

斜拉桥钢箱梁施工实时测控技术

黄 腾,黄张裕,华锡生

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 结合大跨度斜拉桥钢箱梁的施工特点,研究了施工实时控制系统的构成及其对施工过程的控制.在南京长江第二大桥主梁安装中,根据施工全过程中实际发生的各项影响桥梁内力与变形的参数,结合施工过程中实测的各阶段主梁内力与变形数据,以施工测控模型,随时分析各施工阶段中主梁内力和变形与设计预期值的差异,并找出原因,提出修正对策,确保全桥建成时桥梁的内力状态及外形曲线与设计值尽可能相符.

关键词 钢箱梁 实时测控 系统校核 索力张拉

中图分类号 :TU745.1 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2002)03-0033-05

南京长江第二大桥南汊桥为双塔双索面扁平流线闭口钢箱梁斜拉桥,主跨 628 m.主塔采用倒 Y 型空间混凝土索塔,塔高 195.41 m.主梁采用正交异性流线型钢箱梁,梁高 3.5 m,宽 33.6 m,斜拉索 80 对,主跨共 40 个梁段,如图 1 所示.主梁安装时,采用南、北塔对称协调逐段拼接固焊方法.

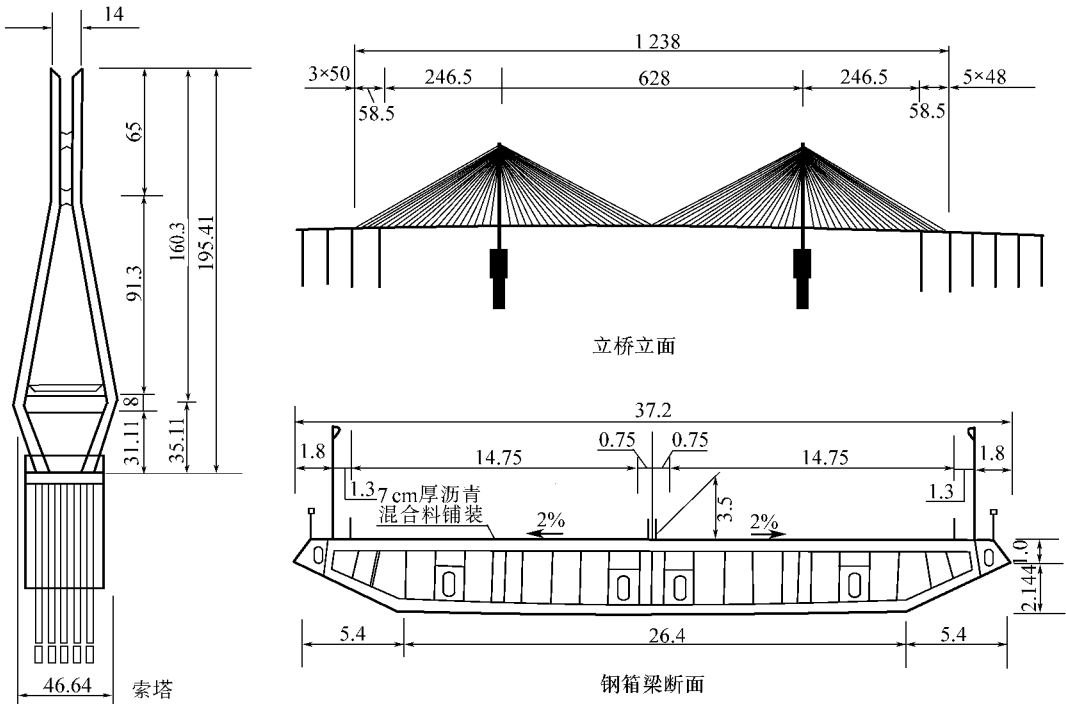


图 1 南京二桥南汊主桥梁、塔立面图

Fig.1 Main span elevation of the Second Nanjing Yangtze River Bridge

大桥修建中,不仅钢箱梁的吊装施工难度大,拼接精度要求很高,而且在缆索张紧处理时,必须确保钢箱梁构成的桥型曲线及缆索拉应力与设计允许值协调一致.在采用正装分析设计的斜拉桥施工中,按指定的施工方法及施工索力进行调整后,会发生结构体系的各类响应值与预期值不一致的情况.国内外已有一些大跨度斜拉桥在建成后出现主梁的最终外形曲线与设计严重不符的现象,这不仅影响桥梁的美观和行车的舒适,

同时也使桥梁的最终内力状态偏离设计值,影响桥梁的使用寿命.

大跨度斜拉桥钢箱梁的测控,就是根据施工全过程中实际发生的各项影响桥梁内力与变形的参数,结合施工过程中实测的各阶段主梁内力与变形数据,以施工测控模型,随时分析各施工阶段中主梁内力和变形与设计预期值的差异,并找出原因,提出修正对策,确保全桥建成时桥梁的内力状态及外形曲线与设计值尽可能相符.

1 测控体系的构成

钢箱梁施工中,测控体系主要包括 实时测量系统、现场测试系统和测控分析计算系统三大部分,如图 2 所示.

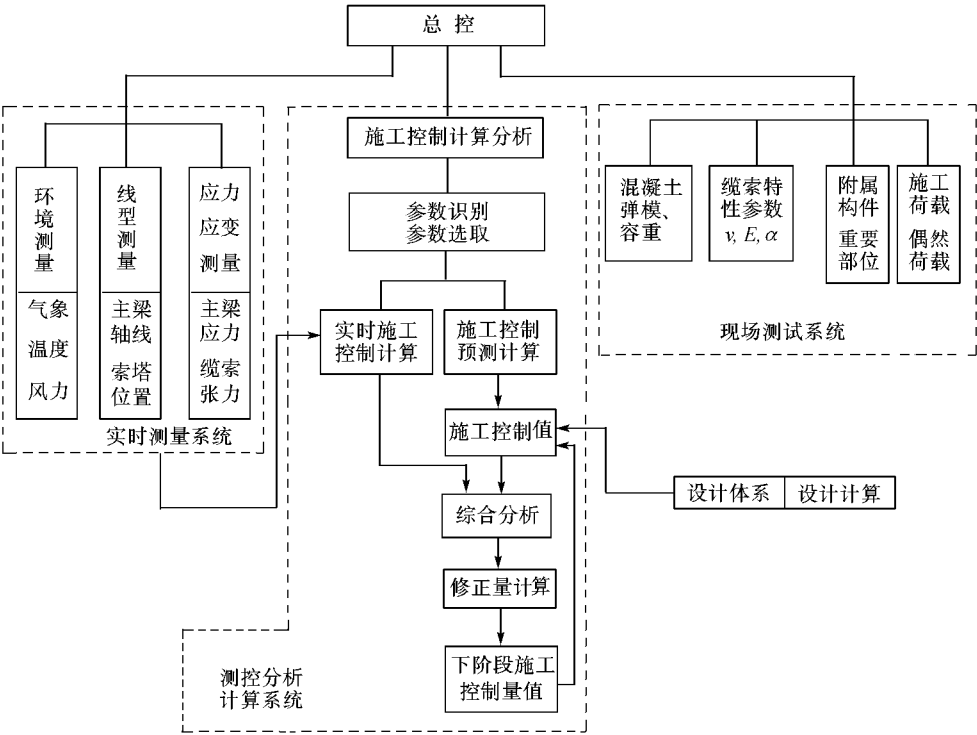


图 2 钢箱梁测控体系

Fig.2 Block diagram of steel box girder monitoring system

1.1 实时测量系统

钢箱梁安装中的实时测量主要包括三个部分:即环境量测量,如气象、钢箱梁温度、气温、风力等;线型测量,如主梁线型、主塔位置;应力应变测量,如索力、主梁和主塔应力等.实时测量的数据是各安装阶段指导钢箱梁施工和缆索调整的主要依据,不仅需要很高的精度而且必须确保其可靠性.

在南京长江二桥钢箱梁安装中,线型测量的要求如下:(a)主梁高程测量.高程精度 $\pm 1\text{ mm}$,测量时间在 22 00 至明晨 6 00,在控制梁段定位的精匹配阶段及梁段对应的斜拉索完成张拉后,进行主梁高程测量,包括对该梁段前面已完成定位梁段的测量.(b)主梁轴线测量.施工梁段轴线误差不大于 $\pm 1.0\text{ mm}$.在梁段定位的精匹配阶段及梁段对应的斜拉索第二次张拉后进行,包括该梁段前面已施工完成梁段的测量.(c)主梁悬臂端倾角测量.倾角测定的误差不大于 $10''$.在每梁段完成斜拉索第二次张紧后进行.(d)索塔偏位测量.测定的偏位误差不大于 $\pm 4\text{ mm}$.在每梁段精匹配阶段及斜拉索二次张拉后进行偏位测量.

1.2 现场测试系统

施工测控系统中,需要获得现场测试参数、施工构筑物的部位、荷载情况等,进行仿真模拟,并根据实时测量系统的实测数据拟合分析,使施工控制计算能与实际工况相符.

现场测定或采集的信息包括:(a)材料的物理力学性能参数.主梁和斜拉索的弹模、容重、抗拉抗压强度,索塔混凝土的容重、弹模、抗压强度、抗剪强度,混凝土的收缩徐变系数,线材的膨胀系数,导热系数等.(b)实际施工中的荷载情况.主梁恒载是每一梁段实测自重,包括主梁钢材、连接件、油漆、斜拉索的锚头、套筒等.主梁的二期恒载,包括风嘴、桥面铺装、人行道板、栏杆、灯柱、管线等.施工荷载,包括施工构件、梁段吊机等.

临时荷载,对主要的施工中临时荷载进行量化模拟,并反映在施工控制的实时计算中.(c)实际施工中的截面几何参数测定.主要是对主梁断面和索塔的几何尺寸测定.

1.3 测控计算分析系统

测控系统的流程如图 2 所示.要保证测控系统在施工过程中的有效性,则必须确定它的正确性.测控系统正确性的检验是通过与设计计算系统的比较及校核而完成.斜拉桥的设计计算中,通常会采用一些先验的参数进行,如梁段块件材料的弹模、容重、拉压强度等.此外,在设计计算中,还有大量的指定计算参数,如施工程序、张拉索力等.

设计计算所采用的先验参数往往会与施工情况有一定数值的差异.此外,设计与施工通常由不同单位承担,设计计算与施工控制计算可能采用不同的模型.这将使采用实际参数得出的施工控制值与采用先验参数的设计计算结果出现不符.因此,为达到施工控制计算指导施工且能与设计结果相符,首先要校核设计计算与施工控制计算的闭合性,如图 3 所示.校核应在施工控制计算开始的前期及施工初期.首先由设计资料而建立施工控制计算模型(b_1),以设计计算的主要参数(a_2)和设计计算中预定的施工时间(a_5),设计计算施工步骤(a_3)进行复合计算.将计算结果与设计计算结果进行分析、比较,校核两者在计算模型及施工方法模拟方面是否存在实质性的差异.只有调整到两者计算结论基本一致的前提下,所建的施工控制系统指导施工才有实际意义.

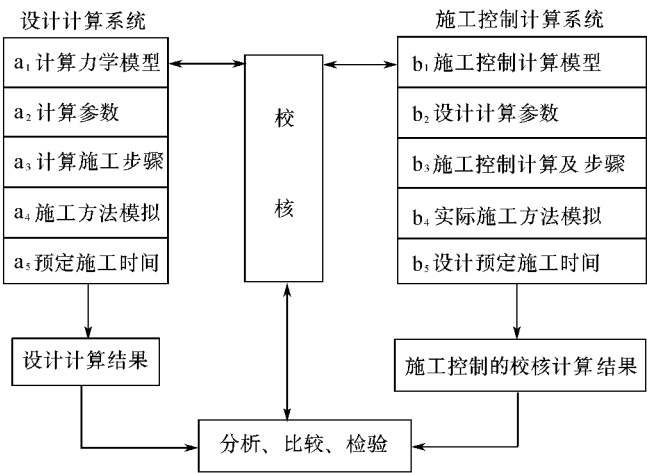


图 3 施工控制、计算、校核框图

Fig.3 Block diagram of construction control, calculation and check

2 测量控制系统

根据南京长江第二大桥工程的特点及实时测量的精度要求,进行测控系统的布设.

2.1 系统的布置

a. 在南北塔的下横梁加密两个点,均采用强制对中观测墩.以南北岸桥轴线控制点 NQ01,NQ02 为起算点,并联测南岸 NC01,NC07,NC06 和北岸 NC05,NC08 共 5 个首级网控制点,构成钢箱梁施工控制网,如图 4 所示.采用 TC2003 全站仪(测角 0.5",测距 $1 + D \times 10^{-6} \text{mm}$) 6 测回边角观测,严密平差后,最弱点 NC08 的点位中误差 $M_p \leq \pm 0.62 \text{mm}$.

b. 索塔位移测控.在南北两塔上下游方向顶部,各预先设置全方位观测棱镜.分别于南岸 NC01,北岸 NC05 控制点以高精度全站仪 TC2003 极坐标法观测,实时获得索塔位移、扭转等形变特性参数.

c. 钢箱梁高程控制.首先以高精度三角高程法^[1]引测南北塔下横梁上的固定水准点 NTS,NTX,BTS,BTX 作为工作基点.钢箱梁段安装时,以此 4 个工作基点,用 II 等水准施测各梁段标高.

d. 分布在南北塔柱下横梁上的 N01 和 S01 两块起始梁段的定位,在全桥钢箱吊装精匹配中起关键作用.它们定位的准确性,直接影响到后续梁段的定位.对此,在精匹配定位时,除用轴线点定位外,还以另两个控制点边、角前方交会,经严密平差后求得实际坐标,指导安装.

e. 悬臂梁的倾角测量.在每个悬臂梁段斜拉索第二次张拉后,以设置在悬臂端前后相距 10 m 的两个水准标点,采用精密水准测定高差后计算求得.

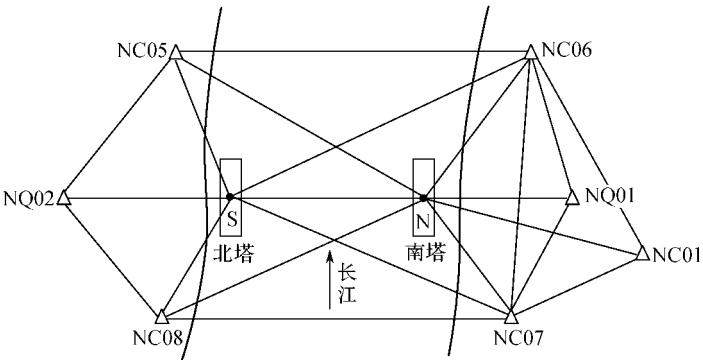


图 4 钢箱梁施工控制网

Fig.4 Framework of steel box girder construction

2.2 精度分析

2.2.1 主梁轴线定位误差

主梁轴线定位采用南北塔下横梁上有强制对中的 N、S(轴线点)测定. 钢箱梁的定位中, 始终以此两点作为基准, 以测小角法测定安装梁段中心点偏离轴线的量而指导安装. 由测小角法偏距精度估算公式^[2]:

$$m_d = \frac{m_\beta}{\rho \sqrt{n}} D \quad (1)$$

若 $m_\beta = 1.0''$, $D = 314 \text{ m}$, $n = 3$, 则 $m_d = 0.88 \text{ mm}$. 即主梁轴线定位时, 以 TC2003 小角法三测回测定偏移值的精度为 $\pm 0.88 \text{ mm}$, 可以确保主梁轴线达 $\pm 1 \text{ mm}$ 的精度.

2.2.2 索塔位移极坐标测定误差

按极坐标计算公式, 可得放样点位中误差计算公式:

$$m_x = \pm \sqrt{(m_s \cos \beta)^2 + (S \sin \beta)^2 \frac{m_\beta^2}{\rho^2}} \quad (2)$$

$$m_y = \pm \sqrt{(m_s \sin \beta)^2 + (S \cos \beta)^2 \frac{m_\beta^2}{\rho^2}} \quad (3)$$

若后视夹角 $\beta = 60^\circ$, $S = 300 \text{ m}$, $m_\beta = \pm 1.0''$, $m_s = 1.3 \text{ mm}$, 则可计算得 $m_x = \pm 1.45 \text{ mm}$, $m_y = \pm 1.34 \text{ mm}$, $m_p = \pm 1.98 \text{ mm}$, 即索塔位移极坐标测定的点位误差小于 $\pm 2 \text{ mm}$.

2.2.3 边角交会定位误差

在南北塔第一块起始梁段的定位中, 采用轴线定位和边、角前方交会测定. 以点位坐标改正数 δ_x, δ_y 为未知数, 按边角交会严密平差列出误差方程和法方程. 结合起始梁段定位构成的图形, 可计算得最弱定位梁段为南塔 N01 梁段, 其定位中误差 $m = \pm 0.71 \text{ mm}$.

2.2.4 高程控制的精度

按最大测程 320 m 计算, 每站前后视距离为 20 m , 则全程测站数为 8 站. 以 II 等水准观测, 每站偶然高差中误差 $\pm 0.25 \text{ mm}$ 计, 则高程控制测量的高差中误差

$$m = \pm 0.25 \sqrt{8} = \pm 0.71$$

2.2.5 悬臂端倾角精度

由于 $\tan \alpha = \frac{h}{l} \quad \frac{1}{\cos^2 \alpha} \frac{m_\alpha}{\rho} = \frac{m_h}{l}$

取 $m_h \leq \pm 0.25 \text{ mm}$, $l = 10 \text{ m}$, $\alpha = 0.03$, 则可计算得 $m_\alpha \leq \pm 5''$. II 等水准观测悬臂端前后两点高差, 反求悬臂端倾角 α 的误差可保证不大于 $\pm 5''$.

综上所述, 实时测量系统的精度, 满足了施工规定的要求, 为测控分析计算提供了可靠的实时测试数据.

3 钢箱梁定位的测控

南京长江第二大桥钢箱梁安装时, 南北塔均采用以塔柱为中心, 两边对称协调逐段拼接固焊的方法. 实时测控在每段钢箱梁的安装中都必须实施. 这里仅以南塔第 13 梁段安装测控为例. 由 12 梁段的吊机把 13 号梁段起吊到桥面支架, 实时测量系统指导精确轴线定位和控制梁段倾角, 拉索第一次张紧. 钢箱梁焊接, 实时测量系统精密测量, 得第一次张拉后各梁段标高及索力值. 与设计值比较后知, 线型曲线及索力与设计值有差异, 特别是第 5 梁段以后, 因安装 13 梁的缘故, 所受影响十分显著. 在进行第二次调整索力及标高前的施工控制分析计算中, 经多种方案的优化, 最后确定控制参数为第 13 梁段索力为 2444 kN , 第 9 梁段控制索力 2171 kN , 第六梁段控制索力为 1816 kN . 吊机前移到第 13 梁段, 按控制值进行缆索第二次张拉, 并经实时测量精密测定, 各梁段第二次张拉后的标高与索力值, 见表 1 所示. 由表中可知, 根据控制值进行第二次索力张拉后, 各梁段的标高值与设计值最大差异在 10 mm 以内, 索力与设计值的差异也不大于 4% , 达到了安装的要求.

从第 13 梁段定位及缆索第二次张紧后的检测结果可知, 实际测值与设计值确存在一些差异, 表明设计计算中采用的一些先验参数与实际情况不完全相符. 但是, 这种差异在数值上并不大, 因此, 大桥的整个安装

质量是很好的,第二次张拉后检测的结果与设计值基本一致.

利用实时施工控制系统指导施工,可以准确迅速地确定出控制指标,使主梁的调整不仅迅速有效,而且保证了桥型曲线及索力控制.当然,最终的调整,尚有待全桥安装完成后,经实时测量,由施工测控系统分析,确定出最终的调整量.在确保实际施工结果与设计值相差甚微的情况下,最终的调整是不复杂和不困难的.南京长江第二大桥钢箱梁拼装合龙后,经各项指标测试和分析,桥的线型和索力均满足设计要求,未再作合龙状态下的全桥线型和索力统调,这在国内同类桥梁建设中尚属首例.

表 1 第 13 梁段实时测控成果

Table 1 Results of real-time survey control of 13th girder

梁段号	第一次张拉		第二次张拉		设计值	
	梁端索力/kN	梁段标高/m	梁端索力/kN	梁段标高/m	梁端索力/kN	梁段标高/m
J ₁			3 177	39.522	3 138	39.524
J ₂			2 169	39.933	2 129	39.939
J ₃			1 784	40.314	1 757	40.323
J ₄			1 638	40.672	1 581	40.674
J ₅	1 643	40.970	1 679	41.013	1 612	41.018
J ₆	1 802	41.285	1 815	41.333	1 772	41.338
J ₇	1 907	41.564	1 883	41.625	1 834	41.635
J ₈	2 116	41.821	2 038	41.901	1 966	41.912
J ₉	2 316	42.065	2 171	42.174	2 124	42.181
J ₁₀	2 505	42.289	2 283	42.431	2 239	42.441
J ₁₁	2 704	42.490	2 345	42.673	2 306	42.668
J ₁₂	2 633	42.682	2 191	42.910	2 132	42.903
J ₁₃	1 294	42.870	2 444	43.143	2 407	43.141

4 结 论

借助于实时施工测控系统,在特大新型桥梁的钢箱梁安装中,能迅捷地根据施工条件,有效地确定控制值来指导施工,保证桥型曲线及缆索应力与设计值基本一致,确保了大桥质量.施工控制计算模型必须以设计模型为依据进行校核,才能发挥施工控制计算分析系统的有效性.实时测量数据的精度及准确直接关系到施工控制值的可靠性.测量控制系统在布设前,应根据精度要求,结合具体施工条件,进行方案论证、优化设计.

参考文献：

[1] 章书寿,饶国和,黄腾.光电测距三角高程测量在水电工程中的应用[J].河海大学学报,1992,20(4) 51~66.
[2] 章书寿,华锡生.工程测量[M].北京:水利电力出版社,1998.283.

Real-Time Survey Control Technology for Construction of Steel Box Girders in Building of Cable Stayed Bridges

HUANG Teng, HUANG Zhang-yu, HUA Xi-sheng
(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract : In combination with the characteristics of steel box girder construction in the building of long-span cable stayed bridges, the composition of a real-time survey control system and its control over the construction are studied. During installation of the girder of the Second Nanjing Yangtze River Bridge, the system was used at all times for analysis of the differences between measured values of internal force in and deformation of the girder and their designed values. Based on the analysis, the causes of the differences are found, and countermeasures are proposed, ensuring that the state of the internal forces in and the contour of the girder are consistent with their designed values.

Key words : steel box girder ; real-time survey control ; system checking ; cable tension