

大跨径预应力混凝土连续梁施工控制技术

黄 腾¹ 张书丰¹ 章登精² 郭志明²

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京长江第二大桥管理局, 江苏 南京 210038)

摘要 大跨径预应力混凝土连续箱梁悬臂浇筑施工过程中, 施工控制是个复杂的动态系统工程, 是实现大桥成桥线形、内力满足设计要求的重要手段. 结合南京长江第二大桥北汉桥主桥施工控制实践, 阐述了悬臂浇筑施工过程中的施工控制原理、方法和分析计算理论, 研究了双幅桥混凝土箱梁的温度分布特性以及高强混凝土水化热温度的控制, 科学地指导了施工, 使全桥 10 个合拢段的合拢轴线误差小于或等于 4 mm, 标高误差小于或等于 23 mm, 成桥线形均在设计允许误差范围内, 克服了高强度混凝土水化热产生的龟裂和强度损失的现象.

关键词 施工控制 温度分布 大跨径混凝土连续梁 悬臂浇筑

中图分类号: TU745.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1980(2003)06-0669-05

随着预应力混凝土工艺的不断完善, 采用挂篮悬臂浇筑梁节段混凝土来建造大跨度混凝土梁桥, 实现无支架而靠自身结构进行施工的先进方法, 使得预应力混凝土连续桥梁、连续钢构桥和混凝土斜拉桥得到较大发展.

分段悬臂浇筑法是目前国内外大跨径预应力混凝土桥梁的主要施工方法. 当桥梁墩柱结构施工完成后, 从桥墩顶部浇筑 0[#] 节段开始至全桥合拢, 其间经历逐段立模浇筑混凝土梁节段, 分批张拉预应力钢索, 逐步完成结构体系转换和合拢等众多施工工艺. 在整个施工过程中, 由于混凝土材料的非匀质性、混凝土的收缩和徐变、大气温度、温差的影响, 加之各梁节段混凝土加载龄期不同的影响, 会造成各梁节段的内力和位移随着混凝土浇筑过程而偏离预计值. 因此, 在梁的整个悬臂浇筑过程中必须进行施工控制, 以保证成桥的梁线形和受力状态与设计一致.

南京长江第二大桥北汉桥是目前亚洲最大跨径的预应力混凝土连续桥梁, 主桥为 90 m + 3 × 165 m + 90 m 五跨变截面连续箱梁桥, 位于半径为 16000 m 的竖曲线上. 桥面宽 32.0 m, 预应力混凝土箱梁由上、下行分离的两个单箱单室箱形截面组成. 箱梁根部梁高 8.8 m, 跨中梁高 3.0 m, 箱梁顶板宽 15.42 m, 底板宽 7.5 m, 翼缘板悬臂长 3.96 m, 箱梁梁高从距墩中心 3.0 m 处到跨中按二次抛物线变化, 如图 1 所示.

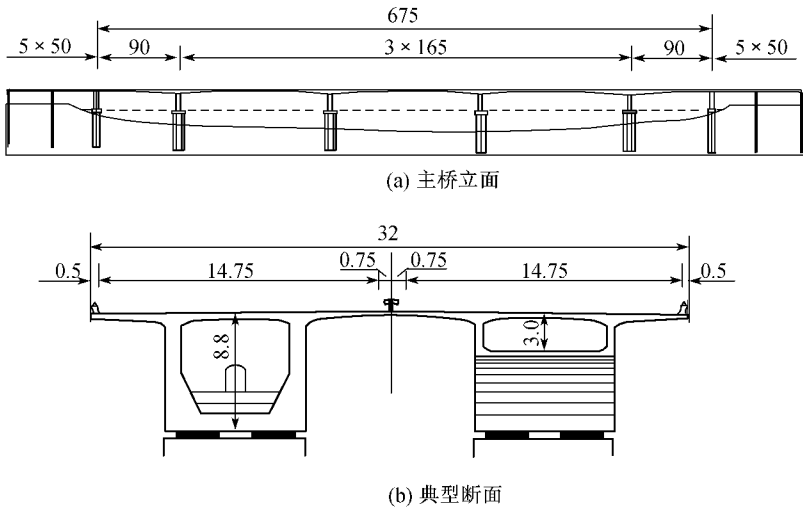


图 1 南京二桥北汉桥桥形布置图

Fig.1 Bridge type of the north branch of the Second Nanjing Yangtze River Bridge

收稿日期: 2003-01-18

作者简介: 黄腾(1957—) 男, 江苏南京人, 研究员, 硕士, 主要从事建筑物安全监测及精密工程测量研究.

全桥施工程序是单幅桥 5 跨连续箱梁在 4 个主墩上按“T 构”用挂篮分段对称悬臂浇筑,中跨和次中跨在吊架上现浇,边跨现浇段在落地支架上浇筑,以边跨合拢→次中跨合拢→中跨合拢顺序进行施工.根据北汉大桥主桥箱梁悬臂施工特点和设计要求,用科学、合理的方法对建筑工程进行施工控制及相关技术的研究,是确保大桥成桥线形、内力符合设计要求和施工安全的关键.

1 施工控制体系的构成

在箱梁悬臂施工中,施工控制体系主要包括实时测量、现场描述和分析计算三大组成部分,如图 2.

1.1 实时测量

实时测量是施工控制系统的主体,采集的信息能全面反映当前桥梁的状况,是指导施工的主要依据,必须确保精度和可靠性.箱梁悬臂施工中,实时测量内容包括线形控制测量、混凝土应变监测、箱梁温度分布测量和高强度混凝土水化热温度观测 4 大项目.

1.2 现场描述

施工控制体系中,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如下内容 (a)材料的物理力学性能参数.箱梁混凝土的弹模、容重、收缩徐变系数等.(b)实际施工中的荷载情况.主梁恒载,每一梁段实测自重(包括主梁钢材、连接件等).主梁的二期恒载,包括桥面铺装、人行道板、栏杆、灯柱、管线等.施工荷载,包括施工构件、梁段吊篮等.临时荷载,对主要的施工中临时荷载进行量化模拟而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.主要是对箱梁断面和桥型几何尺寸测定.

1.3 计算分析

大跨径连续箱梁桥的施工控制是一个预告→施工→测量→识别→修正→预告的循环过程.施工控制的最基本要求是确保施工中结构的安全,其次必须保证结构的外形和内力在规定的误差范围之内.在施工控制中,结构状态还会由于数据参数、施工误差、测量误差、结构分析模型误差等因素干扰,需要用滤波的方法,从被噪声污染的状态中估计出真实的状态.同时,为了达到施工控制的最优性能指标,就必须遵循最优控制规律,组成最优控制系统,进行分析、调整、预测.

计算分析是运用工程控制论的思想,把大桥施工看做一个复杂的动态系统,采用最优控制理论与计算机相结合的技术,将大桥成桥线形和施工期结构变位状态,作为线形离散、确定性动态结构系统最优控制的对象,通过卡尔曼滤波法,建立随机的数学模型和性能指标,用递推滤波的思想,从被噪声污染的状态中估计出真实的状态,并用估计出的状态变量,按确定性的最优控制规律构成闭环状态反馈系统,求出最优控制变量值,不断对各调整阶段进行控制,最终达到随机最优控制的目的.

实施控制时的控制计算模型是将桥简化为平面结构,各节段离散为梁单元,4 个主墩端部为固定支座,两边跨端视为活动铰支座.对于预应力混凝土连续箱梁悬臂施工计算通常采用平面杆系有限元分析法,针对施工控制而言,又分为前进分析法和倒退分析法^[1].根据北汉主桥预应力混凝土连续箱梁的施工工艺和进度安排,采用了前进分析法和倒退分析法交替使用的计算方法进行.

2 线形控制测量

线形控制测量内容包括标高测量、中轴线位置测量和施工挂篮变形测量^[2].线形控制是一个动态控制过程,在预应力混凝土箱梁悬臂施工中,其自重作用使得悬臂端向下位移,当张拉预应力钢束时,又将使梁体向

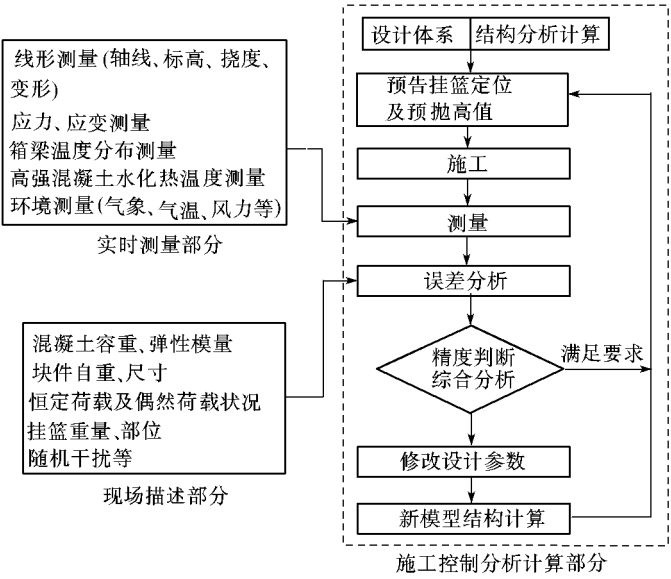


图 2 连续箱梁悬臂施工测控体系
Fig.2 Block diagram of continuous box beam cantilever construction monitoring system

上位移.同时,由于混凝土结构的徐变与收缩机理复杂,结构发生的非线性变形不易精确确定;其次,施工过程中所用材料的变异性、实际结构的受力条件及施工中温度变化等因素,将使得悬臂浇筑的箱梁标高与设计高明显偏离.因此,对于每一个悬浇梁段要进行 6 种工况的线形控制观测,即挂蓝就位及立模后、浇筑混凝土前、浇筑混凝土后、张拉预应力钢束前、张拉完预应力钢束后、移动挂蓝前(后).为避开日照的影响,测量要在日出前完成.

线形测量的控制网点分上、下层建立,上层建在各桥墩 0# 块上,下层建在箱室的洞门上,为便于视准线法测量桥中线,21# ~ 26# 桥墩上的平面控制网点均设在桥轴线上,相互间构成坚强的网形,并与两岸 4 个大桥控制网点连测.高程控制网采用精密三角高程法^[3]观测,精度满足二等水准要求.

线形测量的观测点布设在每个悬浇梁段立模腹板前端面 15 cm 处,每个横截面上、下层腹板上各布设 3 个观测点,其中 1 个点位于箱梁中线,兼作轴线控制点,另 2 个点以箱梁中线为准对称布设.混凝土浇注完毕后,测点再引至混凝土表面.

在对梁板标高和中轴线测量时,现场实测值与设计计算值高程应小于 $\pm 15\text{ mm}$,中轴线偏位小于 5 mm.合拢段是全桥施工的重点,也是线形控制的重点,悬臂的合拢精度应为:平面中线位置互差小于 10 mm,悬臂端高差小于 20 mm.

3 混凝土应变监测

自由平衡悬臂法现浇预应力箱梁,工艺复杂、技术难度大,为了指导施工,同时验证设计计算的合理及设计的可靠性,需实时进行混凝土应力监测.应力监测项目有:箱梁截面混凝土正应力,观察施工过程中的箱梁截面混凝土应力是否在设计范围内和观察预应力钢束张拉锚固、恒载、体系转换等作用下混凝土正应力变化等;桥面板横向混凝土正应力,观测预应力钢束张拉锚固的有效影响范围;箱梁混凝土主应力,监测箱梁在合拢后混凝土主应力是否在设计要求范围内;桥墩墩身混凝土正应力,监测施工过程中桥墩墩身的混凝土应力是否在设计要求之内,协助判断悬臂施工中是否有较大的不平衡弯矩.

测试截面是根据悬臂施工各阶段的受力特点确定的,选定在主桥 5 个桥孔跨径 1/4、1/2、3/4 以及墩顶截面.施工中墩顶截面混凝土正应力最大,但为了避开箱梁悬臂施工墩顶临时固结及应力集中的影响,实际墩顶监测截面移至近墩的 0# 块与 1# 块交会的 15 ~ 20 cm 截面处.另外在 23# 墩 1/4 跨径处设置了桥面板横向混凝土正应力监测断面.全桥共设置了 21 个正应力监测截面.

监测截面应力测点布置,除 23# 墩 1/4 跨径截面的纵向混凝土正应力测点布置 8 个测点(图 3)外,其它监测截面均布置 4 个测点(如图 3 中 5 ~ 8 点).23# 墩 1/4 截面桥面板还设置了 10 个横向应力测点,如图 4.全桥共设应力测点 101 个.采用能长期连续观测的振弦式混凝土应变计和配套的钢弦频率接收仪作为应力观测仪器.

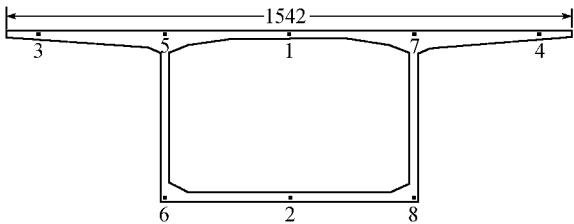


图 3 应力测点布置

Fig.3 Arrangement of stress measurement points

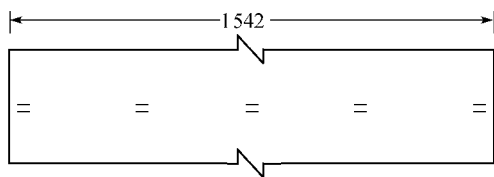


图 4 桥面板横向混凝土正应力测点布置

Fig.4 Arrangement of normal stress measurement points on lateral concrete pavement

4 公路双幅桥混凝土连续箱梁温度分布特性

自然环境条件变化产生的温度荷载可划分为年温度荷载和日照温度荷载两类,前者所引起的结构物温度变化是长期的缓慢作用,只会造成结构物整体发生均匀的温度变化,这项因素在工程结构设计中已被考虑.而后者的形成是由于外界气候的条件变化,导致同一截面上产生温差,继而由于变形后相互间的约束,使材料内部产生应力.它的特点是 (a) 影响因素众多,如太阳的辐射、地面的反射、气温的变化、风速、桥型结构和腹板朝向等; (b) 瞬时变化性,如周期性的气象影响因素; (c) 区域差异明显,如地区气候、地理条件.因此,

温度、日照引起的结构物表面和内部温度变化是一个随机变化的复杂函数,难以直接求得解析值,但可以通过实地观测混凝土箱梁断面某些关键位置处的温度值,然后对其进行统计分析,以此来研究混凝土箱梁在各时段的温度分布规律.针对二桥工程结构物所处确定的地理、地形条件,影响其日照温度变化的主要因素为太阳辐射,气温变化和风速.而在求解结构的日最大温度梯度时,风速因素可以忽略.这样影响结构日照温度分布的因素简化为太阳辐射与气温变化,而前者更为重要.

4.1 温度测量的布置及测量的方法

为了能反映出左、右幅箱梁的相互影响,以及太阳辐射沿桥梁纵向对不同尺寸箱梁截面的作用效果,选择了 3 个箱梁断面布置温度测点,分别位于次中跨(23#桥墩)的 1/4 跨(上、下游幅)和中跨的跨中位置,每一断面上测点的布置如图 5 所示.混凝土内部测点采用精度为 0.1℃的热敏电阻,箱梁内外的温度采用普通水银温度计直接测出.

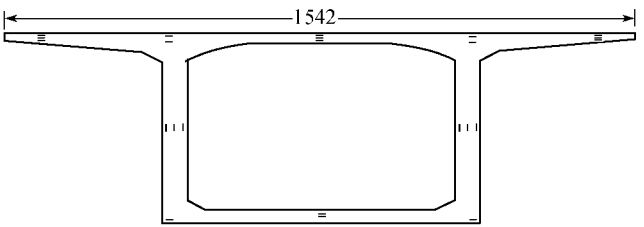


图 5 温度测点布置

Fig.5 Arrangement of temperature measurement points

温度测量选择了 4d 具有代表性气象的时间,分别为气温高、太阳辐射强烈、风速较小的晴好天气和气温变化小,雨后多云的天气.每次观测连续进行 24 h,观测间隔 2~4 h.

4.2 实测数据分析

通过实测数据,绘出上、下游幅箱梁的每一对应温度测点的“温度—时间”比较曲线,得出上、下游幅箱梁的温度差异.混凝土箱梁在垂直方向上的温度分布的形式可以按照指数曲线来拟合:

$$T_y = T_0 e^{-ay} \tag{1}$$

式中: T_0 ——箱梁断面梁高方向的最大温差,℃; y ——计算点至箱梁顶面的距离,m; T_y ——计算点位置处的温差值,℃.对上式两边同时取对数,并按最小二乘法使计算值与实测值的误差平方和为最小的原则,可求得 $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $a = 5$, 即 $T_y = 20e^{-5y}$.

4.3 日照温差对悬臂施工的影响及控制

箱梁悬臂施工中,太阳辐射造成的混凝土箱梁沿垂直方向的非线性温度分布,会使箱梁悬臂产生周期性的明显变形.变形一般在下午 15:00 达到顶峰,清晨 5:00 达到最小.这种规律晴天尤为明显.箱梁截面上下缘的温差越大,悬臂端部的挠度也越大,并且悬臂越长,这种影响越为明显.因此,高程状况控制必须在日出之前的固定时间进行.对于不同时间获取的标高数据,应考虑温度变化对其的影响.

南京二桥 10 个合拢段施工均在太阳辐射强烈、日温差较大的七八月间进行,合拢断面因日照温度差引起的最大挠度可以达到 35 mm 以上,箱梁悬臂的纵向最大伸缩在 4 mm 左右.因而,合拢段施工选择在气温变化平稳的 1:00~5:00 进行,这有利于箱梁合拢后承受较小的温度荷载,结构处于一个合理的受力状态.而且,在浇注混凝土之后,气温平稳上升,有利于混凝土较早达到强度并减少温度收缩裂缝.

合拢是箱梁悬臂施工的关键技术之一,它将影响桥梁结构的受力性能.由于温度变化会使箱梁悬臂在竖向和纵向都产生变形,因此,合拢时一定要考虑温度因素.合拢施工应选择在日气温变化较小的时间段进行,且浇注混凝土的时间可选在当天气温最低的凌晨,以使混凝土在浇注后达到一定强度前处于升温环境中,并且要加强混凝土养护,保持箱梁的潮湿状态,减少日照温差影响.

5 箱梁高强度混凝土水化热温度控制

高强度混凝土相比普通混凝土,水泥用量大,在大体积混凝土结构浇筑中,水泥在水化过程中释放大量的热量,加之混凝土传热性能差,结构内部热量不易散发,形成内外温差,导致混凝土发生应变.而结构物的约束将会阻止这种应变,产生温度应力,一旦温度应力超过混凝土所能承受的极限抗拉强度时,就会产生温度裂缝.此外水化热产生的高温还会导致混凝土强度降低.因此,在大体积、高强度混凝土浇筑中,既要控制水化热升温,同时要控制混凝土内外温度梯度.

在箱梁混凝土浇筑前,进行水化热温度估算是施工控制的重要工作.混凝土内部和表面最高温度^[4]

$$\begin{aligned} T_{\max} &= T_j + T_\tau \cdot \xi & T_{b\max} &= T_q + 4h'(H - h') \Delta T / H^2 \\ H &= h + 2h' & h' &= k\lambda / \beta \end{aligned}$$

式中 : T_j ——混凝土浇筑温度 , $^{\circ}\text{C}$; T_{τ} —— τ 龄期时混凝土绝热温升 , $^{\circ}\text{C}$; ξ ——降温系数 ; T_q ——大气的平均温度 , $^{\circ}\text{C}$; h ——混凝土的实际厚度 , m ; λ ——混凝土的导热系数 ; K ——计算折减系数 ; β ——模板及保温层的传热系数 .

但是 ,实际混凝土拌和及浇筑过程中有许多影响因素 ,且混凝土内部与表面最高温度并非同时达到 ,最高温度与最大温差时刻不同 ,而且 ,在 23# 箱梁 0# 块和 1# 块节段混凝土内埋设了多层温度片 .从实测结果来看 ,内部温度在 30 h 达到最高 ,约 65°C ,表面温度在 15 h 达到最高 ,约 42°C ,这与用式 (2)(3) 的计算结果非常接近 .在南京二桥北汊桥的施工中 ,箱梁节段的高强度混凝土的最高温度在 60°C 以下 ,最大温度梯度不高于 30°C ,从施工的结果来看 ,不论是冬季还是夏季施工 ,按照控制指标采取适当的保温或降温措施 ,可以克服高强度混凝土水化热产生的龟裂和强度损失现象 .

6 结 语

a. 将工程控制论的思想与桥梁施工有机的结合 ,把南京二桥北汊桥的施工看做一个复杂的动态系统 ,运用随机最优控制理论对其实行误差分析 ,达到了最终的控制目的 .最后的检测结果是 :10 个合拢段 ,轴线误差小于或等于 4 mm ,标高误差小于或等于 23 mm ,全桥合拢后通测的成桥线形均在设计允许误差范围内 ,且线形良好 .

b. 通过准确的现场描述、实时测量 ,为控制提供了可靠的科学依据 ,并及时地反映所出现的问题 ,利用卡尔曼滤波法进行解决 ,使问题直观化 .

c. 南京二桥施工控制方法的实际应用 ,可进一步推广到其它连续梁桥、拱桥、斜拉桥、吊桥的施工中 ,有广泛的应用前景 .

参考文献 :

- [1] 徐君兰 ,项海帆 .大跨度桥梁施工控制[M].北京 :人民交通出版社 ,2000.28—48.
- [2] 黄腾 ,金明 ,高波 ,等 .南京长江二桥北汊主桥施工的线形控制研究[J].工程勘察 ,2003 (6) 57—59.
- [3] 华锡生 ,黄腾 .精密工程测量技术及应用[M].南京 :河海大学出版社 ,2002.96—110.
- [4] 杨嗣信 ,侯君伟 .高层建筑施工手册[M].北京 :中国建筑工业出版社 ,2001.488—490.

Construction control technology for large span prestressed concrete continuous beams

HUANG Teng¹ , ZHANG Shu-feng¹ , ZHANG Deng-jing² , GUO Zhi-ming²

(1. College of Civil Engineering , Hohai Univ . , Nanjing 210098 , China ;
2. Administrative Bureau of Second Nanjing Yangtze River Bridge , Nanjing 210038 , China)

Abstract : During cantilever casting of long span prestressed concrete continuous box beams , the construction control , a complicated and dynamic system engineering , is an important measure for bridges to ensure their lineament and to meet the design requirement of the internal force . In combination with the practice of construction of the main section of the north branch of the Second Nanjing Yangtze River Bridge , a discussion is made on the principle and method for construction control and the theory of calculation for cantilever casting , and a study is made on the characteristics of temperature distribution along the concrete box beam of the double deck bridge and hydration heat temperature control of high-strength concrete . The research provides a scientific guidance to the construction , and makes the axial closure error of all the ten closure sections smaller than 4 mm , the elevation error smaller than 23 mm , and the lineament error of the bridge within its design range . The construction control technology effectively overcomes cracking and strength loss of high strength concrete induced by hydration heat .

Key words : construction control ; temperature distribution ; large span concrete continuous beam ; cantilever casting