

大跨径连续梁桥施工过程分析及线形控制

Construction process analysis and alignment control of long span continuous beam bridge

吴炎奎

Wu Yankui

(中国水利水电第十一工程局有限公司 河南省郑州市 450000)

(Sinohydro 11th Engineering Bureau Co., LTD., Zhengzhou 450000, Henan Province, China)

摘要: 本文依托国外某项目在建大桥项目,对大桥各个施工过程进行跟踪监控,并通过 Midas/Civil 有限元分析软件建立了该桥结构仿真模型,结合现场实测数据分析了各施工阶段结构受力及位移变化情况,并针对温度变化对成桥状态线形变化的影响进行了重点模拟。最后阐述了现场施工监控工作,并对现场施工下达监控指令,确定立模高程,有效实现了对整个施工过程的控制,以期后续相似桥型施工提供参考借鉴。

Abstract: This paper relies on a bridge project under construction abroad to track and monitor all construction processes of the bridge, and establishes a simulation model of the bridge structure through Midas/Civil finite element analysis software. Combined with the field measured data, the structural stress and displacement changes in each construction stage are analyzed, and the impact of temperature changes on the state of the completed bridge is simulated emphatically. At last, the monitoring work of the site construction is described, and the monitoring instructions are issued to the site construction, and the elevation of the vertical mold is determined, which effectively realizes the control of the whole construction process, in order to provide reference for the subsequent similar bridge construction.

关键词: 大跨径连续桥梁; 过程分析; 线性控制

Key words: long-span continuous bridge; Process analysis; Linear control

1 工程概况

国外某项目在建大桥结构总体布置采用 T 梁 (39.6m × 6) (引桥) + 连续梁 (47+80 × 2+47 × 2+80 × 2+47) (主桥) + T 梁 (39.6m × 4) (引桥) 的结构形式,总长度 904m,桥面宽 9.5m。主桥上部构造由双联(四跨一联)预应力混凝土变截面连续箱梁组成。主梁纵向顶、底板预设预应力钢束。箱梁截面为单箱单室结构,顶宽 9.5m,底宽 4.94m,桥面设 2% 双向横坡。主梁顶板厚 22cm,底板采用变厚度设置,由支点向跨中连续变化。主梁截面如图 1.1 所示。主桥主梁采用悬臂浇筑与支架现浇结合的施工方法,各标准节块长 3.05m,合龙段长 1.5m,采用三角挂篮进行悬臂浇筑。0#块及边跨现浇段采用满堂支架法施工。主梁施工流程:满堂施工完成 0#块→墩梁固结→双悬臂施工→形成“T”构→双边跨满堂施工→解除墩梁固结→悬臂梁跨中合龙形成连续梁结构的施工过程。

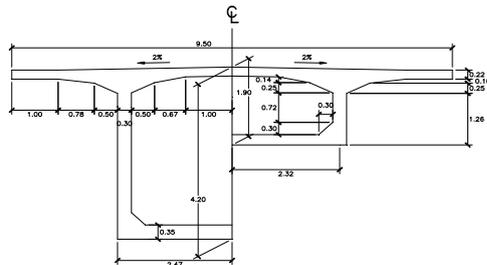


图 1 主梁断面图

2 主桥有限元计算模型

本课题研究通过 Midas/Civil 有限元分析软件建立预应力混凝土连续梁桥的有限元模型进行正装分析,得到各个施工阶段的结构变形、内力和应力,用可靠的数据参数指导施工过程的顺利进行。

2.1 模型建立

预应力混凝土连续梁施工阶段分析时,桥墩的影响不大,故未建立桥墩模型,且主桥主梁为双联对称结构,因此只建立

一联结构模型即可满足分析要求。Midas Civil 有限元软件采用三维线性梁单元,具有拉、压、弯、剪、扭等变形特点,利用梁单元可以很好的模拟实桥的结构特点。本文采用梁单元来模拟该连续梁桥主梁结构,全桥共划分为 98 个梁单元,如图 2 所示。其中边跨现浇段单元 12 个,中跨合龙段单元 2 个,零号块单元 18 个,双悬臂施工节块单元 66 个。



图 2 大桥主梁结构模型

悬臂施工连续梁桥过程中要发生体系转换,施工过程中临时锚固、支撑等临时结构的设置与拆除、上部结构和桥墩的支撑条件的变化对结构的内力和位移将产生非常大的影响,因此处理好边界条件的设置尤为重要。在 7#、8#、9#墩处模拟墩底固结及 0#块与桥墩的临时锚固,限制其位移。采用弹性连接对边跨现浇段及成桥后滑动支座的模拟,以真实地反映结构的约束状态。悬臂施工阶段主要有挂篮行走、混凝土浇筑及预应力钢束张拉三个施工工序。根据现场施工情况,模拟 17 个实际施工阶段,如表所示。

施工阶段	施工内容	施工阶段	施工内容
1	0#块(混凝土浇筑、临时锚固)	10	9#块(挂篮行走、砼浇筑、预应力张拉)
2	1#块(挂篮行走、砼浇筑、预应力张拉)	11	10#块(挂篮行走、砼浇筑、预应力张拉)
3	2#块(挂篮行走、砼浇筑、预应力张拉)	12	11#块(挂篮行走、砼浇筑、预应力张拉)
4	3#块(挂篮行走、砼浇筑、预应力张拉)	13	边跨合龙段
5	4#块(挂篮行走、砼浇筑、	14	中跨合龙段

	预应力张拉)		
6	5#块(挂篮行走、砼浇筑、预应力张拉)	15	二期
7	6#块(挂篮行走、砼浇筑、预应力张拉)	16	温度荷载
8	7#块(挂篮行走、砼浇筑、预应力张拉)	17	收缩徐变 3650 天
9	8#块(挂篮行走、砼浇筑、预应力张拉)		

主梁结构采用 P35 混凝土, 弹性模量 $E_c=3.07 \times 10^4 \text{Mpa}$, 泊松比 0.2, 线膨胀系数 $9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。钢绞线采用低松弛预应力钢绞线, 承载力标准值 $f_{pk}=1860 \text{Mpa}$, 弹性模量 $E_p=1.95 \times 10^5 \text{Mpa}$ 。

根据施工图纸建立主梁结构自重荷载, 混凝土容重取 25kN/m^3 。沥青混凝土铺装 15.05kN/m , 人行道及护栏 19.75kN/m 。悬臂浇筑挂篮重 29.42t , 并根据各单元重量考虑节块混凝土湿重荷载。考虑结构整体升温 and 整体降温各 20°C 的温度荷载效应, 并按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60-2004) 考虑日照温度梯度荷载, 按 4.3.10 取用, 其中 $T_1=14^\circ\text{C}$, $T_2=5.5^\circ\text{C}$ 。竖向日照反向温度梯度均乘 -0.5 的系数。主梁荷载工况布置如图 3 所示。

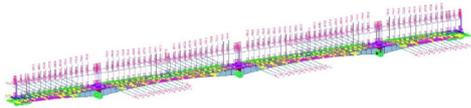


图 3 主梁荷载工况布置

3 施工过程分析

施工过程中挂篮及施工机具、材料重量变化大, 很难完全符合设计时的估计。加之混凝土配合比、混凝土收缩徐变、温度变化及张拉工艺等均将造成预应力损失, 若对其不能得到符合实际的量化分析, 加以有效的监测控制将会直接影响桥梁的设计线形、强度和工程质量。强行合龙的结果必将使桥内产生极大的附加应力, 因此, 过程中需对结构受力、位移变化情况及时掌握。

3.1 施工阶段主梁受力分析

根据现场施工的实际过程, 依次悬臂浇筑主梁至 11#节块, 再进行边跨现浇段施工, 而后进行中跨合龙段的施工, 完成体系转换后, 拆除临时支座, 进行二期荷载施工。对于每一个施工阶段而言, 由于混凝土的自重影响, 梁体结构将会产生向下的挠度, 0#块段处的应力也会随着悬臂的延伸而增大, 所以此施工过程对梁体的不利影响最大。因此, 通过对悬臂最大处 11#节块受力进行分析总结。

悬臂段 11#节块浇筑完毕, 由 Midas/Civil 有限元软件所建立的该桥模型通过分别激活 11#节块的预应力张拉荷载、中跨合龙段的挂篮及混凝土湿重荷载, 钝化 11#节块的挂篮及混凝土湿重荷载来完成该施工阶段分析的程序设定并进行仿真分析。(1) 最大悬臂施工段主梁内力变化。在恒荷载作用下, 主梁支座节点处产生了非常大的负弯矩, 与连续梁桥的结构受力特点相符, 通过不断地增加支点处截面负弯矩值来减少跨中正弯矩来提高桥梁施工的跨越能力, 说明施工过程结构受力合理。具体如图 4 所示(2) 最大悬臂施工段主梁底部应力变化。在恒荷载作用下, 整个桥梁的建设过程主梁结构主体均处在受压状态, 是比较合理的受力状态, 为二期荷载的施加提供很好的承

载能力。根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》第 7.2.8 规定: 预应力混凝土受弯构件, 在预应力和构件自重等施工荷载作用下截面边缘混凝土的法向应力应符合下列规定, 其中施工阶段混凝土强度已达到 90%以上: 压应力 $\sigma_{cc} \leq 0.7f_{ck}$; 其中 f_{ck} 为施工阶段混凝土轴心抗压强度标准值。施工阶段主梁结构下缘最大压应力为 14.13Mpa , 远小于规范值。因此, 施工阶段主梁结构的受力满足规范要求。

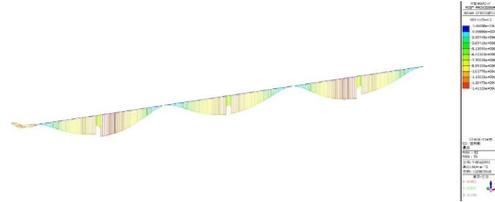


图 4 最大悬臂施工段主梁内力图 (单位 $\text{kN} \cdot \text{m}$)

3.2 成桥阶段温度效应分析

温度是影响主梁挠度的最主要的因素之一。大跨度预应力混凝土连续梁桥施工过程中不可避免地要受到各种环境的影响, 诸如日照温差会直接影响桥梁结构体系的应力分布以及主梁的变形位移。

3.2.1 温度应力分析

在成桥状态下对计算模型运用温度荷载工况中的系统温度和非线性温度梯度分别对季节性温差和日照温差进行模拟计算分析, 系统温度荷载计算中对整桥主梁单元施加整体升温 20°C , 整体降温 20°C 的荷载工况。模拟显示结构整体升温 20°C 作用下, 主梁顶面翼缘应力变化值为 $-1.33 \times 10^{-9} \text{Mpa}$, 对成桥结构应力的影响几乎为零, 可忽略不计; 非线性温度梯度荷载(升温)作用下梁顶面翼缘产生压应力最大值为 -1.64Mpa , 影响较为明显。

3.2.2 温度一位移分析

在相同温度荷载工况下温度的变化对主梁的挠度影响进行了分析。温度荷载工况下主梁挠度变化情况如图 5 所示。

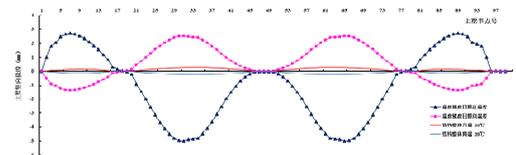


图 5 温度荷载工况下主梁挠度变化图

在模拟温度荷载工况作用影响下, 成桥后结构整体升、降温对主梁的挠度变化几乎没有影响, 但主梁在非线性温度梯度荷载影响下变形较大, 挠度值达到了 5mm 。由现场悬臂施工实测节块高程数据结果来看, 一天中日照温差引起的主梁挠度变化可达 15mm , 对主梁线形影响显著。因桥梁方位、日照时间等随机因素的影响, 结构内外温度存在明显差异, 并且普遍存在。所以在施工过程中要对各工况下温度变化影响进行实时监测, 分析掌握线形变化规律, 采取必要措施来减小线形误差。

4 主梁线形控制

桥梁线形控制是桥梁施工计算和控制的一项重要内容, 在满足结构受力安全的前提下, 必须确保结构的线形满足设计要求。线形控制的具体实施是指在施工过程中主梁的每一个块段, 预先通过模型计算, 综合考虑多种荷载作用下的挠度(恒载、活载及可变荷载等)后得到各个控制点的立模标高, 通过调节模板高程, 达到线形控制的目的。因此, 挠度变化分析是主梁线形控制的关键工作。

4.1 最大悬臂状态主梁挠度分析

悬臂施工过程中主梁会受到诸如自重、预应力及挂篮等荷载的影响,要对各阶段的立模高程进行有效控制就需要对整个施工过程进行分析。

当悬臂施工到 11#节块时为主梁施工最大悬臂状态,是体系转换前的最后阶段,也是结构受力和变形的最大值,施工控制的关键一环,对合龙施工至关重要。其中图 6 为 8#墩主梁施工示意图,以此作为研究对象。



图 6 8#墩主梁最大悬臂段示意图

在相应荷载工况下运行所建分析模型,分别对自重荷载、预应力荷载及合力作用下主梁累计位移变形进行数据分析,

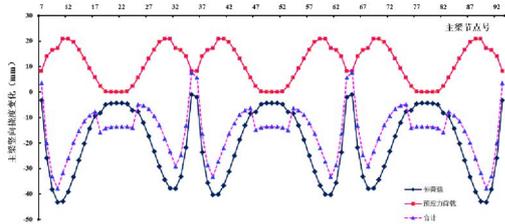


图 7 工况下最大悬臂端主梁竖向挠度变化图

如图 7 所示,施工阶段恒荷载作用下,主梁产生下挠并由墩顶向两侧逐渐增大,最大值达 4.5cm。而最大悬臂端处位移减小,是因为程序的施工过程模拟,对主梁节点的位移是进行累加的,后一阶段梁段对已浇筑梁段位移有影响,所以随着悬臂的伸长,节点位移随之增大,而悬臂端部的梁单元则累计挠度较小。预应力荷载施加使主梁产生上挠,而在主梁综合受力作用下结构的位移整体还是向下的,最大为 3.7cm。桥梁悬臂施工过程中,除了通过预应力张拉力的大小来调整主梁的标高之外,已浇筑的梁段标高是无法更改的,只能通过本阶段标高的变化趋势对下一施工阶段标高进行预测并作出调整,因此需要对节块施工的预拱度进行计算。

4.2 主梁立模标高的确定

在主梁悬臂浇筑过程中,梁段立模标高的合理确定,是关系到主梁的线形是否平顺、是否符合设计的一个重要问题。众所周知,立模标高并不等于设计中桥梁建成后的标高,要设定一定的预拱度,以抵消施工过程中产生的各种变形。箱梁悬臂浇筑各节块的立模标高可按下式确定: $H_i = H_0 + f_i + f_{挂} + f_{修}$, 式中, H_0 为该点设计高程; f_i 为当前节块影响施工的预拱度及剩余预拱度的和; $f_{挂}$ 为挂篮弹性变形值; $f_{修}$ 为立模标高修正值。其中,通过软件分析计算可以得到施工过程及成桥后各阶段位移变化值。悬臂施工前对挂篮进行预压试验,可以得出挂篮弹性变形值。

4.3 现场施工线形控制

全桥理想线形的实现是通过前期的预测和后期调整来实现的,在施工过程中要细化施工监控,精心实施各项量测工作。

4.3.1 挂篮预压

挂篮是悬臂施工时直接的承载结构,自身荷载较大,再加上结构钢筋、混凝土湿重及临时荷载作用,部分结构构件比较容易发生变形,因此需要在悬臂施工前对挂篮进行模拟最大荷载工况的预压试验,消除结构塑性变形,掌握结构弹性变形量,

并在确定立模标高时予以考虑。

4.3.2 高程测点布置

为了保证测点高程的稳定性,在墩柱 0#块临时锚块位置设立高程基准点。每一节段的悬臂施工过程中,都需要对主梁的高程变化进行观测,为状态修正提供依据。为此本桥在主梁桥面纵向布置测点,测试主梁高程在施工过程中的变化值,并在主梁节块前端顶面预埋测点,为立模标高设定提供支持。

4.3.3 合龙段施工

合龙施工是全桥施工的关键,也是线形控制实现的最后工作。为确保合龙的顺利进行,合龙两侧高程误差在满足规范条件下必须进行劲性骨架的锁定,目的是克服梁体温差变化产生的轴向力及相对变位,同时避免因合龙段混凝土作用下产生的弯矩使梁体产生裂缝。结合该在建大桥的实际情况,合龙前对两悬臂端进行温度影响分析,观测主梁悬臂的位移变化量,经过观测分析决定在晚上温度恒定时段进行合龙段混凝土浇筑工作,并确定采用外刚性支撑劲性骨架,通过主梁顶板的预留孔和千斤顶作用装置对合龙梁端主梁进行锁定。

4.3.4 线形监测结果分析

经过对前一施工节块高程偏差的计算分析来对下一施工段的立模标高进行计算修正,以 8#墩 10#节块为例,该段施工立模标高指令如图 8 所示。对称施工各节块循环往复,实现主梁施工的合龙。

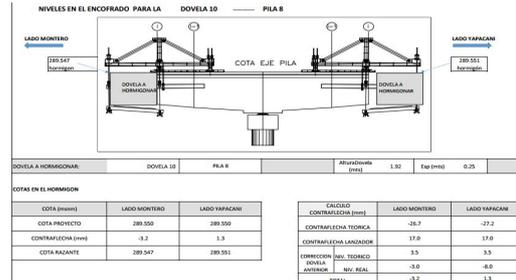


图 8 10#块立模标高指令

随着悬臂段的生长,增大了对线形控制的难度,误差变大,在合龙段处达到峰值。受综合因素影响,如模型计算的精度、测量过程环境及仪器设备情况,使误差产生了累积,局部位置出现了较大偏差。从整体上来看,主梁主体误差控制在 2cm 范围内,主梁合龙后的桥面高程与设计高程吻合较好,主体线形较为平顺。

结语

综上所述,大跨径预应力混凝土连续梁桥结构的受力特点较为复杂,这就要求相关施工单位在施工过程中必须及时掌握各施工阶段结构的受力及位移变化情况,并加强对施工过程结构受力的安全及成桥线形的有效控制,切实保证桥梁施工质量和施工安全。

参考文献:

[1] 赖士谦. 某大跨度连续梁桥施工控制分析[J]. 福建交通科技, 2018, No. 164(05): 59-61+70.
 [2] 朱丹丽. 大跨径连续刚构桥施工过程中的线形监控与应力监控分析[J]. 黑龙江交通科技, 2015, 38(08): 99-100.
 [3] 沈文军. 大跨径预应力连续梁桥线性控制保证应力体系关键技术[J]. 造纸装备及材料, 2021, 50(02): 123-124+133.