

松花江大桥悬臂施工线形控制技术

赵晓龙¹, 王慧东²

(1. 上海市市政工程设计研究总院 天津分院, 天津 030042; 2. 石家庄铁道学院 土木工程分院, 河北 石家庄 050043)

摘要:桥梁施工控制就是在结构分析基础上通过对施工过程中的应力及线形进行控制, 对施工中出现的偏差进行分析识别, 发现问题并及时进行纠正, 同时对结构的后续阶段进行正确预测, 最终目标使成桥状态达到设计要求。以松花江大桥为工程背景, 详细的论述了本桥的线形控制理论及方法。利用 MIDAS 软件建立有限元模型, 计算出预抛高值。针对松花江大桥现场施工监控的结果, 详细比较了梁体阶段挠度、累计挠度、各阶段测点的计算值和实测值的关系; 最终监控结果表明, 本桥达到了线形平顺、受力合理的预期目的。

关键词:施工监控; 连续梁桥; 悬臂施工; 线形控制

中图分类号: U446.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-0300(2010)01-0035-06

0 引言

大跨度预应力混凝土连续梁桥采用悬臂方法施工时要经历一个复杂的过程, 在此过程中将受到许多确定和不确定因素的影响, 而导致桥梁结构的实际状态偏离预期状态, 从而出现受力不合理, 桥梁难以顺利合龙, 使成桥受力和线形形状与设计要求不符, 影响桥梁的美观、质量和使用寿命。因此, 为了保证桥梁施工的安全与质量, 在施工过程中对桥梁进行实时监测, 并根据监测的结果对施工过程中的监控参数不断进行调整是十分必要的^[1]。

松花江大桥主桥结构为 5 跨预应力混凝土连续箱梁, 其跨径布置为 90.5 m + 3 × 138 m + 90.5 m, 全长 595 m。主梁箱梁采用单箱单室, 每个 T 墩包括 21 种节段(0~20)号, 采用悬臂对成浇筑施工。主梁采用 C60 混凝土, 桥面采用 C55 钢纤维混凝土与沥青混凝土铺装, 过渡桥墩墩身及盖梁采用 C40 混凝土。纵向预应力及横向预应力钢束采用标准强度为 $f_{pk} = 1\ 860\ \text{MPa}$ 的 270 级 $\varphi_s\ 15.2\ \text{mm}$ 低松弛高强度钢绞线, 竖向预应力采用标准强度为 $f_{pk} = 960\ \text{MPa}$ 的精轧螺纹钢筋。管道摩阻系数 $K = 0.14$, 管道偏差系数 $\mu = 0.001\ 5$ 。环境相对湿度 80%; 混凝土平均加载龄期按 7 d 计, 终极龄期按 4 600 d 计。采用的活载等级为公路-I 级。施工挂篮重取 334 kN/个, 合龙吊架重取 334 kN/个。钢筋松弛系数: I 级松弛(普通松弛)选择 1.0, II 级松弛(低松弛)选择 0.3。

1 立模标高的确定

立模标高有两种形式: 绝对高程形式和相对高差形式。

1.1 立模标高的绝对高程形式

悬臂浇筑施工阶段的立模标高

$$H_i^{\text{立模}} = H_i^{\text{设计}} + F_i^{\text{后期徐变}} + F_i^{\text{竣工}} + F_i^{\text{挂篮}} = H_i^{\text{设计}} + F_i^{\text{预抛高}} + F_i^{\text{挂篮}} \quad (1)$$

式中, $H_i^{\text{设计}}$ 为桥梁设计标高; $F_i^{\text{后期徐变}}$ 为桥梁竣工后由于混凝土后期收缩徐变而引起的变形, 通过计算出控制截面的挠度最大值, 然后按抛物线沿跨长分布; $F_i^{\text{竣工}}$ 为结构某一阶段在立模之后, 由于本阶段和以后的施工阶段使该点产生的变形, 这种变形直到成桥竣工时为止。因此把它记作(取向为正); $F_i^{\text{挂篮}}$ 为施工 i 阶段挂篮变形值, 由现场挂篮预压试验确定; $F_i^{\text{预抛高}}$ 为预抛高值, 数值为 $F_i^{\text{后期徐变}}$ 、 $F_i^{\text{竣工}}$ 二项之和。式

收稿日期: 2009-11-20

作者简介: 赵晓龙 男 1981 年出生 助理工程师

(1)是以绝对高程的形式给出立模标高的,此法的一个明显优点就是放样误差不累积。但没有考虑温度对梁体挠度和标高的影响,因此只有在温度对变形影响较小时或悬臂较短时才可以直接采用。

1.2 立模标高的相对高差形式

即以相对高差的形式进行立模放样。此法操作简单、方便,且不受温度限制。现叙述如下:待立模阶段与最后一个已完成阶段的相对高差为

$$\Delta h_i^{\text{立模}} = H_i^{\text{立模}} - H_{i-1}^{\text{立模}} \quad (2)$$

式中, $\Delta h_i^{\text{立模}}$ 为第 i 阶段与第 $i-1$ 阶段的相对高差; $H_i^{\text{立模}}$ 为第 i 阶段的理论立模标高; $H_{i-1}^{\text{立模}}$ 为第 $i-1$ 阶段在第 i 阶段立模时的标高,为清晨实际测量值。

立模标高相对高差形式实际上是根据升降温之后梁体为弹性体两相邻阶段块体保持变形协调以及平截面假设的原理,认为梁体在升降温变形之后相邻两阶段块体的相对高差不变的原则而建立的。

实践表明,在悬臂较短时,温度对挠度影响不显著,用绝对标高形式在任何时候放样都足以保证立模精度要求。但当悬臂较长时,温度变化对挠度影响较大,应该采用相对高差形式进行立模放样^[1]。

本桥在前 15 个阶段采用绝对高程形式进行立模放样,在后 5 个阶段采用相对高差形式与绝对高程形式相结合的办法。施工放样中在工期的允许范围内尽量在清晨这段时间内进行,消除温度效应的影响。

2 预抛高值的设置

本桥采用有限元分析软件 MIDAS 进行建模,并进行前进及倒退分析,并用桥梁博士进行复核验算。本模型将主桥全桥共划分成 326 个节点,325 个单元。经过全桥不同工况下挠度计算值的比较分析确定全桥预抛高取值为:中跨跨中取 3 cm,其它各值按二次抛物线分布。次边跨跨中取 7 cm,其它各值按二次抛物线分布。边跨在悬臂部分 17#块(14,193 节点)取 1.5 cm,其它各值按二次抛物线分布。全桥抛高图见图 1。

全桥预抛高值计算公式如下:中跨部分, $y = -0.03x^2/69^2 + 0.03$; 次边跨中部, $y = -0.07x^2/69^2 + 0.07$; 边跨悬臂部分, $y = -0.015x^2/52^2 + 0.015$; 边跨现浇部分, $y = -0.015x^2/38.5^2 + 0.015$ 。

3 现场线形监控的实施

3.1 测点布置

(1)高程测点布置。布置 0#块高程观测点是为了控制顶板的设计标高,同时也作为以后各悬浇节段高程观察的基准点。每个 0#块的顶板各布置 15 个高程观测点,其它节段均布置 5 个测点,这样布置不仅可以测定全桥纵向线形,而且可以明确绘制各断面的顶板曲线,这样就可以看出桥梁顶板的挠度线形,由于本桥使用挂篮施工,通过线形变化确定对挂篮支撑调整,尤其箱梁内箱的支撑刚度调整,保证桥梁线形,测点位置见图 2(a)所示。

(2)各悬浇节段的高程观测点布置。每个节段各设 5 个测点,对称布置在悬臂板与承托的交接点,距离翼缘板边缘 70 cm,离各块件前端 10 cm 处,如图 2(b)所示。

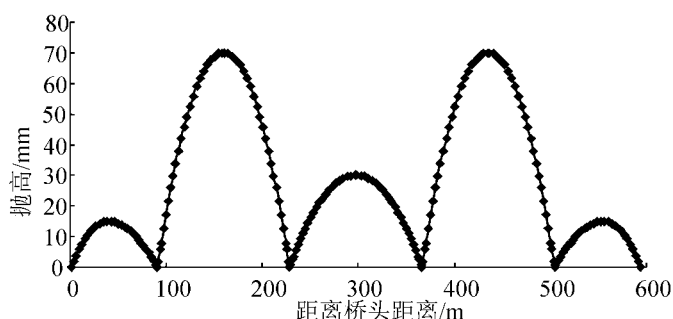
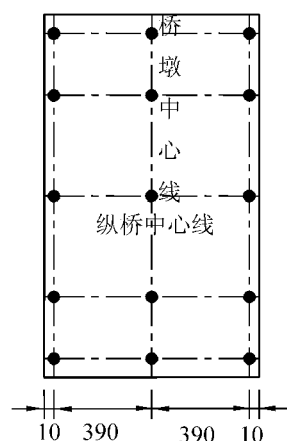
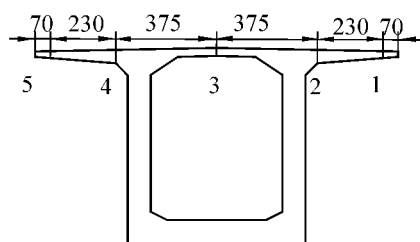


图 1 全桥抛高图



(a) 0#测点布置平面图



(b) 其他截面测点布置立面图

图 2 标高测点布置图(单位:cm)

3.2 观测时间

为减少温度的影响,挠度的观测尽量安排在早晨太阳出来之前进行^[2-3]。在整个施工过程中,主要观测内容包括:立模、混凝土浇筑前后、预应力张拉前后以及拆除挂篮前后、边(中)跨合龙前、最终成桥前的各项标高值。以这些观测值为依据,进行有效的施工控制。

4 线形监控结果及分析

4.1 阶段挠度分析

本阶段挠度是指在相邻两个施工工况产生的挠度变形增量。单独一个梁段的施工所经历的时间一般7 d左右,且混凝土收缩徐变发展相对较缓慢,因此其在短时间内对结构变形影响是很小的。将每个现浇梁段的施工过程划分成三个施工工况^[2-3],即立模板放样阶段(简称立模阶段)、浇筑混凝土阶段(简称浇筑阶段)和张拉预应力束阶段(简称张拉阶段)。在实际的监控中把每阶段的实测挠度变形增量跟软件计算结果进行对比,当对比结果超出正常范围内的允许误差时,就需要对理论模型按照前面介绍的方法进行调整,直至理论值与实测值比较吻合。在实际监控中,为了减少工作量,将主要精力放于每个阶段张拉后对梁体的标高进行全面核查,看其是否符合理论计算值。由于篇幅有限现只是把施工35#墩的10#、15#、20#块的阶段挠度实测值与理论值进行对比,详见表1、表2、表3。需要说明的是表中数值不包括挂篮变形值,挠度向上为正值,向下为负值。

表1 施工10#块阶段挠度对比

施工10#块	实测变形值/mm					理论变形值/mm	
	测点1	测点2	测点3	测点4	测点5	MIDAS	桥梁博士
秦家侧浇筑引起	-6	-3	-4	-4	-5	-2	-2
秦家侧张拉引起	7	4	7	7	4	7	6
秦家侧总变形	1	1	3	3	-1	5	4
东风侧浇筑引起	-5	-3	-5	-6	-5	-2	-2
东风侧张拉引起	7	8	8	9	9	7	6
东风侧总变形	2	5	3	3	4	5	4

表2 施工15#块阶段挠度对比

施工15#块	实测变形值/mm					理论变形值/mm	
	测点1	测点2	测点3	测点4	测点5	MIDAS	桥梁博士
秦家侧浇筑引起	-13	-7	-10	-8	-14	-8	-9
秦家侧张拉引起	5	4	5	4	5	10	13
秦家侧总变形	-8	-3	-5	-4	-9	2	4
东风侧浇筑引起	-7	-8	-5	-6	-8	-8	-9
东风侧张拉引起	4	3	4	3	2	10	13
东风侧总变形	-3	-5	-1	-3	-6	2	4

表3 施工20#块阶段挠度对比

施工20#块	实测变形值/mm					理论变形值/mm	
	测点1	测点2	测点3	测点4	测点5	MIDAS	桥梁博士
秦家侧浇筑引起	-35	-33	-40	-30	-31	-35	-44
秦家侧张拉引起	5	4	5	6	6	11	15
秦家侧总变形	-30	-29	-35	-24	-25	-24	-29
东风侧浇筑引起	-31	-35	-33	-27	-33	-35	-44
东风侧张拉引起	7	6	5	7	6	11	15
东风侧总变形	-24	-29	-28	-20	-27	-24	-29

由表1、表2、表3可以看出:当前几个阶段悬臂长度不是很长时,混凝土自重引起的变形值很小,张拉预应力束引起的变形值也很小,因为由于前几个阶段梁体刚度较大,所以挂篮变形值起主导作用,而梁体变形较小;随着悬臂长度的伸长,混凝土自重引起的变形值逐渐增大,张拉预应力束引起的变形值也逐渐增大,由于梁体刚度变小,所以这两者变形逐渐起主导作用。但随着悬臂长度的伸长,张拉预应力束引起的实测变形值与理论计算值相比偏小。究其原因,一方面是跟混凝土以及钢束的弹性模量有关,但主要

由表 4、表 5 可以看出:当累积变形阶段数较少时,由于收缩徐变作用时间短,所以其作用效果不明显,累计变形实测值与理论计算值相差不大。当累积变形阶段数较多时(前提是阶段挠度对比相差不大以及消除测量误差及温度效应的影响),由于收缩徐变作用时间长,所以其作用效果很明显,累计变形实测值与理论计算值相差较大(理论值偏小),这时就要逐渐调整模型中的收缩徐变系数,使理论值与实测值相符合。

4.3 各阶段标高的复核

标高复核操作简单、直观,应该对每一工况都全面核对桥面标高的理论与实测值。在实际监控中,为了减少工作量,将主要精力放于每个阶段张拉后对梁体的标高进行全面核查,看其是否符合理论计算值。下面只是列出 38[#]墩下游的各阶段的标高复核情况,详见表 6。

表 6 38[#]墩下游桥幅各阶段标高复核 m

项目	距墩中心距离	东风侧				秦家侧			
		设计标高	预计标高	实测标高	差值	设计标高	预计标高	实测标高	差值
20 [#] -21 [#]	68	136.154	136.208	136.215	0.007	133.517	133.527	133.522	-0.005
19 [#] -20 [#]	64	136.093	136.147	136.149	0.002	133.615	133.622	133.614	-0.008
18 [#] -19 [#]	60	136.030	136.099	136.109	0.010	133.710	133.723	133.714	-0.009
17 [#] -18 [#]	56	135.966	136.034	136.037	0.003	133.804	133.818	133.815	-0.003
16 [#] -17 [#]	52	135.900	135.966	135.956	-0.010	133.895	133.910	133.900	-0.010
15 [#] -16 [#]	48	135.832	135.901	135.895	-0.006	133.984	133.999	134.002	0.003
14 [#] -15 [#]	44.5	135.771	135.835	135.842	0.007	134.060	134.075	134.072	-0.003
13 [#] -14 [#]	41	135.709	135.778	135.766	-0.012	134.134	134.149	134.151	0.002
12 [#] -13 [#]	37.5	135.645	135.711	135.718	0.007	134.207	134.221	134.227	0.006
11 [#] -12 [#]	34	135.581	135.634	135.638	0.004	134.278	134.292	134.301	0.009
10 [#] -11 [#]	31	135.524	135.577	135.584	0.007	134.338	134.352	134.344	-0.008
9 [#] -10 [#]	28	135.466	135.509	135.508	-0.001	134.396	134.410	134.419	0.009
8 [#] -9 [#]	25	135.408	135.445	135.457	0.012	134.453	134.462	134.461	-0.001
7 [#] -8 [#]	22	135.348	135.363	135.362	-0.001	134.509	134.516	134.512	-0.004
6 [#] -7 [#]	19	135.288	135.292	135.300	0.008	134.564	134.569	134.564	-0.005
5 [#] -6 [#]	16.5	135.236	135.240	135.254	0.014	134.608	134.612	134.613	0.001
4 [#] -5 [#]	14	135.185	135.185	135.178	-0.007	134.652	134.658	134.665	0.007
3 [#] -4 [#]	11.5	135.132	135.132	135.124	-0.008	134.695	134.695	134.695	0.000
2 [#] -3 [#]	9	135.079	135.079	135.072	-0.007	134.737	134.737	134.732	-0.005
1 [#] -2 [#]	6.5	135.025	135.025	135.034	0.009	134.778	134.778	134.779	0.001
0 [#] -1 [#]	4	134.970	134.970	134.974	0.004	134.819	134.819	134.821	0.002
0 [#] -0 [#]	3	134.948	134.948	134.948	0.000	134.834	134.834	134.834	0.000
0 [#] -0 [#]	1	134.904	134.904	134.904	0.000	134.866	134.866	134.866	0.000
0 [#] -0 [#]	0	134.881	134.881	134.881	0.000	134.881	134.881	134.881	0.000

由表 6 可以看出:各阶段张拉后实测标高值与预计值有一定误差,但相差不大都在容许范围之内。说明这种抛高计算方法是行之有效的,并且控制结果与预计结果一致。

4.4 合龙精度

经现场测量,主桥轴线偏差都控制在 ± 5 mm 以内。合龙高差考虑纵向坡度的影响,所有合龙段在混凝土浇注前,边跨:34[#]-35[#]墩上游合龙段高差 8 mm,34[#]-35[#]墩下游合龙段高差 6mm,38[#]-39[#]墩上游合龙段高差 1 mm,38[#]-39[#]墩下游合龙高段差 3 mm;次边跨:35[#]-36[#]墩上游合龙段高差 4 mm,35[#]-36[#]墩下游合龙段高差 10 mm,37[#]-38[#]墩上游合龙段高差 3 mm,37[#]-38[#]墩下游合龙段高差 9 mm;中跨:36[#]-37[#]墩上游合龙段高差 5 mm,36[#]-37[#]墩下游合龙段高差 10 mm。由此可见,中线偏差、合龙高差各项指标都是符合设计及规范要求的。

4.5 成桥后线形监控结果

全桥合龙第一层桥面铺装完成后,经现场测量:边跨:34[#]-35[#]墩跨中截面位置实际高程比设计高程高 4 mm,38[#]-39[#]墩跨中截面位置实际高程比设计高程高 6 mm;次边跨:35[#]-36[#]墩跨中截面实际高程比设计高程高 15 mm,37[#]-38[#]墩跨中截面实际高程比设计高程高 16 mm;中跨:36[#]-37[#]墩跨中截面实际高程比设计高程低 8 mm;在预计的范围内,这是因为第一层桥面铺装已经完成,但还没有进行第二层桥面铺装和护

栏底座等附属工程的施工以及收缩徐变还没有完成,待这两部分完成以后,桥梁的整体位移还会下降一些,这个差值就是预留的储备值。

5 结论

结合松花江大桥现场施工监控实施的情况,主要得出以下结论:(1)采用相对高差形式进行标高的立模放样是消除温度效应影响行之有效的方法。(2)当悬臂长度较长时,预应力束实际张拉效果与理论计算有较大出入,实测的本阶段变形明显偏小,在实际现场监控中要进行修正。(3)对于混凝土收缩徐变的影响,采用了根据现场累计挠度的分析以及实测各项参数来逐步调整收缩徐变系数的方法。(4)最终监控结果表明,本桥达到了线形平顺、受力合理的预期目的,验证了介绍方法的合理性及其实用性。

参 考 文 献

- [1] 葛耀君. 分段施工桥梁分析与控制[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [2] 徐君兰. 大跨度桥梁施工控制[M]. 北京:人民交通出版社,2000.
- [3] 向中富. 桥梁施工控制技术[M]. 北京:人民交通出版社,2001.

Linear Control Technology of Cantilever Construction for Songhuajiang Bridge

Zhao Xiaolong¹, Wang Huidong²

(1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute, Tianjin Branch, Tianjin 030042, China;

2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Construction Monitoring of the bridge is based on analysis of the construction process of stress and linear control, with the error analyzed to identify the problem and correct it in time and at the same time making correct predictions for the subsequent stages. The ultimate goal of the finished bridge state is to meet the design requirements. In this article, based on the construction of Songhuajiang Bridge, the finite element model of the bridge is established by the MIDAS software to analyze the bridge construction in various stages of deformation. According to the analysis of the results, the flip-height is calculated. Finally, monitoring results of Songhuajiang Bridge are introduced in this article, showing that the ultimate control of this bridge has reached the anticipated goal in linear smoothness and reasonable structure stress.

Key words: construction monitoring; continuous girder bridge; cantilever construction; linear control