

千米级斜拉桥结构静力行为试验研究

李元兵, 张启伟, 季云峰

(同济大学 桥梁工程系, 上海 200092)

摘要: 以苏通大桥斜拉桥为背景, 通过实桥荷载试验及理论分析, 研究千米级斜拉桥在静力荷载作用下结构的整体力学行为。研究表明, 在相当于设计汽车荷载水平的试验荷载下, 大桥结构处于线弹性工作状态, 变形增量与荷载增量呈线性关系; 结构总体变形、应力、索力的理论与实测结果较接近, 中跨跨中最大挠度达 1.388 m, 梁端最大位移达 0.107 m, 塔顶最大位移达 0.222 m; 试验荷载下钢梁应力水平较低, 受剪力滞效应、横坡及车轮局部效应等影响, 钢梁顶、底板应力沿横截面呈纵向应力不均匀分布, 尤其顶板 U 肋出现拉压应力交替现象。这在钢箱梁疲劳损伤评估中值得关注。

关键词: 斜拉桥; 有限元法; 静载试验; 整体力学行为; 非线性

中图分类号: U 448.27

文献标识码: A

Mechanical Behavior of Kilometer-level Cable-stayed Bridge Under Static Loads

LI Yuanbing, ZHANG Qiwei, JI Yunfeng

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The paper presents a numerical analysis of the global mechanical behaviors of Sutong Bridge of China on the basis of the field static load tests. The results show that the bridge under the planned load test conditions is of good overall static properties and linear superposition characteristics, and incremental deflection is observed to be linearly proportional to incremental load. A good agreement is achieved between the experiential and analytical results such as displacements, stresses and cable forces. It is found that the measured maximum static deck deflections at the span centre is 1.388 m, maximum horizontal displacement of towers is 0.222 m, and maximum horizontal displacement of main girder is 0.107 m. Moreover, the stress level of the steel box girder under static loads is low, the longitudinal stress distributions of the

slab and floor beam are non-uniform, the reasons for these phenomena include the shear lag effect and the influence of transversal slope of steel box girder as well as local stress effect of wheel load. And the U-shape ribs are of critical importance in fatigue damage assessment because of its alternating tension-compression stresses.

Key words: cable-stayed bridge; finite element method; field static load test; global mechanical behaviour; nonlinearity

苏通大桥主桥是目前世界上最大的斜拉桥, 主跨 1088m。由于塔高、跨大、索长、基础深, 其设计、施工等具有特殊性和复杂性。随跨径增大, 斜拉桥力学行为变得愈加复杂。如何准确了解其在服役荷载作用下的力学性能与工作状态, 用以评价千米级斜拉桥整体安全性并进行结构优化设计, 是国内外超大跨桥梁工程研究的重点问题之一^[1-3]。目前, 通过现场试验与分析, 依据测试结果进行模型修正并建立合理可靠的有限元模型, 仍旧是掌握千米级斜拉桥结构整体静力行为并奠定后期监测、养理论础的重要手段。过去数十年, 国内外研究者结合静载试验和理论分析, 对斜拉桥力学行为、活载非线性等方面开展了大量研究工作。文献[4-7]通过现场振动及静载试验, 分别对 Tataru 桥、Normandie 桥、Kao-Ping-His 桥、青州闽江桥的动力特性、抗风性能、整体静力行为进行了探讨。Hulsey 和 Delaney 根据 Captain William Moore Greek 桥静载试验及数值模拟结果, 研究了斜拉桥整体静力行为, 并指出由于系统离散化误差、几何和边界条件的不确定性、材料的变异性等影响, 理论分析结果往往高于实测值^[8]。Worsak 等人对斜拉桥结构有限元模拟方法进行了总结^[9]。Chang 等人根据 Kap-Shui-Mun 桥现场振动

收稿日期: 2009-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(50978199); 国家科技支撑计划(2006BAG04B01)

第一作者: 李元兵(1979—), 男, 工程师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁结构损伤退化理论及应用。E-mail: cti_258@163.com

通讯作者: 张启伟(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁健康监测理论。E-mail: zhangqw@tongji.edu.cn

试验结果,通过参数敏感性分析,建立了全桥有限元空间模型^[10].李爱群等人依据润扬大桥试验及理论分析结果,概括出超大跨桥梁空间及局部受力精确分析的方法与步骤^[11].文献[12-13]探讨了非线性对超大跨度斜拉桥活载效应和极限承载力的影响.上述成果为千米级斜拉桥结构整体静力行为研究奠定了良好的理论基础.

笔者通过苏通大桥斜拉桥荷载试验和理论分析,研究实桥真实的静力行为,重点探讨大桥的刚度、强度和整体性能,如结构初始平衡状态及总体变形状况、活载静力效应、钢主梁应力分布规律及其剪力滞效应、桥塔截面应力分布规律、斜拉索活载索力、钢梁 U 肋及纵横隔板的应力状况等,并评价现有大跨度桥梁非线性计算方法把握超大跨斜拉桥整体静力性能的准确性.另一方面,通过试验及理论相互验证,建立较合理的理论计算方法.

1 千米级斜拉桥及其试验概况

苏通大桥主桥为带辅助墩的双塔双索面钢箱梁斜拉桥,跨径布置为 100 m + 100 m + 300 m + 1 088 m + 300 m + 100 m + 100 m,半漂浮体系.大桥上部结构主梁标准宽 34m,中心线高度 4 m,采用封闭式流线形扁平钢箱梁;主梁内设横隔板和两道纵隔板,顶、底板设置 6~10 mm 厚 U 型加劲肋.桥塔为空心箱形钢筋混凝土结构,由双柱组成倒 Y 形,塔高 300.40 m;主塔下部结构采用钻孔灌注桩基础.斜拉索为扇形布置,每一扇面由 34 对斜拉索组成,标准索距 16 m,最大索长 577 m,1[#]~3[#] 对拉索直接锚固在上塔柱底座上,其余采用钢锚箱锚固于主梁和主塔上.桥梁总体布置见图 1.

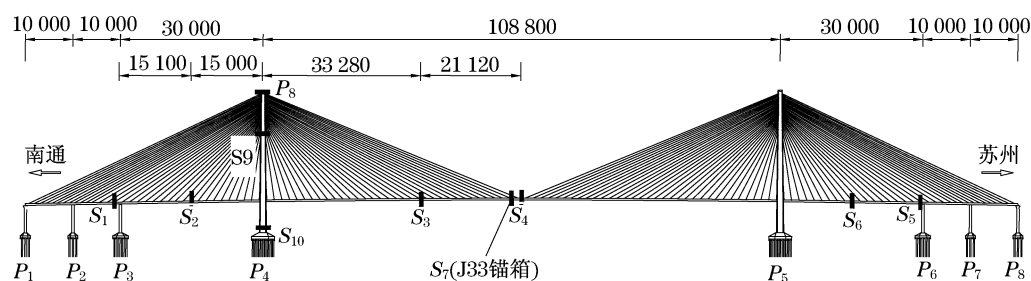


图 1 苏通大桥斜拉桥结构布置及测试部位图(单位:cm)

Fig.1 Sutong Cable-stayed Bridge structure and the tested part(unit: cm)

根据结构理论分析,在全桥范围内选取了 10 个加载控制部位,采用 60 辆单车重 30 t 的三轴车,分 37 个工况进行加载试验.加载位置、加载车及车辆布置见图 1,2.加载前先读零,退载后重新读零以确认变形及应力恢复情况.试验于 2008 年 1 月 14 日的 20:00 到 16 日的 4:00 进行,加载时,跟踪监测索塔混凝土(S₉处)和钢箱梁(S₁, S₂, S₄处)的温度、塔顶和桥面风向风速,以消除环境温度、湿度及风荷载对实测数据的影响.

主梁挠度测点布设在中跨、300 m 跨主梁风嘴底面和 100 m 跨桥面护栏上,上下游对称,共 26 个.梁端纵向位移测点布设在过渡墩主梁两侧护栏上,共 4 个.塔顶变位测点布设在南北塔塔顶中心线位置,共 4 个.为研究车辆荷载作用下主梁应力分布规律,沿钢箱梁顶板、底板、U 肋、横隔板及纵隔板,分别布设纵向、横向及剪应力测点(具体位置见图 3).索塔分叉处及塔根截面应力测点布设在主塔混凝土空心箱形截面内,各 12 个.

试验前,沿主梁中跨十六分点、300 m 跨八分点和 100 m 跨四分点,处布设测点,测试桥面线形,并测试各拉索恒载索力以确认结构初始平衡状态,作为静载试验及理论分析的依据.



图 2 试验加载车示意图

Fig.2 Typical dump truck in the field tests

2 结构有限元分析

结构数值理论分析方法是先采用板壳及杆系单元建立全桥整体有限元模型,加载分析获得各种工

况下节点位移;再根据圣维南原理选取子模型的计算区间段,并将整体模型中对应边界节点的位移插值到局部模型上;计算区间段内拉索索力通过相应节点的位移值施加,而车辆荷载通过加载位置的等效均布力施加;最后,通过整体和钢箱梁局部精细化子模型,获得各工况下千米级斜拉桥结构静力行为.整体有限元模型如图 4a 所示,单元总数为113 482.子模型如图 4b 所示,单元总数为 21 924.为验证数值模拟的可靠性,对结构频率、位移和应力的理论与实测结果进行比较,如表 1 所示.

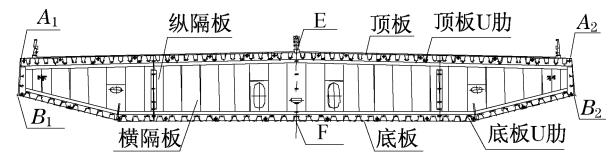


图3 苏通大桥斜拉桥应力测点布置示意图

Fig.3 Strain gauge instrumentation at the section S_1/S_9 of Sutong Cable-stayed Bridge

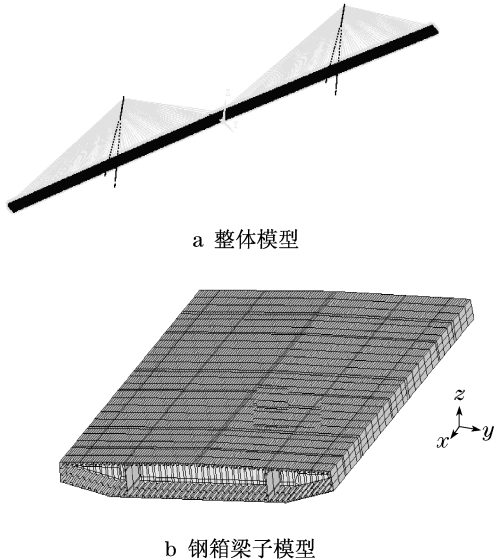


图4 空间有限元模型

Fig.4 Three-dimensional finite-element model of the bridge

表1 有限元模型验证

Tab.1 Three-dimensional finite-element model verification of the bridge

结构频率/Hz			LC2 桥面挠度/mm		LC2 钢箱梁纵向应力/MPa							
					顶板		底板		顶板 U 肋		底板 U 肋	
振型	理论	实测	理论	实测	理论	实测	理论	实测	理论	实测	理论	实测
V1	0.150	0.158	-87	-87	-28.1	-28.5	21.0	23.0	-23.9	-19.8	21.4	18.4
V2	0.752	0.712	-100	-98	-29.1	-28.9	40.9	42.3	-24.5	-20.7	55.5	59.5
V3	1.680	1.760	-51	-50	-43.8	-29.0	47.9	45.0	-28.4	-23.1	35.8	35.6
L1	0.492	0.512	85	84	-36.9	-31.6	55.8	60.4	6.3	4.7	18.4	18.5
L2	0.872	0.865	167	166	-41.4	-32.8	52.5	49.8	-11.1	-9.8	55.2	52.4
L3	1.524	1.495	673	669	-45.8	-38.6	50.4	51.6	-10.3	-7.9	35.8	33.8
L4	2.273	2.391	1 395	1 385	-37.4	-40.2	55.9	51.1	-14.2	-11.9		
T1	1.322	1.383	675	678	-41.9	-39.2	52.6	49.3	-10.2	-8.7		
T2	3.192	3.164	171	177	-41.8	-38.1	49.8	52.7	-21.3	-18.9		

注:挠度向下为正,向上为负;应力拉为正,压为负.

3 静力荷载下结构整体力学行为

3.1 结构总体变形

图 5a 为中跨跨中截面(S_4 处)最大挠度加载工况钢梁竖向挠度实测值及理论分析结果.对称荷载作用下,钢梁实测最大挠度位于中跨跨中截面且上下游同步,达 1.372 m 和 1.388 m,为主跨跨径的 1/1 276.表明大桥整体刚度及对称性良好.偏载作用下,钢梁上下游实测最大挠度分别为 0.943 和 1.121 m,钢梁扭转效应较明显.钢梁竖向挠度实测结果与理论值较接近,二者比值在 0.88~0.95 之

间.表明结构有限元分析模型较合理,能准确把握千米级斜拉桥结构整体静力行为.

图 5b 为 300 m 边跨跨中截面(S_2 处)最大挠度加载工况钢梁竖向挠度实测值及理论分析结果.对称荷载作用下,钢梁实测最大挠度位于边跨跨中截面且上下游变形同步,达 0.253 m 和 0.249 m,为主跨跨径的 1/1186;偏载作用下,钢梁上下游实测最大挠度分别为 0.136 m 和 0.184 m.

梁端上下游变形较协调,南北端较对称,纵向位移最大达 0.107 m.南北塔塔顶位移较对称,北塔顶纵向位移最大达 0.222 m,南塔顶最大达 0.219 mm.

图 6 为钢梁位移增量 $\Delta\delta$ 与荷载增量 Δp 的相

关系图.可见,中跨跨中、四分点及边跨跨中截面,钢梁挠度增量与荷载增量均呈线性规律变化.表明车辆荷载作用下,大桥基本处于线弹性工作状态.

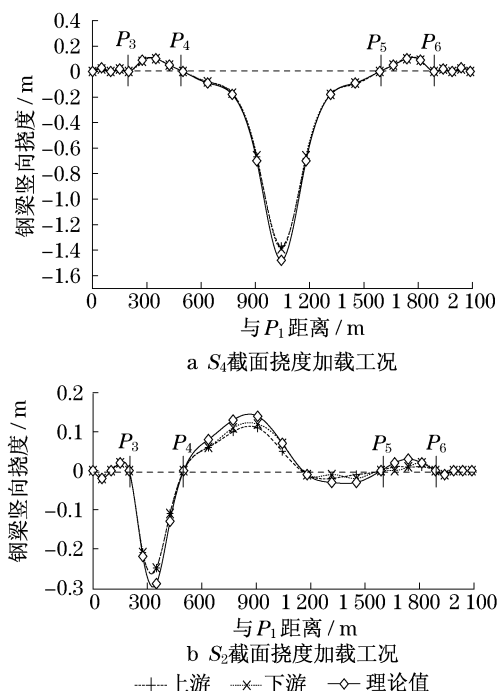


图5 典型加载工况下钢梁竖向挠度理论与实测结果

Fig.5 The measured and calculated deflections of steel girder under the critical load cases

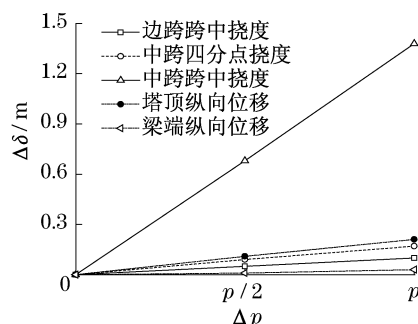


图6 苏通大桥结构位移增量与荷载增量相关关系

Fig.6 Correlation between the incremental displacement and the incremental load of Sutong Bridge

3.2 钢主梁内力分布

主梁在恒、活及风荷载主要组合下的弯矩、轴力及扭矩包络图参见图7.由图可知,恒、活载组合下,主梁竖向最大负弯矩发生在近塔辅助墩处,最大正弯矩发生在 S_3 截面;最大轴力发生在索塔;活载作用下主梁竖向弯矩较小且分布均匀.活、风荷载组合下,主梁最大扭矩发生在近塔辅助墩,而最大横向弯矩发生在索塔.各荷载组合下,主梁最大应力发生在中跨跨中截面.

3.3 钢主梁横截面应力分布规律及其剪力滞系数

为全面、直观地了解主梁细部构件的应力分布情况,便于对理论及实测结果进行比较,绘制了顶板、底板、U肋、横隔板及纵隔板应力沿梁宽(梁高)的横向(竖向)分布图,如图8,9所示.

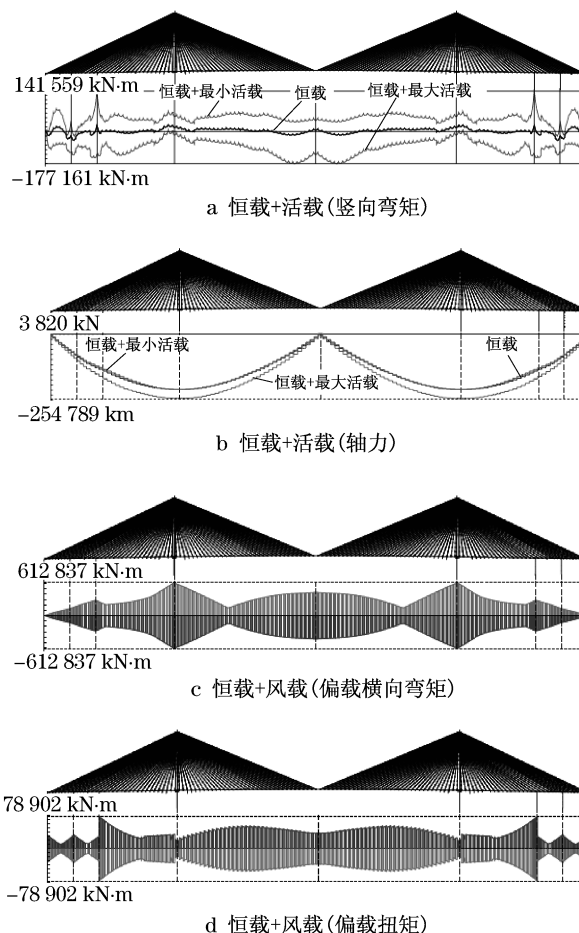


图7 主梁内力包络图

Fig.7 Internal forces envelope diagram of steel girder

(1) 顶、底板纵向应力分布规律

图8a~f分别为中、边跨跨中及辅助墩墩顶截面挠度或弯矩加载工况下, S_4 、 S_6 、 S_5 断面钢梁顶、底板纵向弯曲正应力沿梁宽的横向分布图.可以看出,各测点应力实测结果与理论值符合良好.卸载后,应力恢复正常,残余应变很小.分析顶、底板应力的横向变化规律可知,车辆荷载作用下,顶、底板纵向应力沿横截面均呈不均匀分布,最大应力基本位于纵隔板与顶、底板交接处.辅助墩墩顶截面不均匀分布最明显,中跨跨中截面稍平缓,边跨跨中截面次之.呈现这种分布的原因,一是剪力滞效应,使得靠近箱梁纵隔板的顶底板应力比远离纵隔板的要大;二是箱梁横坡的影响(底板无此影响),使得中央顶板离

箱梁断面中性轴的距离较其他部位远,根据平截面假定,应力也较大.此外,车轮直接作用位置的顶板应力明显大于相邻无直接荷载作用的顶板,这是因为顶板的作用相当于单向板,荷载主要沿桥面纵向传递,且应力尖角范围仅限于U肋之间并很快由轮廓向两侧衰减.钢梁底板虽不受车载直接作用,但由于纵隔板、腹板的传力作用,仍存在车轮荷载作用下的局部应力效应.

(2) 顶、底板 U 肋纵向应力分布规律

图 9a,b 分别为中跨跨中截面挠度加载工况下 S_4 断面钢梁顶、底板 U 肋下缘纵向弯曲正应力沿梁

宽的横向分布图.分析应力的横向变化规律可知,顶板 U 肋弯曲正应力沿梁宽的分布,除了反映剪力滞与桥面横坡的影响外,明显反映出 U 肋在车轮荷载作用下局部应力效应——U 肋纵向弯曲主要作用在车辆宽度范围内,车轮作用位置的 U 肋应力明显大于相邻无直接荷载作用的 U 肋,且 U 肋应力存在明显的拉压突变.这是因为钢箱梁横隔板的弹性约束使得车轮荷载作用的 U 肋弯矩出现正负交替现象^[11].底板 U 肋弯曲正应力沿梁宽分布主要反映剪力滞与车轮荷载局部应力效应的影响,但不出现正负交替现象.

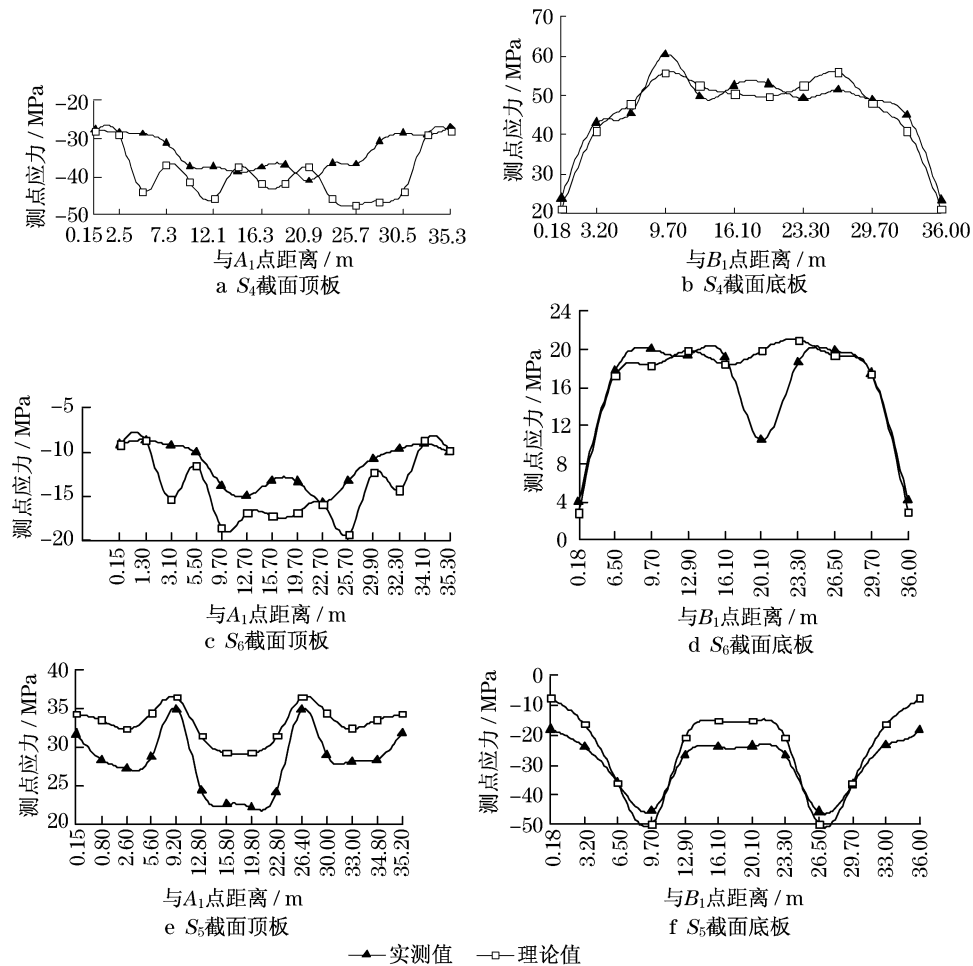


图 8 钢箱梁顶、底板横截面纵向应力分布规律

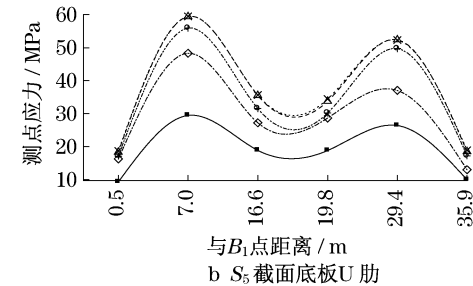
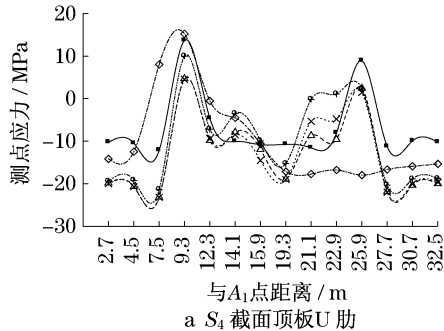
Fig. 8 Longitudinal cross-sectional stress distribution of the steel girders

(3) 钢梁纵、横隔板纵向应力分布规律

图 10a 为 S_4 断面钢梁横隔板端部主应力及中部正应力沿梁高的分布图.由于近风嘴处钢梁顶板剪力滞效应与横坡影响都很小,且车轮荷载局部应力效应影响范围在两横隔板之间,使得端部主应力

分布均匀.而中部正应力受剪力滞和车轮局部效应影响,分布不均匀,沿主梁高度基本呈 S 形变化.图 10b 为 S_4 断面钢梁纵隔板纵向弯曲应力沿梁高的分布图.可以看出,纵隔板纵向应力受顶板剪力滞效应、横坡及车轮荷载局部应力效应影响很小,沿梁高

呈拉压变化.



—●— 工况1 - - -△- - 工况2 ····×···· 工况3 - · -◇- · 工况4 - - -□- - 工况5

图 9 钢箱梁顶底板 U 肋横截面纵向应力分布规律
Fig.9 Longitudinal cross-sectional stress distribution of U-ribs in the steel girders

注:工况 1,挠度半载;工况 2,挠度满载;工况 3,挠度重复满载;
工况 4,挠度偏载;工况 5,弯矩满载

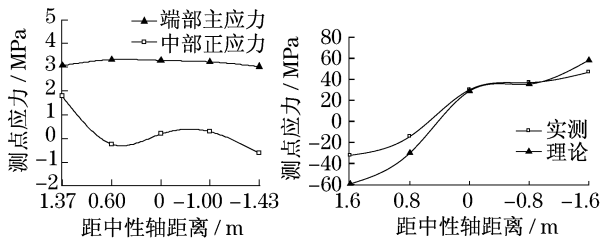


图 10 钢箱梁纵、横隔板纵向应力分布规律

Fig.10 Longitudinal cross-sectional stress distribution of longitudinal and transversal stiffening ribs

(4)钢梁顶、底板剪力滞效应

为合理准确地反映出超大跨径斜拉桥钢箱梁剪力滞效应的影响,剪力滞系数计算公式中钢梁截面实际应力采用钢梁顶、底板应力实测值,而初等梁理论值用钢箱梁横截面应力包络面积的平均值代替.各测试断面钢梁顶、底板剪力滞系数如表 2 所示,可见,对称荷载作用下,各断面顶、底板基本为正剪力滞效应,剪力滞系数最大达 1.49.辅助墩墩顶截面 S_1 和 S_5 剪力滞效应最显著,中跨及边跨跨中截面次之,U 肋最薄截面较小.

3.4 斜拉索索力

试验采用环境随机振动法(施工过程中对该法

已标定过)对斜拉索活载索力进行了选择性测试,理论与实测结果比较如表 3 所示.由表可知,各工况下斜拉索索力实测与理论值基本吻合,各斜拉索活载应力幅分布较均匀.

表 2 钢梁顶、底板剪力滞系数

Tab.2 Shear lag effect of the steel girders

截面	顶板	底板	截面	顶板	底板
S_1	1.22	1.49	S_4	0.94	1.34
S_2	1.34	1.33	S_5	1.23	1.48
S_3	1.01	1.20	S_6	1.20	1.33

表 3 斜拉索索力理论与实测结果比较

Tab.3 Comparison of cable tension between the theoretical and the measured

索号	工况 2,4 活载索力			工况 6 活载索力		
	实测/kN	计算/kN	相对差/%	实测/kN	计算/kN	相对差/%
NWJ32	1 231	1 208	1.9	751	758	-0.9
NWJ33	1 296	1 286	0.8	854	810	5.4
NWJ34	1 250	1 213	3.1	814	763	6.7
SWJ34	1 325	1 212	9.3	835	762	9.6
SWJ33	1 246	1 286	-3.1	800	809	-1.1
SWJ32	1 220	1 209	0.9	786	759	3.6
NEJ32	1 183	1 208	-2.1	1 039	1 051	-1.1
NEJ33	1 290	1 286	0.3	1 136	1 117	1.7
NEJ34	1 240	1 213	2.2	1 087	1 054	3.1
SEJ34	1 264	1 212	4.3	1 118	1 053	6.2
SEJ33	1 275	1 286	-0.9	1 096	1 117	-1.9
SEJ32	1 208	1 209	-0.1	1 033	1 051	-1.7

4 结论

(1)在相当于设计汽车荷载水平的试验荷载下,结构变形增量与荷载增量基本呈线性关系,大桥基本处于线弹性工作状态.

(2)受剪力滞效应、横坡及车轮局部效应等影响,钢梁顶、底板,顶、底板 U 肋应力分布不均匀并出现拉压应力交替现象.这在钢箱梁疲劳损伤研究中值得关注.

(3)建立结构整体有限混合单元模型和关键区域局部精细模型,以子模型法衔接并求解,是精确分析此类超大跨桥梁结构静力行为的有效方法.

本文研究成果有助于对千米级斜拉桥结构优化设计及运营管理提供参考,但仍需进一步研究密集和常遇荷载作用下千米级斜拉桥结构整体、局部静力行为.

(下转第 523 页)