 2 主梁配重



图 3 主塔配重

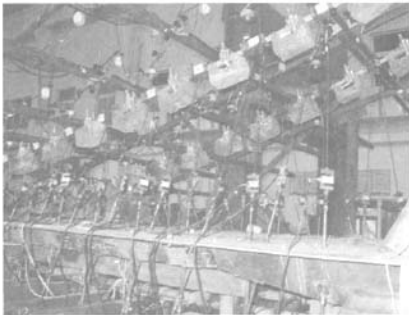


图 4 主缆配重(柔性吊杆区)

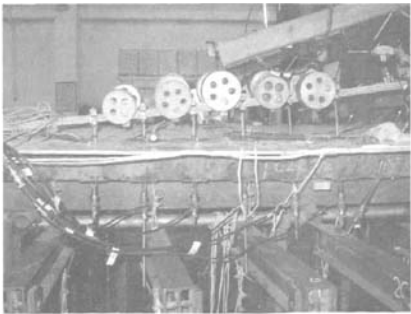


图 5 刚性吊杆区主缆配重

应变测点。

索力测点主要测量模型桥的各分缆、斜拉索和斜吊杆的力的分布和变化。在各分缆、斜拉索和斜

吊杆的一端设置1个自制的应变式压力传感器。另外,为验证自制传感器的精度,在20根斜吊杆端部额外安装拉力传感器,索力测点共计104个。

位移测点主要测量模型桥主梁、主缆及主塔的变形情况。主梁沿纵向布置6个测试截面,分别是斜拉区1/3截面、斜拉区2/3截面、悬索区1/4截面、悬索区1/2截面、悬索区3/4截面和短跨区1/2截面,每截面放置2个百分表;主缆位移测点包括散索套测点、1[#]、3[#]、5[#]、7[#]、9[#]和11[#]索夹测点,各测点沿 x 、 y 、 z 3个方向各放置百分表或位移计;主塔测点位于塔顶,也是沿 x 、 y 、 z 3个方向各放置百分表。位移测点共计59个。

应变测点主要测量模型桥主梁及主塔的应力变化及分布规律,包括主塔应变测点和主梁应变测点。应变测点共计122个。

2.7 试验工况

模型试验荷载包括车道荷载(均布荷载和集中荷载)和人群荷载。试验中利用荷载等效的原则,将其转化为集中力,通过杠杆加载系统施加。试验工况包括主跨对称加载和全桥对称加载。

3 试验结果与分析

采用有限元计算的方法,建立结构分析计算模型,在试验初始阶段验证模型的初始形状,并通过模型试验,对计算方法进行验证。本文将试验模型作为计算对象,采用与模型结构一致的参数、支承方式和荷载作为计算条件。计算中,主缆、斜拉索和斜吊杆采用索单元,主梁、主塔和下塔柱采用空间梁单元,考虑几何非线性效应。

3.1 主梁挠度

模型试验分别在1.5 m短跨跨中、1/4悬索区段、1/2悬索区段、3/4悬索区段、1/3斜拉区段和2/3斜拉区段处设置测点,测点编号分别为LN1、LN2、LN3、LN4、LN5、LN6。主梁挠度值如图6、图7所示。图6、图7中,Z1、Z2、Z3、Z4分别表示由短跨至斜拉区的支座位置测点编号。

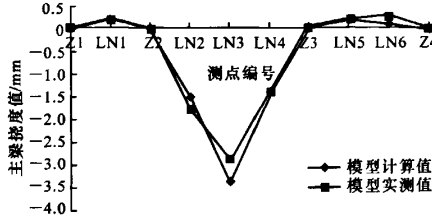


图6 模型主梁挠度(主跨对称加载)

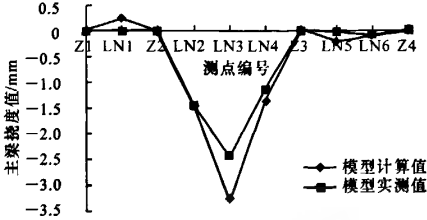


图7 模型主梁挠度(全桥对称加载)

由图6、图7可知:①2个工况下,实测值和计算值主梁最大下挠值均发生在悬索区跨中位置,其中主跨对称加载工况,实测最大下挠值为2.86 mm,全桥对称加载工况,实测最大下挠值为2.45 mm;②全桥对称加载悬索区主梁挠度值小于主跨对称加载主梁挠度值,说明斜拉区施加的荷载引起斜拉索力的增加,一定程度上限制主塔向悬索区偏转,从而减小了悬索区主梁挠度值;③主跨对称加载工况,斜拉区和短跨区主梁出现上挠现象,但上挠值较小;④全桥对称加载工况,斜拉区主梁下挠,短跨区主梁下挠,但挠度值较小;⑤实测值与计算值吻合较好。

3.2 主缆位移增量

主缆位移增量(见下页图8、图9)主要通过测量主缆对应的散索套及索夹位置的变化量来确定,编号分别为SST、SJ1、SJ3、SJ5、SJ7、SJ9、SJ11。模型试验中坐标的规定如图1所示。

由图8、图9可知:①2个工况下,主缆的线形变化规律相似,主缆线形变化均匀,跨中位置对应主缆位移量较大;②主缆 x 方向位移较小, y 方向位移实测值与计算值相差较大,主要是由于模型制作过程中使用的连接吊杆的“万向节”在 y 方向具有一定的约束作用,从而限制该方向的位移;③主缆 z 方向位移最大值发生在9[#]索夹位置,对应于主梁跨中截面处,其中主跨对称加载位移值为2.82 mm,全桥对称加载位移值为2.44 mm,与主梁挠度值基本吻合,说明主缆与主梁在使用阶段能够协同工作,结构受力合理;④实测南北侧主缆位移值相差不大,说明模型结构对称性较好。

3.3 主塔应力

主塔应力模型实测值与模型计算值比较结果如表3(见下页)所示。

由表3可知:①主塔应力最大值发生在主塔根部;②主跨对称加载主塔应力最大值大于全桥对称加载主塔应力最大值,说明在斜拉区施加荷载使得斜拉索力增加,能够平衡部分主缆的拉力,降低主塔根部应力。

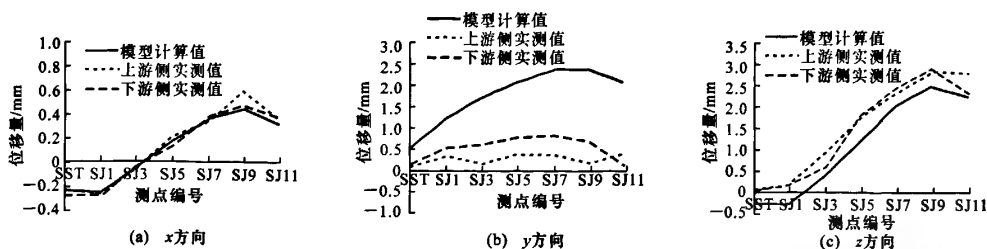


图8 模型主缆位移(主跨对称加载)

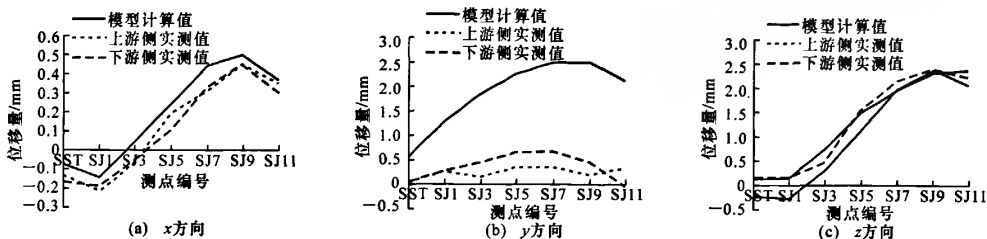


图9 模型主缆位移(全桥对称加载)

表3 模型主塔应力

工况	位置	项目	MPa			
			南侧		北侧	
主跨对称加载	塔根处	实测值	1.84	-1.92	2.08	-1.76
		计算值	2.03	-1.95	2.03	-1.95
	塔中部	实测值	0.72	-0.96	1.04	-0.72
		计算值	0.99	-1.18	0.99	-1.18
全桥对称加载	塔根处	实测值	0.96	-0.24	1.28	-0.48
		计算值	1.52	-0.66	1.52	-0.66
	塔中部	实测值	0.48	-0.56	0.88	-0.48
		计算值	0.91	-0.60	0.91	-0.60

4 结 语

(1)针对中国首座自锚式悬索与斜拉组合体系桥梁进行了试验研究;主梁挠度及主缆位移结果表明,主缆与主梁能够协同工作,验证了试验模型的可靠性;实测主塔最大应力增幅为 2.08 MPa,增幅不大,说明使用阶段主塔受力平衡性较好,主塔是安全的,从而验证了设计的合理性与安全性。

(2)模型计算值与模型实测值吻合较好,因此,合理的运用有限元计算方法,进行自锚式悬索与斜拉组合体系桥梁分析是可行的。

(3)与主跨对称加载工况比较,全桥对称加载工况下主跨跨中挠度减小了 14.3%,说明斜拉区与悬索区结构受力相互影响,在该类桥梁的施工和使用阶段都应予以充分的重视。

参考文献:

References:

[1] Yuzuru S, Shinichi S, Katsutoshi M, et al. Construc-

tion of Nagisa bridge hybrid system of cable-stayed PC bridge and steel suspension bridge[J]. Technical Memorandum of Public Works Research Institute, 2003,3920:53-60.

[2] Powers T, Price K, He E, et al. Reconstruction of north avenue bridge over the Chicago river, Chicago, Illinois [C]// Transportation Research Board, 6th International Bridge Engineering Conference, Washington DC: Transportation Research Board, 2005:459-464.

[3] 李德寅,王邦桐,林亚超. 结构模型实验[M]. 北京:科学出版社,1996.

[4] 谭明鹏,王荣辉,黄永辉,等. 刚性悬索加劲钢桁架梁桥特殊节点模型试验[J]. 中国公路学报,2008,21(1):47-52.

TAN Ming-peng, WANG Rong-hui, HUANG Yong-hui, et al. Special joint model test of stiff suspension reinforced steel truss bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1):47-52.

[5] 张永健,黄平明,狄 谨,等. 波形钢腹板组合箱梁自振特性与试验研究[J]. 交通运输工程学报,2008,8(5):76-80.

ZHANG Yong-jian, HUANG Ping-ming, DI Jin, et al. Free vibration characteristics and experiment study of composite box girder with corrugated steel webs [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(5):76-80.

[6] 陈星烨,马晓燕,宋建中. 大型结构试验模型相似理论与推导[J]. 长沙交通学院学报,2004,20(1):11-14.

CHEN Xing-ye, MA Xiao-yan, SONG Jian-zhong. The comparability analysis and deduction of a large structure test model[J]. Journal of Changsha Communications University, 2004, 20(1):11-14.