

苏通大桥主桥上部结构施工及控制技术研究

张 鸿, 罗承斌, 张永涛, 游新鹏

(中交第二航务工程局有限公司, 武汉 430014)

[摘要] 苏通大桥是目前世界上已建成的最大跨径斜拉桥,其主桥上部结构施工,主要包括边跨辅助跨以及索塔区大块梁段安装,标准梁段安装以及中跨合龙几个阶段。其中大块梁段采用浮吊整体吊装,标准梁段采用桥面双吊机系统进行吊装,中跨合龙采取顶推辅助合龙方法。同时在施工过程中采用了全过程自适应几何控制方法,通过全过程精确控制结构构件的无应力尺寸与形状,以及实现控制系统和被控系统相适应来达到控制桥梁结构最终线形和内力的目标。为了解决长悬臂主梁风致振动条件下的测量问题,采用了包括基于 GPS 和基于全站仪的两种动态几何监测系统。对上部结构施工期风致振动进行了深入研究,对最大单、双悬臂状态进行了抖振响应分析,对最大单悬臂状态的主梁抗风安全性进行了分析评估,并提出了相应的抗风措施。成桥状态几何线形误差和索力误差均在设计范围之内。

[关键词] 苏通大桥;上部结构;施工方法;施工控制;几何控制;抗风措施

[中图分类号] U445 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)03-0085-07

1 前言

苏通长江公路大桥位于江苏苏州和南通之间,是目前世界上已建成的最大跨径斜拉桥(如图 1 所示)。主桥跨径布置为 100 m + 100 m + 300 m +

1 088 m + 300 m + 100 m + 100 m,主桥桥面按双向六车道布置,宽 31.0 m;桥面纵坡为 1.5%,横坡为 2%。全桥共有 136 对斜拉索,其中最最长索长达 577 m,重 59 t。

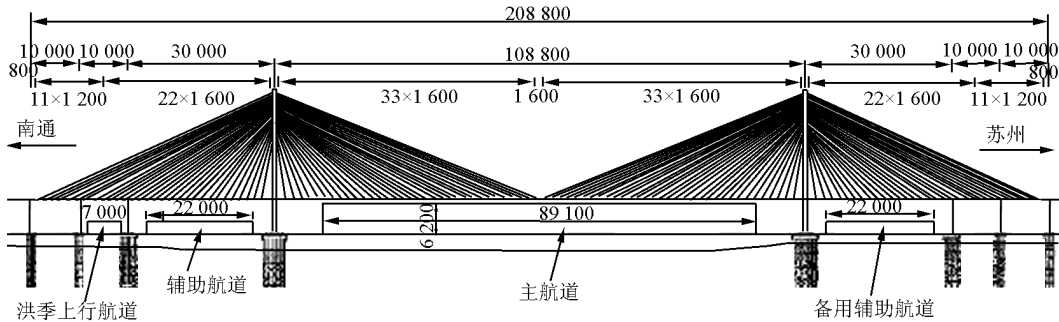


图 1 苏通大桥主桥总体布置图(单位:cm)

Fig. 1 Main bridge schematic diagram of Sutong Bridge

[收稿日期] 2008-11-15

[基金项目] 国家科技支撑计划资助项目(2006BAC04B03)

[作者简介] 张 鸿(1964-),男,湖北武汉市人,中交第二航务工程局有限公司教授级高级工程师,博士,主要从事土木工程(桥梁、公路、铁路、水工工程)施工及科研工作;E-mail:ming040416@163.com

2 施工技术^[1~3]

2.1 总体施工方案

在索塔以及边跨辅助墩建造完成以后,钢箱梁安装分5部分进行,即辅助跨、边跨及索塔区梁段安装,标准梁段安装,边跨合龙以及中跨合龙。

上部结构总体施工程序为:辅助跨、边跨大块梁段吊装→索塔区梁吊装、塔梁临时固结及桥面吊机安装→双悬臂段标准梁段安装及斜拉索张挂→边跨合龙→单悬臂段标准梁段安装及两侧斜拉索张挂→中跨合龙,如图2所示。

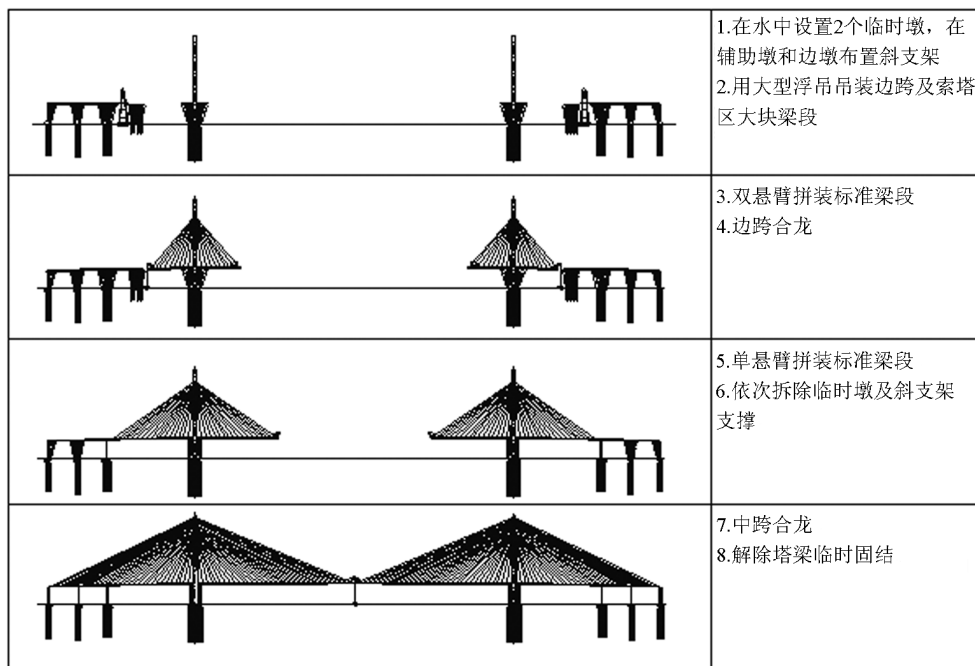


图2 施工过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of construction process

为降低深水区域搭设支架的施工难度及施工期船舶撞击支架的风险,在过渡墩、辅助墩设置墩旁斜支架,以支撑其上梁段重量。同时为提高双悬臂状态下的结构安全,在边跨深水区搭设近100 m高的大型临时墩,使其最大双悬臂长度减少为156.8 m,可以提前实现边跨合龙,进入单悬臂状态施工。

2.2 钢箱梁施工

2.2.1 大块梁段及塔梁临时固结施工

边跨及辅助跨单侧梁段总长达到343 m,分成九块大块梁段吊装,单件大块梁段最长60 m,最重1 200 t。采用大型浮吊起吊安放在临时支架以及临时墩上,精确调位后,进行梁段联接和体系转换。

塔梁临时联结方式采用由平行钢丝绳以及钢支座组成的弹性临时固结体系。为施工期主梁提供弹性约束,对主梁的竖向、纵向、横向位移和3个方向的转动进行限制,保证施工期结构安全,以及为施工控制提供明确的边界条件。并为中跨合龙施工提供

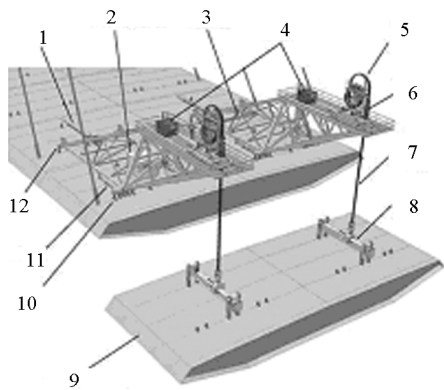
合龙条件。

2.2.2 标准梁段施工

标准梁段采用桥面吊机吊装,其标准程序为:梁段起吊→梁段间匹配、焊接→斜拉索一张、桥面吊机松构→桥面吊机前移、斜拉索二张。

由于标准梁段宽重,如果采用传统单桥面吊机系统,吊机支点反力大,可能导致钢箱梁局部强度和稳定性问题,同时,由于支撑条件不一致,已安梁段与吊装梁段间局部变形相差较大,不仅使得梁段之间匹配困难,还可能产生较大的残余变形和应力。因此,苏通大桥采用了分离式的双桥面吊机吊装方案(如图3所示)。

安装分析表明,在长悬臂施工阶段标准梁段吊装时,在施工荷载和吊装节段自重作用下,距悬臂端5个梁段(约80 m)附近处主梁底板压应力较大。为缓解该区域应力,采取斜拉索超张拉的措施,降低该区域底板压应力。在单悬臂长度达到400 m时,



- 1—吊机后行走梁及液压行走系统
- 2—DL-P40 计算机控制室
- 3—吊机数据缆线
- 4—DL-L125/1/E 型液压泵站
- 5—DL-S290 钢绞线千斤顶和千斤顶模块
- 6—DL-S290 钢绞线千斤顶 (安全工作荷载 290 t)
- 7—DL-S290 钢绞索 (安全工作荷载 290 t)
- 8—扁担梁, 备有桥面纵坡液压调节系统
- 9—主梁节段, 最大重量 450 t
- 10—4 个吊机前支撑墩, 备有荷载液压平衡系统
- 11—2 个前行走梁
- 12—2 个后锚连接件

图 3 双桥面吊机系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of double crane system on deck

即 25 号梁段开始,斜拉索张拉改变为三张工序。即在斜拉索第二次张拉时进行超张拉,后续两个梁段安装完成之后,对超张拉斜拉索进行第三次张拉,将斜拉索拔出量回放至最终成桥位置。

2.2.3 中跨合龙施工

设计基准温度为 20 ℃,在该温度状态下进行中跨合龙,对永久结构不会产生不利影响,但在实际施工中,由于单悬臂达到最大的 540.8 m,受合龙时机及其自然条件的影响,合龙时的环境和结构温度均将与基准温度存在差异。通过计算分析,提出了顶推辅助合龙的方案。

其要点包括:调整合龙口两侧梁段→安装劲性骨架→释放塔梁临时固结竖向索的部分索力将合龙口两侧钢箱梁整体向岸侧拉移(改变合龙口长度→采用桥面吊机抬吊合龙梁段(基准温度下的长度)→在同一比较稳定的温度时段内(无日照)整体回移合龙口两侧钢箱梁→同步焊接两条接缝并解除塔梁临时固结。

合龙施工选择在温度稳定的夜间进行,其环境温度变幅小,所要求的顶推量小。梁段顶推采用穿心千斤顶张拉塔梁临时固结的纵向索同时放松竖向索实施,顶推量根据合龙时的温度计算确定。由于该方法没有改变合龙段长度,所以对成桥结构受力

与线形影响较小。



图 4 中跨合龙梁段吊装

Fig. 4 Girder erection of middle span closure

2.3 斜拉索张挂

对于 1 号~20 号索,可以采用国内成熟工艺进行张挂。对于 21 号~34 号长索,其索长已大大超出目前国内乃至国外已建成斜拉桥,无施工经验可借鉴。

针对超长索的特点和塔梁结构情况,确定了超长索的关键施工工艺,即采用梁端软硬组合三级牵引、梁端张拉的方法(如图 5 所示),其主要施工程序为:桥面吊索桁车整体提升索盘上桥面→桥面卷扬机牵引斜拉索桥面展开→斜拉索塔端挂设→桥面卷扬机、连续千斤顶及张拉千斤顶分别依靠钢丝绳、钢绞线和张拉杆牵引梁端锚头入套管锚固→梁端进行张拉及塔端调索。

斜拉索梁端的牵引通过安置在桥面吊机上的组合牵引系统辅助完成,减轻了悬臂端临时荷载的重量,同时也减少了作业空间。

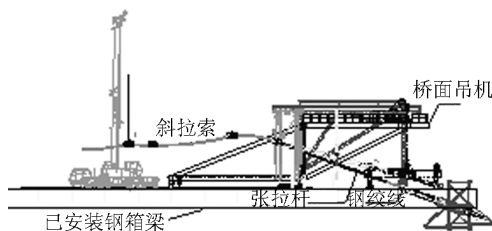


图 5 超长索梁端牵引及张拉示意图

Fig. 5 Schematic diagram of drag and stretching from beam-end of ultra-long cable

3 施工控制和监测技术

3.1 总体控制方法

大桥处于开阔江面,气象条件极其复杂,且结构长柔,构件数量多,因此施工控制存在许多不确定性因素,面临巨大挑战。为此苏通大桥采用了有别于传统施工控制方法的控制策略,即采用了全过程自适应几何控制法,简称几何控制法。

几何控制法是指通过全过程精确控制结构构件的无应力尺寸与形状,以及实现控制系统和被控系统相适应来达到控制桥梁结构最终线形和内力的控制方法。将施工控制阶段拓展至制造及安装的全过程,从制造“源头”控制结构尺寸误差和掌握结构参数的误差分布规律,为现场安装误差调整提供了可靠数据;通过对结构参数的识别和已完成安装结构的误差评估,对未完成阶段的构件的无应力尺寸进行了修正。

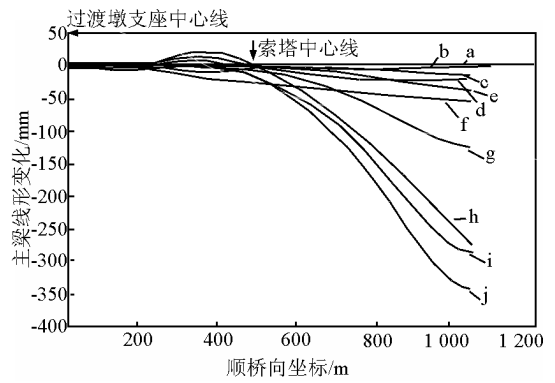
整个控制系统主要包括关键构件制造控制模块、关键工况结构状态评估模块、参数识别及模型修正模块、结构后续施工状态预测模块、施工控制决策模块、结构施工全过程安全性对策模块以及几何控制数据自动采集及数据库模块等 6 大功能模块。

3.2 施工控制实施

施工控制实施主要分成 3 个阶段,计划阶段、制造阶段以及安装阶段。

在计划阶段,通过建立三维有限元模型对全桥结构进行计算分析,得到各构件的无应力尺寸以及线形,如自立状态索塔锚固点坐标,主梁梁长以及线形,斜拉索的制作长度。通过计算分析,还可以得到各梁段安装时的位置从而得到安装的目标线形。进行针对成桥状态的参数敏感性分析,确定主要的控制参数为:钢箱梁制作梁长、梁重、斜拉索弹模、斜拉索无应力索长、索塔锚固点高程等 5 大误差因素^[4],对主梁线形影响敏感因素分析结果如图 6 所示。34 号斜拉索第二次张拉完成后工况下,主梁线形对环境因素的敏感性分析结果如图 7 所示。

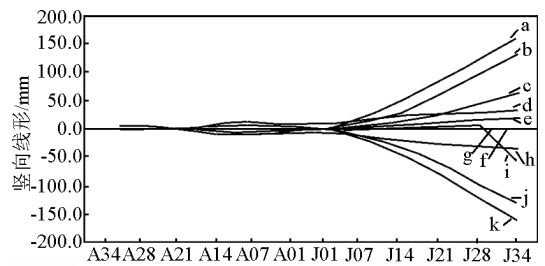
在制造阶段,将精度控制的概念带入构件的制造阶段,包括索塔制造的施工控制,梁段匹配制造,以及斜拉索的精确制造。钢箱梁节段在工厂采用长线匹配法制造,最大程度地减小制造误差,其制造分成多个批次,后一批次的梁段线形要考虑前一批次梁段制造的累积误差,对其进行控制和补偿;节段钢箱梁进行称重;斜拉索制作时逐根进行弹性模量测



a—主梁焊缝收缩 (+0.5 mm/接缝); b—索塔刚度 -5%;
c—斜拉索重量 -5%; d—塔初始垂直度 (1/3 000);
e—主梁侧度 -5%; f—塔高 -20; g—斜拉索索长
误差 (1/20 000 × L); h—梁长误差 (-2 mm/16m);
i—梁重 +5%; j—斜拉索刚度 -5%

图 6 参数敏感性分析

Fig. 6 Sensibility analysis of parameters



a—索温 -5 °C; b—梁温 +5 °C; c—塔温差 (纵桥向) 5 °C;
d—塔温 +5 °C; e—纵桥向风 (15 m/s 桥面处);
f—横桥向风 (15 m/s 桥面处); g—塔温差 (横桥风) 5 °C;
h—塔温 -5 °C; i—梁温关节 5 °C;
j—梁温 -5 °C; k—索温 +5 °C

图 7 34 号索第二次张拉完成后环境因素敏感性分析

Fig. 7 Sensibility analysis of environmental factors after the second stretching of No. 34 cable

试和无应力索长测定,分批次进行索重集度测量。对制造阶段的各构件误差进行统计,建立误差数据库。将制造阶段的误差,包括几何尺寸的误差以及材料特性的误差引入计算模型,对模型参数进行更新,从而确定新的斜拉索无应力长度以及梁段的安装目标线形。

在安装阶段,遵从“采用钢箱梁制造线形控制主梁局部线形,采用斜拉索无应力长度控制总体线形”的原则。采用高精度的对接设备和调节设备进行梁段的匹配对接,确保实际安装钢箱梁无应力线

形能与理论无应力线形的线形一致;采用先进的监测手段对包括索塔线形,主梁线形以及梁长等结构几何构形进行测量,并同步监测结构的应力;同步全程监测环境因素,包括温度、风等,并根据测试结果进行温度和风的修正。对比修正后的线形与理想目标线形,判断误差是否超出可控范围,若不超出进行下一节段施工,若超出,进行误差因素分析后调整计算模型,计算后续索长调整量,从而达到控制的目标。

3.3 施工监测

在长悬臂阶段,由于主梁风致振动效应明显,为了得到主梁真实准确的位置,采用了两种不同的动态几何监测系统,一个为基于全站仪的动态监测系统,另一个为基于 GPS 的动态监测系统。正常情况下以全站仪测量数据为主,GPS 数据检核,恶劣天气状况(起雾、大风等)下 GPS 数据可作为全站仪测试数据的补充。

基于 GPS 动态监测系统由基准站、监测站、通讯系统和监控中心等部分组成。监测站接收机同时接收视场内可见卫星的信号和来自基准站的信息,采用 GPS 软件进行处理,通过数据处理软件做进一步的处理与分析,得到监测点在各方向上的位移等参数,实时显示并将其存入数据库^[5]。该系统采集频率最高能达 20 Hz,完全能够满足动态测量的要求。

基于全站仪的动态监测系统采用两种模式进行监测:一种是定点跟踪法,即固定某一监测点进行连续、实时、动态的快速跟踪测量,快速跟踪测量的采样时间间隔可以达到 0.3 s,非常适用于动态环境施工下的变形监测;另一种是定期扫测法,即对视场范围内的所有监测点进行定期的快速扫测,对每一监测点均进行正倒镜观测。考虑到钢箱梁的振动,每一监测点应进行不少于 4 测回的观测,而且每一监测点的观测时间控制在 2 min 以内。

物理监测包括温度监测、索力监测以及应力监测。索塔温度、钢箱梁温度采用温度计测量,斜拉索索温通过埋植在模拟索段内温度计测量;索塔应力以及主梁应力采用应变计进行监测;索力监测同时采用锚索计,张拉千斤顶读数以及频率法 3 种方法进行监测,互相作为校核参照。

4 施工期抗风

4.1 风洞试验

为了研究大桥施工过程中长悬臂工况条件下的抗风安全性,分别进行了节段模型风洞试验和全桥气弹模型风洞试验。节段模型试验比例为 1:50,断面模拟了导流板、护坎、临时栏杆和检查车导轨等。全桥气弹模型试验模型缩尺为 1:125。最大双悬臂和最大单悬臂状态试验模型如图 8 和图 9 所示。

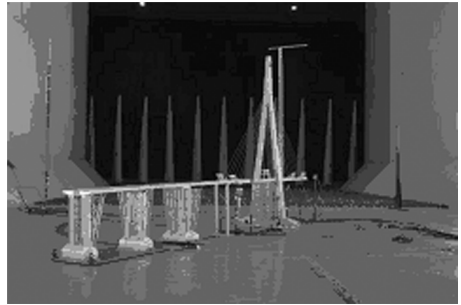


图 8 最大双悬臂状态

Fig. 8 The largest double cantilever state



图 9 最大单悬臂状态

Fig. 9 The largest single cantilever state

节段模型风洞试验研究表明:主梁静风阻力系数较大,在均匀流下没有观察到发散振幅现象。

全桥模型风洞试验研究表明:最大双悬臂状态(156.8 m)和最大单悬臂状态(540.8 m)都没有观察到发散振幅现象。

4.2 施工期主梁抗风安全性研究

4.2.1 抖振响应分析

为比较风洞试验里所观察的抖振响应,采用与试验功率谱相同的紊流场进行时域抖振分析。

最大单悬臂状态的抖振分析总结如表 1 所示。

表1 抖振分析结果
Table1 Results of buffeting analysis

	风速 (桥面处) $/(m \cdot s^{-1})$	抖振响应		
		平均	根方值	峰值
抖振分析 ($h=0.3\%$)				
横向/mm		2 580	620 ^{#1}	4 750
竖向/mm	44.9	260	420 ^{#1}	1 720
扭转/(°)		-	-	-
全桥风洞试验 ($h=0.5\%$)				
横向/mm		2 636	339	3 823
竖向/mm	46.3	236	324	1 370
扭转/(°)		0.518	0.081	0.802
全桥风洞试验 ($h=0.3\%$)				
横向/mm		2 636	438 ^{#2}	4 168 ^{#3}
竖向/mm	46.3	236	418 ^{#2}	1 700 ^{#3}
扭转/(°)		0.518	0.105 ^{#2}	0.884 ^{#3}

注:#1—(峰值-平均)/3.5;#2— $\sqrt{0.5/0.3} \times$ 根方值;
#3—平均值+3.5×根方值。

对于阻尼比为0.003,风洞试验得出的横向抖振响应比数值分析小,这是由于在横向方向上,斜拉索参与振动响应,因此增加了结构的阻尼。抖振分析的竖向响应与全桥气弹模型测试结果比较吻合。

4.2.2 主梁安全性评估

不论在正常工作状态还是在台风条件下,最大单悬臂施工期间主梁的安全性都不容乐观。对一系列关键工况下进行了安全性研究。在评估中采用了抖振分析所得出的抖振响应。

按照英国 BS5400-3:2000 规范进行检核,结果表明:a. 在正常施工状态(17.5 m/s 和 20 m/s)条件下,主梁的强度使用率低于1,结构安全满足要求;b. 在台风条件下,J34号梁段斜拉索张拉完成时(最大单悬臂),主梁的强度使用率大于1,结构安全不满足要求。

因此,需要考虑抗风措施和应力缓解措施提高施工期结构的安全性;a. 对于平板 U 肋,降低竖向抖振响应最大区域(悬臂端后 100 m)的主梁底板应力可使结构安全满足要求;b. 对于斜底板 U 肋,由于强度使用率仅超标 3%,略为降低主梁塔区斜

底板应力可使其强度使用率低于 1.0,以保证结构的安全。

4.3 采取的抗风措施

为确保结构安全,在收到台风预警时,可以采取以下措施来保证主体结构和施工设备的安全。a. 桥面吊机后退 2 个梁段;b. 减少或移动施工荷载;c. 将可移动设备,包括焊接设备、汽车吊等,移动到索塔区梁段上并做固定处理,检修小车后退至索塔区附近,移除张拉平台上的混凝土配重;d. 将悬臂前端临时护栏和踢脚板拆除;e. 适当放松临时固结拉索;f. 中跨合龙时,还可在悬臂两端设置交叉拉索及 J34 号斜拉索超张拉 500 mm。

5 实施效果及结语

苏通大桥成桥状态梁段控制点标高误差在 $-16.6 \sim +168.5$ mm 之间;桥轴线误差在 $-22.9 \sim +22.5$ mm 之间;且主梁线形平顺,具有良好的成桥线形状态。成桥状态各斜拉索索力误差在 $-9.4\% \sim +9.1\%$ 之间,斜拉索索力误差小于 5% 的数量达到 86%,运营状态下索力安全系数均在 2.5 以上。成桥状态索塔线形偏差绝对值在 17~44 mm 之间,索塔线形匀顺。

斜拉桥的施工过程与施工控制密切相关、高度耦合,为此苏通大桥上部结构施工将施工方法和施工控制方法紧密联系起来,研究了成套创新的施工技术为施工控制服务,同时提出了更容易保证质量、操作简单、技术先进的施工控制方法,达到了最终施工目标的要求。该技术成果可供日后超大跨度斜拉桥建设参考。

参考文献

- [1] 顾安邦,范立础. 桥梁工程(下册)[M]. 北京:人民交通出版社,2002
- [2] 林元培. 斜拉桥[M]. 北京:人民交通出版社,2004
- [3] 刘士林. 斜拉桥[M]. 北京:人民交通出版社,2002
- [4] 徐利平. 超大跨径斜拉桥的结构体系分析[J]. 同济大学学报, 2003,31(4):400-403
- [5] Cosser E, Roberts G W, Meng X L, et al. Measuring the dynamic deformation of bridges using a total station[A]. In Proceedings of 11th International Symposium on Deformation Measurements of FIG Commission 6[C]. Santorini, Greece, 2003

Sutong Bridge-construction and control technology of the superstructure

Zhang Hong, Luo Chenbin, Zhang Yongtao, You Xinpeng

(CCCC-Second Harbour Engineering Company Limited, Wuhan 430014, China)

[**Abstract**] Sutong Yangtze Highway Bridge is the longest span cable-stayed bridge completed in the world nowadays. The construction of superstructure of the main bridge was composed of several stages including erection of big block girders for side span, assistant span and tower area, erection of standard girders and middle span closure. The big block girders were hoisted as integer by floating crane. The standard girders were hoisted by double cranes system at the deck. Pushing assistant method was adopted in middle span closure construction. An all-stage self adaptive geometry control method was used in the construction process. By all-step accurately control to unstressed dimension and shape of all structure components and realization that control system and controlled system adapt to each other, the goal to make the final line shape and inner force of bridge structure under control could be achieved. Two solutions including based GPS and based total station dynamic geometry monitoring systems were used to resolve the measure problem under the condition that wide - range wind-induced vibration with long cantilever state. Finally, the research on wind-induced vibration of super structure during the construction period was executed. Buffeting response analysis to the longest single and double cantilever state were carried out. The analysis and evaluation to wind resistant safety of main girder at the longest single cantilever state were made, and the corresponding wind resistant measures were suggested. As built geometry error and cable force error were controlled in a range design required.

[**Key words**] Sutong Bridge; superstructure; construction method; construction control; geometry control; wind-resistant measure