

大跨弯坡高刚架桥施工控制分析

范伟 ,石雪飞

(同济大学 桥梁工程系 ,上海 200092)

摘要 介绍自适应控制原理在桥梁工程中的应用。采用结构空间受力分析与工程试验、现场实测相结合的方式 ,通过对大跨曲线梁桥挠度控制影响因素的分析 ,重点阐述了扭转预拱度的设置及桥墩变形对扭转效应的影响 ,并对施工及设计提出一些建议。

关键词 曲线梁 施工控制 扭转预拱度 影响因素

中图分类号 :U448 **文献标识码** :A

0 引言

随着我国高速公路的迅速发展 ,各地修建了大批桥梁。由于地形的不同以及线性的要求 ,其中很大一部分采用了曲线梁桥的型式。相对于直线桥而言 ,曲线梁桥因受弯扭耦合效应的影响 ,其受力更为复杂 ,由此导致其设计及施工上的诸多困难 ,对大跨曲线梁桥采用悬臂浇筑方法而言难度更甚。对于如何确保结构合拢精度、使梁体受力更加合理、保证成桥运营状况下的线形等问题 ,结构状态参数的选取及悬臂浇筑过程中预拱度的设置显得至关重要。本篇结合作者在石崆山Ⅱ号桥现场施工监控体会 ,对大跨弯坡高刚架桥施工控制进行分析 ,就其空间受力情况及影响高墩大跨曲线梁桥施工挠度控制的各种因素进行探讨。

1 工程概况

石崆山Ⅱ号高架桥是漳龙高速公路上连接石崆山Ⅰ号高架桥和建安关高架桥的一座特大桥梁 ,其右线主桥为 $65 + 115 + 155 + 3 \times 115 + 65\text{m}$ 七孔一联变截面预应力砼箱梁连续—刚构组合体系 ,全桥长 749m ,位于半径为 762.115m 的平曲线上($\alpha = 27^\circ 41' 58.4''$, $L_h = 350\text{m}$) ,由漳州向龙岩为 4% 升坡 ,超高横坡变化在 $2\% \sim 3\%$ 之间 ,桥面宽度为 13.75m ,采用单箱单室大悬臂断面 ,跨中梁高 3m ,支点最大梁高 8.5m ,桥梁荷载等级为 :汽超—20 ,挂—120 ,箱梁采用纵、竖双向预应力体系 ;其最大墩高为 80.415m 。该桥具有高墩、陡坡、大跨度曲线箱梁的结构特殊性。最大跨径 155m ,采用挂篮悬臂浇筑施工方法 ,规模为国内同类桥梁之最。由于跨径不等 ,第 2、3、4、6 号墩均有部分节段需采用不对称悬浇施工 ,另外第 5、6 号墩合拢后尚需体系转换后再进行全桥合拢 ,这些都给施工及控制带来了相当的难度。

2 控制原理

该桥采用自适应施工控制方法。众所周知,在施工过程中钢筋混凝土弹性模量、挂篮变形、预应力摩擦系数等与初期理论计算的取值都会有一等程度的差异,这种差异导致理论模型与工程实际不相符合,影响施工预拱度值的设置,给挠度控制带来困难。自适应施工控制方法较好地解决了这个问题。图1为自适应施工控制原理图。

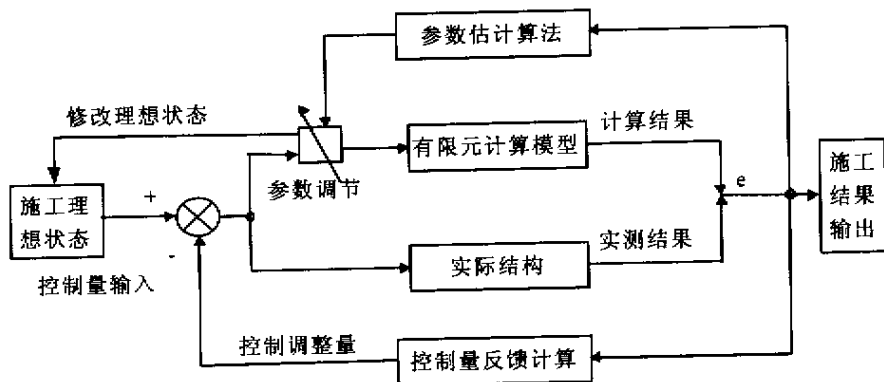


图1 自适应施工控制基本原理

该控制方法先对理想状态下的结构进行计算,给出结构初始施工节段的施工控制值以指导施工,然后对结构已完成节段进行测量,当得到的受力状态与模型计算结果不相符时,将误差输入到参数辨识算法中去修正计算模型的参数,得到经过修正的参数后,再重新计算各施工阶段的理想状态,经过几个工况的反复辨识,计算模型就基本上与实际结构相一致,从而可以对施工状态进行更好的控制。

从原理图中我们也可看出,已完成梁段的误差无法调整,而未完成梁段的施工标高只与正确模拟计算有关,与已完成梁段的误差基本无关,这是悬臂浇筑施工中挠度控制的特点。因此,在图1自适应施工控制原理图中的下半环,即控制量反馈计算,在施工控制中一般不起作用。同时,上半环,即参数估计及对计算模型的修正就显得尤为重要,只有与实际施工过程相吻合的计算模型计算出的施工标高才是可实现的。据此得出如图2所示施工控制框图。

实际控制过程主要是通过计算施工挠度,最终给出施工标高而实现的。

(1) 曲线桥悬臂端施工挠度:

$$f = f_a + f_b + f_c \quad (1)$$

式中: f_a 为已完成结构的累计变形(涉及混凝土收缩、徐变以及预应力等效效应); f_b 为施工节段和挂篮自重作用在已完成节段上引起的结构变形及本节段预应力变形; f_c 为施工节段自重及挂篮自重引起的挂篮变形。

(2) 施工标高设置

施工标高设置指针/对节段悬臂施工挠度设置预拱度,即提供挂篮定位标高,使得阶段施工完毕、挠度产生后结构变形到预定位置,从而使桥梁竣工时线形与设计相一致。

挂篮定位标高:

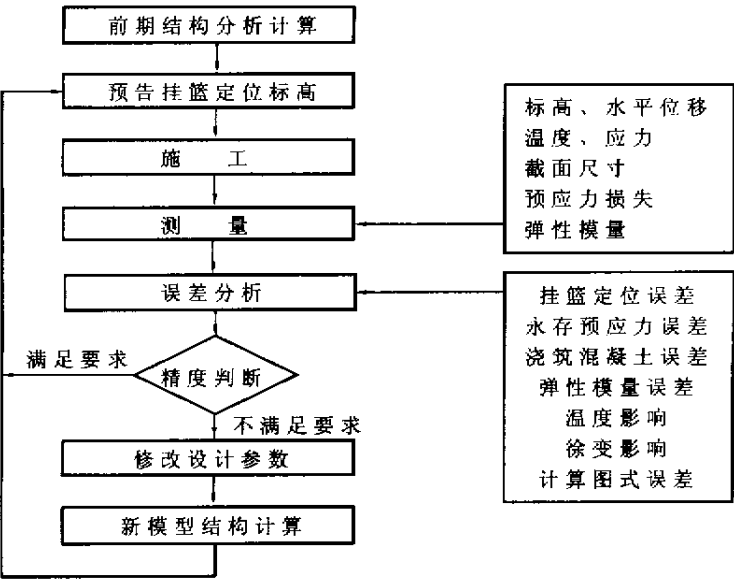


图2 施工控制框图

$$h = h_a + h_b + h_c \tag{2}$$

其中： h_a 为标高设计值； h_b 为结构变位预拱度； h_c 为挂篮变形预拱度。

3 挠度控制过程

在石崆山Ⅱ号右线高架桥挠度控制中,采用同济大学空间杆系分析程序“桥梁博士”系统进行模拟计算,在混凝土每一施工节段上设立梁底标高控制点,并引测到顶板设立梁顶标高控制点,这样浇筑后续节段时就可以由梁顶控制点的标高推算相应的梁底标高,从而对梁底线形进行有效控制。施工控制过程见图3。悬臂浇筑每节段施工的挠度控制包括三个关键工况的标高控制:挂篮定位标高控制,混凝土浇筑后标高测量,预应力张拉后标高测量。

(1) 挂篮定位标高控制

挂篮前移定位标高由结构成型的设计标高和预拱度组成。定位标高是控制结构线形的关键内容,故在挂篮定位过程中,应紧固挂篮,确保定位标高的准确。

(2) 混凝土浇筑后标高测量

混凝土浇筑后对已建立控制点标高进行测量,校核已建结构状态,修正计算参数,调整已建结构标高的理论计算值,调整、优化成桥线形,得到待浇梁段的施工标高。

(3) 预应力张拉后标高

对预应力张拉后结构测点标高进行测量,对比实测值与理论计算值的差异,确定预应力模拟是否恰当,调整预应力模拟参数,使理论计算与工程实际相符合。

除高墩大跨曲线梁悬浇这一难点外,石崆山Ⅱ号右线高架桥施工的另一难点是不对称浇筑混凝土,如图3中所示。对称浇筑时,T构悬臂端位移主要由悬臂自身结构变形及施工荷载产生的位移组成,桥墩主要发生竖向压缩变形及少许横向变形(曲线桥),顺桥向尚能保持竖

直。不对称浇筑时,由于墩身较高较柔,势必引起T构墩身顺桥向侧倾,这种墩身变形产生转角引起的悬臂端位移与悬臂长成正比,较大的悬臂端位移给施工及控制带来极大不便。虽然设计采用加平衡重的方法以减少不对称浇筑影响,右2、3号墩第19号块浇筑后产生的变形仍有23.6cm(不含挂篮变形),而右线第六跨解除约束转换体系后在第6号墩浇筑第14号块时实测变形达到了29.6cm,这在视觉上是很惊人的,而且对梁体的受力也不利。变形主要是由不对称浇筑引起的,另外平衡重的数量及作用位置偏差也是部分原因。实际施工控制中采取平衡重分级加载、等弯矩补充数量等方法来调整标高,减少其不利影响,确保结构受力安全,获得良好效果。

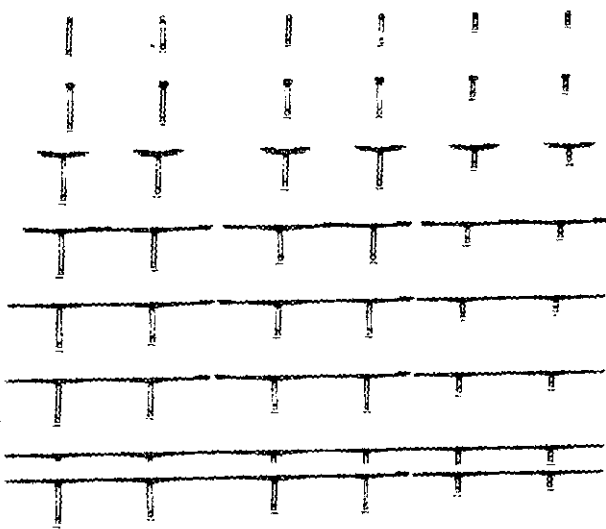


图3 施工顺序图

4 影响挠度控制的因素

(1) 预拱度

在桥梁挠度施工控制中,预拱度的设置起着重要作用。现对于直线桥而言,由于弯扭耦合效应,曲线梁桥悬臂施工时箱梁截面产生扭转,当扭转角过大,即箱梁截面左右挠度差值不能忽略时,须设置扭转预拱度。空间受力分析过程中,采用有限元空间分析程序ALGOR对该桥进行模拟分析,取右线3号墩T构,箱梁结构采用板单元模拟,桥墩结构使用梁单元模拟,模型见图4。分析结果显示,影响预拱度的因素有以下几点:

a 曲率

恒载作用下,箱梁梁体向内扭转。计入墩高作用时(即全T构)的悬臂端最大扭转角为 0.078° ,内外弧高差1.86cm,T构中最大扭转角出现在1/4跨处,为 0.086° 。不计墩高作用时(指将悬臂根部梁底截面直接固接)的悬臂端最大扭转角仅有 0.018° ,内外弧高差0.4cm,T构中最大扭转角也出现在1/4跨处,为 0.026° (图5)。扭转角除桥墩处较小外,沿桥纵向基本保持稳定,其趋势可从图6曲线中看出。恒载扭转效应如此之小跟该桥最小半径762.115m相对较大,圆心角 $\Phi = 11.653^\circ < 30^\circ$,即曲率小有关。

b 墩高

根据空间分析结果图5、7、8来看,墩高对曲线箱梁扭转偏角影响很大,梁截面扭转角计入桥墩影响时的值比不计入桥墩作用的值大 0.06° 左右,内、外弧挠度差的差值也只有1.46cm。简而言之,由于桥墩墩身变形,高墩曲线梁桥抗扭桥墩引起的曲线箱梁扭转效应较之单纯曲率

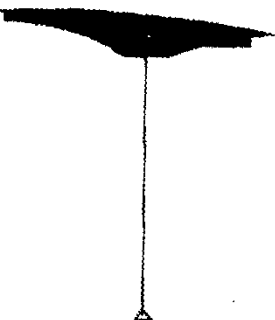


图4 最大悬臂模型图

引起的扭转效应要大得多,桥墩变形所产生的扭转变形是扭转变形中的主要部分,这在横桥向墩顶位移中亦有体现,其值为向内 4.3 cm,远比不计桥墩作用时的 0.41cm 来得大。其绝对值若从工程角度来说并不大,但随着曲率的增大,其作用应引起设计及施工的注意,并在施工中通过墩顶位移的测量来考虑其部分影响。

c 预应力

预应力产生的扭转效应由于涉及到多种因素,虽然目前已有许多理论上的推导,但仍有许多问题有待解决。从施工情况看,预应力整体效应比理论值小,其扭转效应甚微。

(2) 挂篮变形

施工预拱度中的初始挂篮变形一般是由施工单位预压试验得到,随着施工进度以已完成节段的实测数据为基础进行调整。由于挂篮多为螺栓连接的钢结构,连接较松或较紧造成挂篮变形的差距很大,其紧固程度直接影响到挠度控制。同其它因素相比,挂篮变形对现场挠度施工控制的影响比较大,故施工中挂篮紧固程度应确保一致。

(3) 温度

当 T 构悬臂较长的时候,混凝土随温度变化相应伸缩,造成悬臂端的挠度变化,对挠度控制的影响非常明显,直接影响到桥梁的合拢精度。从施工现场的

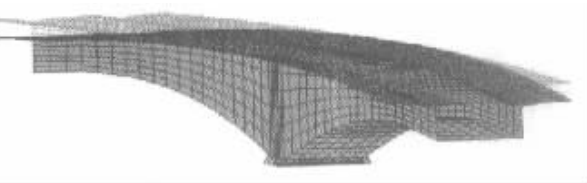


图 5 不计桥墩作用时箱梁悬臂恒载变形对照图
(图中虚线为结构设计图)

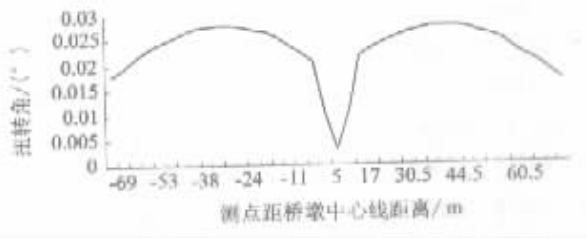


图 6 扭转角与悬臂长关系图

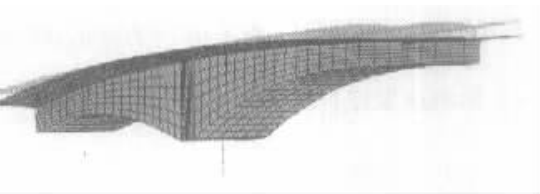


图 7 计入桥墩作用时箱梁悬臂恒载变形对照图
(图中虚线为结构设计图)

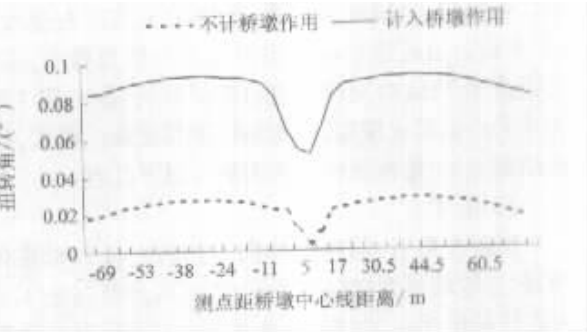


图 8 桥墩对扭转角的影响

表 1 施工现场温度统计

时间	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	24:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00
温度	27.0	29.0	36.0	35.5	35.0	30.0	25.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0	26.0
测点 A	3.239	3.239	3.237	3.230	3.222	3.219	3.222	3.222	3.224	3.224	3.225	3.226	3.227	3.227	3.228	3.229
测点 B	6.346	6.342	6.335	6.333	6.338	6.344	6.349	6.352	6.354	6.355	6.357	6.358	6.358	6.359	6.359	6.359

注:表中测点 A、B 指左 1 墩 漳州与龙岩方向最大悬臂处中桩相对高程。时间 6 月 29 日~30 日。

温度统计数据表 1 来看,其左线 1 号墩最大悬臂(40m)状态时,一天中的温差对悬臂端的挠度影响最大达到了 2.6cm,对于悬臂更长的右线桥来说其效应显然会更大。为尽量减少温度效应,控制过程中要求施工单位混凝土浇筑后和预应力张拉后的测量工作均在清晨温度较低时进行,而挂篮定位采用相对标高定位,从而避免了温差效应。

另外,影响挠度控制的因素还有混凝土弹性模量、收缩徐变、预应力管道局部偏差及摩擦系数、模板变形、节段混凝土重量偏差、平衡压载重心及数量偏差、标高测量误差等等,前人论述较多,在此不再赘述。

5 结语

(1) 正确建立理论计算模型,综合考虑影响扭转预拱度的各种因素,合理设置预拱度是大跨弯坡刚构桥挠度控制的基础。

(2) 确保挂篮变形的稳定是现场施工挠度控制的关键。

(3) 除曲率外,墩高是影响曲线梁桥扭转变形的另一主要因素。对于高墩,设计中应酌情考虑其影响。

(4) 尽量避免不对称施工,以使墩身竖直,确保结构受力安全,减少施工困难,提高控制精度。

参考文献:

- [1] 姚玲森. 曲线梁桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 1989.
- [2] 石雪飞. 斜拉桥结构参数估计及施工控制系统[D]. 上海: 同济大学, 1999.

Analysis of long span curved high rigid-frame bridge construction control

FAN Wei, SHI Xue-fei

(Dept. of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This paper introduces the application of self-adaptive control on engineering. The influence factors of long span curved girder bridge deflection control are analyzed by the means of combining space analysis with engineering test and construction site survey. The torsion counter-camber setting and the influence of bridge pier deformation on torsion effect are elucidated primarily and some advice is given for construction and design.

Key Words: curved bridge; construction control; torsion counter-camber; influence factors