

文章编号: 1001-4888(2009)01-0027-08

车载作用下大跨度悬索桥钢箱梁 受力状态的实验研究^{*}

王浩, 李爱群, 郭彤, 赵耕文

(东南大学 土木工程学院, 江苏南京 210096)

摘要: 钢箱梁结构在现代大跨度悬索桥体系中较多采用。作为最主要的组成部分之一, 其在车辆荷载作用下的受力状态倍受关注。然而目前通过有限元计算还难以获得钢箱梁各细部构造的精确应力值。本文以润扬长江公路大桥南汊悬索桥为背景, 介绍了该桥静动载试验中的车辆加载工况和钢箱梁测试截面应力测点的布置等。利用该桥钢箱梁实测应力结果, 分析了多种车辆荷载工况下大跨度悬索桥钢箱梁的应力水平及其分布, 同时进行了钢箱梁各测试截面受力状态的对比研究, 在此基础上总结了大跨度悬索桥钢箱梁结构在车载作用下的受力特点。研究结论为同类钢箱梁的受力状态分析提供了参考依据。

关键词: 大跨度悬索桥; 钢箱梁; 车辆荷载; 受力状态

中图分类号: U448.25 **文献标识码:** A

0 引言

随着流线形扁平钢箱梁突出的优点逐步被工程界所认识和采纳, 现代绝大多数大跨度缆索支承桥梁大都采用流线形薄壁扁平钢箱梁。由于绝大多数大跨度悬索桥都修建在铁路和公路交通要道上, 具有重要的交通枢纽作用, 且车辆荷载直接作用在主梁上, 使得大跨度悬索桥扁平钢箱梁结构在车辆荷载作用下的受力状态倍受桥梁工程界所关注, 进行钢箱梁结构的受力状态研究也因此成为桥梁工程领域的重点问题之一^[1-6]。

在传统的大跨度悬索桥抗风抗震分析中, 受计算机软硬件设施的限制, 通常采用“脊骨梁式”模型来模拟悬索桥体系中的扁平钢箱梁结构^[7,8]。该模型由于简化模拟了桥面系结构, 无法考虑加劲梁的畸变、剪力滞效应等因素的影响, 难以满足精细化研究的要求^[9]。近年来一些学者开始使用板壳单元来进行大跨度悬索桥桥面系的模拟, 为了提高计算效率还引入了子结构^[9]、子模型^[10]以及组合单元^[11]等计算技术。这类模型对计算机性能要求较高, 建模过程复杂繁琐, 庞大的模型还增大了计算中发生意外的概率, 而且仍难以获得钢箱梁结构的焊点、荷载直接作用点等细部构造的精确应力值。因此, 要准确把握大跨度悬索桥扁平钢箱梁结构在车辆荷载作用下的受力状态, 通常还需要借助于现场静动载试验的实测结果来对有限元计算结果进行验证。

为了检验桥梁设计和施工质量, 把握大桥结构的竣工状态, 于 2005 年 1 月 4~6 日进行了润扬长江公路大桥南汊悬索桥(简称润扬悬索桥)的静动载试验, 其中对 8 种车辆荷载工况下钢箱梁跨中、1/4 和

^{*} 收稿日期: 2008-12-05; 修订日期: 2009-02-02

基金项目: 国家杰出青年基金项目(50725828); 国家“863”计划项目(2006AA04Z416); 国家自然科学基金重点项目(50538020); 国家自然科学基金青年基金项目(50378017); 国家教育部博士点基金资助项目(200802861012)

通讯作者: 王浩(1980—), 男, 讲师、博士, 从事大跨度桥梁健康监测及抗风抗震研究。E-mail: whzjn@sina.com

1/8 截面的应力分别进行了测试^[10]。本文根据该桥静动载试验中钢箱梁应力实测结果,系统地分析了车辆荷载作用下大跨度悬索桥钢箱梁典型截面的应力水平及其分布规律,总结了钢箱梁结构在车载作用下的工作行为和受力特点,旨在为同类钢箱梁的受力状态分析及相关工程设计提供参考依据。

1 工程概况

润扬悬索桥为主跨 1490m(中国第一,世界第三)的单跨双铰简支钢箱梁桥,中跨矢跨比为 1:9.96。两边跨长为 470m,边跨无吊索,其立面布置图如图 1 所示。该桥主塔为钢筋混凝土多层门式框架,塔柱为变壁厚矩形单箱单室结构,设三道横梁。主缆采用预制平行索股,每根主缆为 184 股,每股 127 根镀锌高强钢丝。南北锚碇均采用重力式混凝土锚体。吊索间距 16.1m,吊索与主缆和加劲梁均采用销连接。本桥在国内首次采用了缆、梁固结的刚性中央扣代替跨中短吊索。

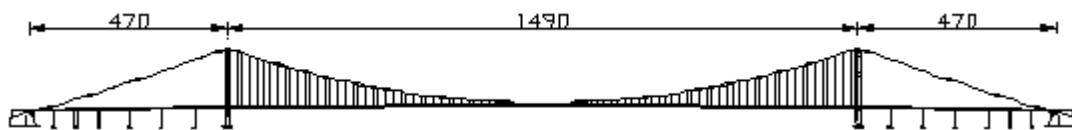


图 1 润扬悬索桥立面布置图(单位:m)

Fig. 1 Configuration of Runyang Suspension Bridge (unit: m)

润扬悬索桥主梁也采用了全焊扁平流线形封闭钢箱梁,总长度为 1485.16m,分为梁端段、跨中段、跨中相邻段和标准段。其中每个标准梁段长 16.1m,共计 84 个,总长 1352.40m。中心线处梁高 3.0m,总宽 38.7m(含风嘴、检修道宽度)。钢箱梁主体结构采用 Q345-D 钢,钢桥面板厚度为 14mm,U 形肋厚度为 6mm,横隔板间距 3.22m。对这样一座特大跨重要桥梁结构,显然有必要对其扁平钢箱梁结构在车辆荷载作用下的受力状态进行深入研究,为今后大桥运营期间高效率钢箱梁结构的养护维修提供技术依据。

2 车辆加载工况

2.1 加载车辆

根据静载试验荷载效率及主梁控制断面的设计弯矩值,同时考虑加载车辆的来源以及试验过程中车辆是否容易调头等因素,选用相当于公路规范中汽车-20 级荷载中的重车(300kN)作为加载车辆。试验选用车辆的技术参数如表 1 所示。

表 1 润扬悬索桥静载试验加载车辆的技术参数

Tab. 1 Technical parameters of Vehicle loads in the field test of RSB

轴距(mm)		轮距(mm)		重量(kN)		
中前轴	中后轴	前轮	后轮	前轴	中后轴	总重
3500	1350	1914	1847	60	240	300

试验各工况下所需加载车辆的数量,根据设计标准活载产生的工况下的最不利效应值按照荷载效率系数换算得到。经计算得到本次静载试验共需要 300kN 标准车 52 辆。试验前对每辆加载车按照试验要求进行配重。

2.2 加载工况

润扬悬索桥静载试验共计八种车载工况,其中工况 1、2、3 和 4 下加载车辆总数较多,钢箱梁整体结构的受力情况相对不利,因此本文选取这四种工况进行对比分析。所选四种工况对应的车辆加载纵桥向位置如表 2 所示,横桥向位置均如图 2 所示,图中单位以 cm 计,其中以加载车辆左前轮标记加载位置。

表 2 润扬悬索桥静载试验工况
Tab. 2 Vehicle load cases in the field test of RSB

工况	加载车辆位置
1	主梁中跨 3L/4 截面。(63—75)52 辆车排成 4 列 13 行,行距 16.1m,横桥向对称。
2	主梁中跨 L/2 截面。(40—52)52 辆车排成 4 列 13 行,行距 16.1m,横桥向对称。
3	主梁中跨 L/4 截面。(17—29)52 辆车排成 4 列 13 行,行距 16.1m,横桥向对称。
7	主梁中跨 L/4 截面。(22—24)16 辆车排成 4 列 4 行,行距 9.6m,横桥向对称。

注:括号中的数据为对应的吊杆编号,中央扣编号为 46,故最大编号数为 91。

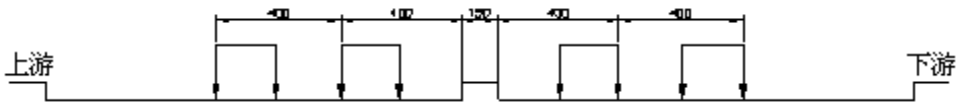


图 2 加载车辆横桥向布置图 (单位:cm)
Fig. 2 Lateral location of the vehicle loads (unit: cm)

3 应力测点布置

润扬悬索桥钢箱梁 1/8 截面的静载应力测点分布详图见图 3。图中编号说明如下:第一个字母 C 表示钢箱梁 1/8 测试截面;第二字母 U 表示顶板测点、D 表示底板测点、U 表示箱内测点;第三个字母 R 表示右车道(下游)、L 表示左车道(上游);第四个数字为编号。钢箱梁 1/4 及 1/2 截面的静载应力测点布置与 1/8 截面类似,在顶板、顶板 U 形肋以及底板三个部位的应力测点布置完全相同,可参见文献 [10]。

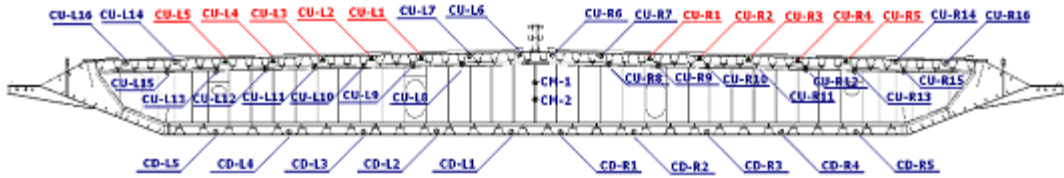


图 3 钢箱梁 1/8 截面应力测点分布图
Fig. 3 Stress measurement points of L/8 section of the steel box girder

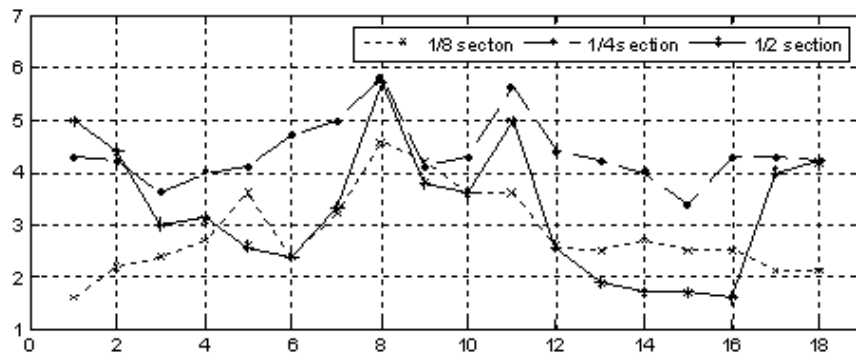
为了便于测试,其中顶、底板和 U 形肋的测点沿桥纵向位于包含 1/8 截面的两相邻横隔板中间。在顶板、顶板 U 形肋和底板布置的测点主要用来考察应力状态沿横桥向的分布情况。在横隔板顶部两侧布置了一些应变花,并安排了专门的车辆加载工况,用以测试车辆重轴直接作用下横隔板是否发生弯曲。钢箱梁应力测试采用东华 DH3815 静态应变测量系统,同时采用振弦应变仪对测试结果进行校核,以保证测试结果的准确性。考虑到夜间温度较为稳定,其它干扰因素也较少,应力测试选在夜间进行。

4 应力实测结果分析

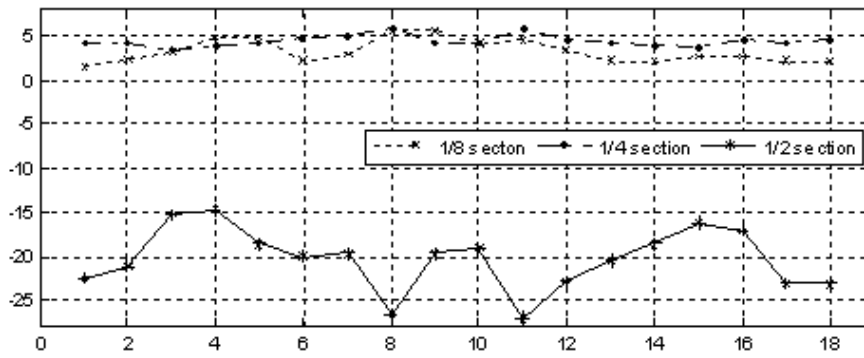
为了能够更加直观地了解车载作用下润扬悬索桥钢箱梁的应力分布特点,便于进行钢箱梁 1/8、1/4 及 1/2 三个典型截面的对比分析,绘制了以上四种所选荷载工况下,钢箱梁顶板、顶板 U 形肋下缘以及底板应力实测值沿梁宽分布图,分别如图 4~图 6 所示。图中纵坐标表示应力值,单位均为 MPa;横坐标分别对应图 3 中所示的各测点。此外,试验结果表明横隔板在车载直接作用下性能良好,未发生弯曲现象。

4.1 顶板应力分析

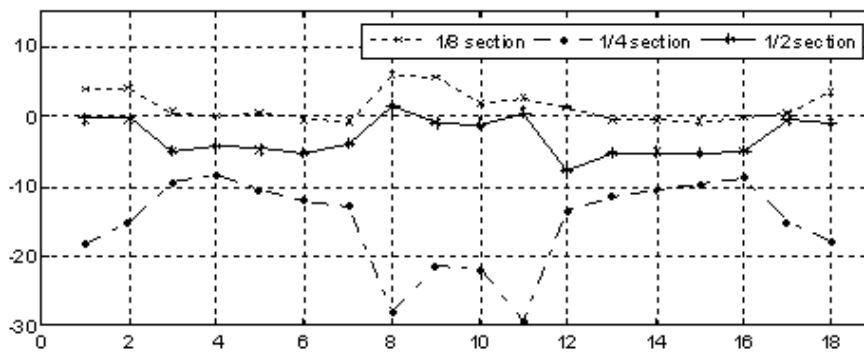
所选四种车辆荷载工况下,润扬悬索桥钢箱梁各测试截面顶板的应力分布对比图见图 4。由于顶板共布置了 18 个应力测点,因此图 4 中每种工况下各测试截面均包含 18 个应力实测值。



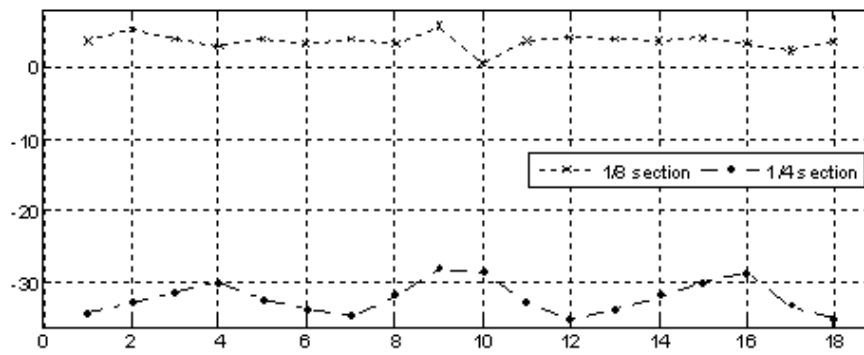
(a) 工况 1



(b) 工况 2



(c) 工况 3



(d) 工况 7

图 4 钢箱梁顶板应力分布图

Fig. 4 Stress of the upper board of the steel box girder

由图4可知:

(1) 图4(b)、(c)、(d)均表明,在车辆荷载直接作用截面,钢箱梁顶板的应力值(绝对值)要远远大于其他截面;而由图4(a)还可知,不受车辆荷载直接作用的截面,钢箱梁顶板的应力水平都比较低。这是显然由于当测试截面作用车载时,该截面顶板的应力状态主要受车载直接作用其上所产生的局部应力效应所致。

(2) 顶板在箱梁两侧和中央处的应力(绝对值)较梁宽四分点处的应力要略大一些,这也使得钢箱梁顶板应力分布图绝大多数工况下呈现出“M”或“W”形。主要原因包括:一是剪力滞效应,使得靠近箱梁腹板处的顶板应力比远离腹板的要大;二是箱梁横坡的影响,使得中央顶板离箱梁断面中性轴的距离较其它部位远,根据平截面假定,应力也较大。

(3) 由图4(b)和(d)进行对比分析可知,与加载52辆车相比,在1/4截面加载16辆车所致顶板应力绝对值反而增大。由此可知,对于大跨度缆索承重桥梁而言,并非加载车辆越多钢箱梁顶板受力状态越不利,荷载的集中程度是导致顶板应力增大的又一重要因素。因此,因对通过大桥的挂车、超重车等进行限制与评估。

(4) 虽然整体的应力水平不高,但钢箱梁各测试截面顶板均出现拉压应力交替现象,1/8截面未出现明显压应力明显是由于没有设定车辆荷载直接作用于该截面的工况。钢箱梁1/4断面(采用标准段)应力交替的幅值反而比1/2截面(采用跨中段)大,主要是由于跨中段钢箱梁在构造上较之标准段进行了加厚,改善了其受力状态。

4.2 顶板U形肋下缘应力分析

图5为相应加载工况下钢箱梁顶板U形肋下缘的应力分布对比图。顶板U形肋下缘共布置了14个应力测点,因此图5中每种工况下各测试截面均包含14个应力实测值。

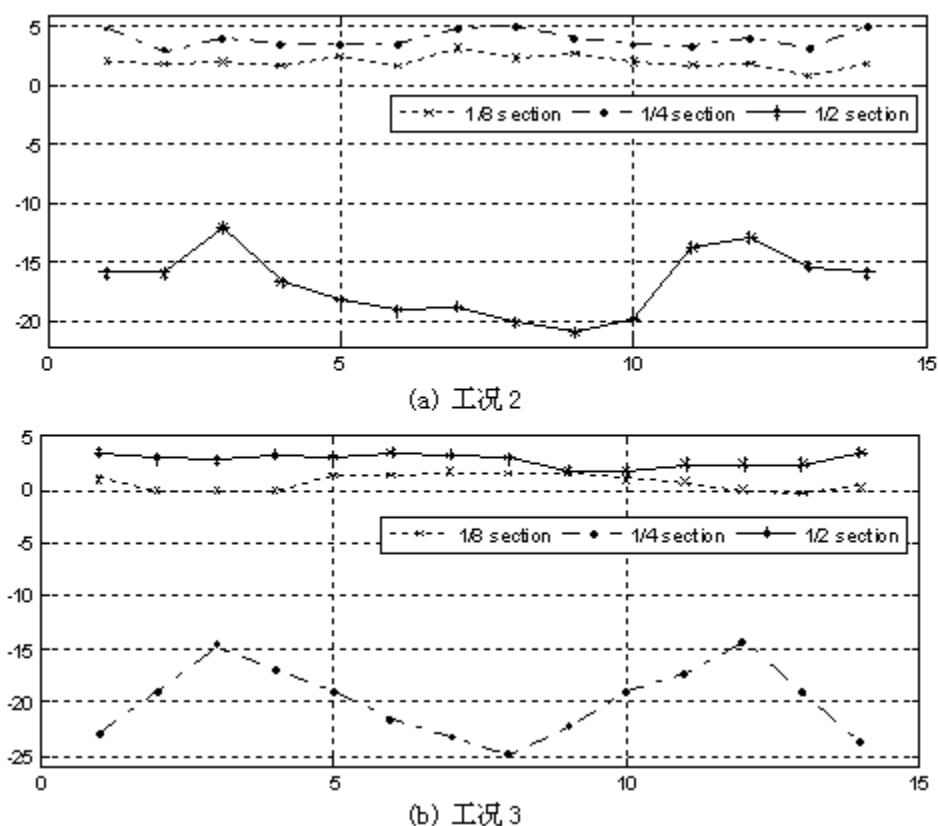


图5 钢箱梁顶板U形肋下缘应力分布图

Fig. 5 Stress of "U" girder under the upper board of the steel box girder

由图 5 可知:

(1) 在车辆荷载直接作用截面, 钢箱梁顶板 U 形肋下缘的应力值(绝对值)要远远大于其他截面; 且不受车辆荷载直接作用的截面, 顶板 U 形肋下缘的应力水平都比较低; 且与顶板类似, 钢箱梁各测试截面顶板 U 形肋下缘均出现了明显的拉压应力交替现象。

(2) 顶板 U 形肋下缘的应力沿梁宽分布图同样反映了剪力滞效应和桥面横坡的影响, 呈现出“M”或“W”形; 但由于 U 形肋下缘的应力通过顶板进行分配, 使得车载直接作用截面的应力分布图出现明显的尖角而不是呈现“凹”或“凸”形。

4.3 底板应力分析

图 6 为相应加载工况下钢箱梁底板的应力分布对比图, 其中底板共布置了 10 个应力测点。

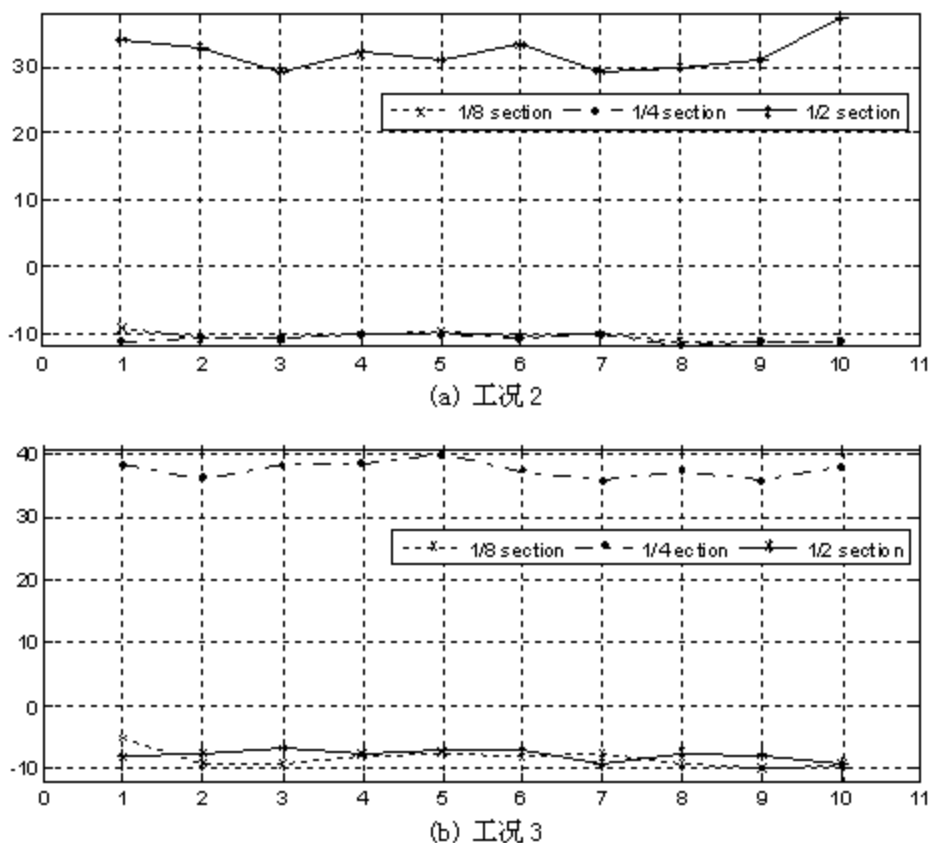


图 6 钢箱梁底板应力分布图

Fig. 6 Stress of the bottom board of the steel box girder

由图 6 可知:

(1) 从理论上讲, 对称结构在对称荷载作用下, 其横向受力分布图应该是对称的。图中少数测点出现截面两侧分布趋势不一致的情况, 这主要由测试和构造等误差等原因造成。

(2) 分析底板应力的横向变化规律可知, 剪力滞效应的影响仍然存在, 但由于底板是平的, 且不受车辆荷载的直接作用, 车载作用下底板应力分布最为均匀, 没有出现如顶板中央应力增大的现象。

(3) 值得注意的是, 无论是 1/4 截面还是 1/2 截面, 当车载直接作用在测试截面上时, 箱梁底板的应力水平比其它部位的都高, 在 1/4 截面其最小实测值也达到 35.9MPa, 1/2 截面的应力值也大都在 30MPa 以上。

(4) 与顶板类似, 钢箱梁各测试截面底板也出现了拉压应力交替现象。

5 结论

(1) 由测试截面应力值及其沿梁宽分布图可知,从整体上看,钢箱梁各部位在各种不利车辆荷载工况下的应力水平都较低,远小于材料的屈服应力。

(2) 受剪力滞效应和桥面横坡的影响,箱梁两侧和中央处的应力(绝对值)较梁宽四分点处的应力要略大一些,因此在车载作用下的受力状态更为不利。

(3) 对于大跨度缆索承重桥梁而言,车辆荷载的集中程度是导致顶板应力增大的重要因素之一。因此必须对通过大桥的挂车、超重车等进行限制与评估。

(4) 由车载作用位置的不同导致钢箱梁各部位均出现不同程度的拉压应力交替现象,因此对于钢箱梁这种焊接结构而言,其疲劳破坏值得引起重视。

致谢: 作者衷心感谢江苏省长江公路大桥建设指挥部、东南大学结构健康监测研究所以及结构实验室的同仁们,感谢大家在润扬大桥静动载实验中付出的辛勤劳动!

参考文献:

- [1] Kyungsik Kim, Chai H Yoo. Brace Forces in Steel Box Girders with Single Diagonal Lateral Bracing Systems [J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(8): 1212—1222.
- [2] 刘丽萍, 王应良. 南京长江第二大桥南汉主桥流线形薄壁扁平钢箱梁分析的新方法 [J]. 公路交通科技, 2004, 21(7): 51—53 (Liu Liping, Wang Yingliang. New analysis methods of the streamline flat thin-walled box girder of Nanjing Second Yangtze River Bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(7): 51—53 (in Chinese))
- [3] Praween Chusilp, Tsutomu Usami. Strength and Ductility of Steel Box Girders under Cyclic Shear [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(9): 1130—1138.
- [4] Sennah Khaled M, Kennedy John B. Literature review in analysis of box-girder bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2002, 7(2): 134—143.
- [5] Hsu Yao T, Fu Chung C. Application of EBEF method for the distortional analysis of steel box girder bridge superstructures during construction [J]. Advances in Structural Engineering, 2002, 5(4): 211—221.
- [6] Fan Zhanfei, Helwig Todd A. Behavior of steel box girders with top flange bracing [J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(8): 829—837.
- [7] 范立础. 桥梁抗震 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1997 (Fan Lichu. Seismic Analysis of Bridge [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997 (in Chinese))
- [8] 项海帆. 现代桥梁抗风理论与实践 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005 (Xiang Haifan. Modern theory and practice on bridge wind resistance [M]. Beijing: China Communications Press, 2005 (in Chinese))
- [9] 李兆霞, 李爱群, 陈鸿天. 大跨桥梁结构以健康监测和状态评估为目标的有限元模拟 [J]. 东南大学学报, 2003, 33(5): 562—572 (Li Zhaoxia, Li Aiqun, Chen Hongtian. Finite element modeling for health monitoring and condition assessment of long-span bridges [J]. Journal of Southeast University, 2003, 33(5): 562—572 (in Chinese))
- [10] 李爱群. 润扬大桥静动载试验报告 [R]. 南京: 东南大学土木工程学院, 2005 (Li Aiqun. Report on field test of Runyang Yangtze River Bridge [R]. Nanjing: College of Civil Engineering, Southeast University, 2005 (in Chinese))
- [11] 蔡金标. 大跨度悬索桥空间分析的组合单元法 [D]. 杭州: 浙江大学, 2002 (Cai Jinbiao. Assembled Finite Element Method for Spatial Analyses of Long-Span Suspension Bridges [D]. Hangzhou: Zhejiang University (in Chinese))

Experimental Study of the Steel Box Girder Force State for a Long-span Suspension Bridge under Vehicle Loads

WANG Hao, LI Ai-qun, GUO Tong, ZHAO Geng-wen

(College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Steel box girder is widely used in modern long-span suspension bridge structure. As one of the most important bridge components, the force state of steel box girder under vehicle loads is especially concerned. However, it is difficult to achieve accurate stress values on each part of a steel box girder through finite element calculation. In this paper, taking Runyang Suspension Bridge (RSB) as an example, the vehicle load cases and stress measurement point layout of a selected steel box girder section in field test of RSB are presented. Based on the measured stress results, the stress level and its distribution on the steel box girder of a long-span suspension bridge under various vehicle load cases was analyzed, and the force state comparison analysis of different steel box girder sections was carried out. Finally, the steel box girder force characteristics of a long-span suspension bridge were summarized based on above results, which provides references for analyzing force state of similar type steel box girder of long-span suspension bridges.

Keywords: long-span suspension bridge; steel box girder; vehicle load; mechanical condition