

广珠西线珠江大桥的施工控制

王卫锋¹, 苏堪祥², 颜全胜¹, 李 静¹

(1. 华南理工大学交通学院 广州市 510640; 2. 广东省公路建设有限公司 广州市 510600)

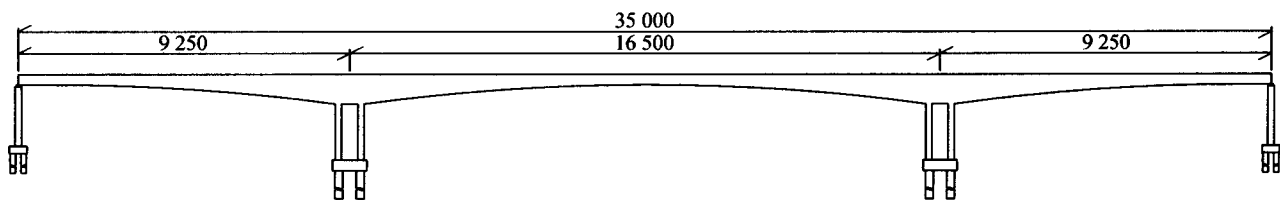
摘 要: 采用先按规范和设计图纸取值计算桥梁结构理想状态,后根据实测结果进行参数识别修正模型参数的方法,较好地预测施工阶段的立模标高。采用相对立模标高较好地解决了温度变化对主梁标高的影响。此方法应用于珠江大桥的监控过程中,确保了合拢精度,使成桥后的结构线形和内力满足设计要求。

关键词: 珠江大桥; 参数识别; 相对立模标高; 施工控制; 温度影响

1 工程概况

广珠西线珠江大桥是广州~珠海(西线)高速公路的一座大型桥梁。珠江大桥的设计荷载为汽车—超 20 级,挂车—120,按双向六车道设计。珠江大桥主桥为 3 孔三向预应力混凝土连续刚构,全长 350 m,跨径组合为 92.5 m+165 m+92.5 m,如图 1 所示。上部结构位于半径为 6 500 m 的凸形竖曲线和左转半径为 4 100 m 的平面曲线内。箱梁各梁段均为径向线,箱梁腹板、悬臂板外缘线均为圆弧线。

主桥按上下行分幅布置,采用单箱单室断面,箱梁顶宽为 16 m,底宽 8.8 m,顶板厚 28 cm。箱梁梁高及底板厚度均按 1.75 次方抛物线变化,梁高由根部的 8.5 m 变化到跨中的 3.0 m,底板厚度由根部的 120 cm 变化到跨中的 30 cm。箱梁腹板厚度是从 75 cm 渐变至 60 cm,在渐变梁段梁肋厚度沿腹板内侧按直线过渡。珠江大桥采用挂篮平衡式悬臂现浇施工,主桥单幅共有梁段 87 个,其中采用落地支架现浇的梁段有 8 个,合拢梁段 3 个,悬臂现浇施工的梁段有 76 个。



单位:cm

图 1 珠江大桥立面

2 珠江大桥施工监控内容

根据珠江大桥结构和施工方法的特点,大桥施工监控的工作内容主要包括:(1)施工过程的仿真计算;(2)施工过程的现场测量;(3)施工过程的参数识别;(4)施工过程的标高预测与调整。

3 珠江大桥施工监控的仿真计算

由于道路线形的制约,大部分连续刚构桥梁处在各种曲线上。但曲线梁的夹角小于 30°时,曲率

对弯矩和剪力的影响可以忽略,又因为连续刚构桥梁多采用箱形梁,具有很强的抗扭刚度,所以可以采用平面杆系进行分析。由连续刚构桥施工的特点,采用正装分析法分析较为适合。此种方法便于考虑与结构形成历程有关的因素,如混凝土的收缩、徐变等。

在仿真计算时,可以将上部结构简化为平面结构,采用平面杆系程序分析。结构的离散除在墩顶受力复杂处布置了测点的截面及薄壁墩外,其余都按

主梁施工梁段划分,共划分为 124 个结点,119 个单元,其中有 103 个主梁单元,16 个墩单元。施工过程中的支架模拟为临时支座,主梁与墩的连接采用主从节点处理。

根据连续刚构桥的施工特点,对已经完成节段的误差是无法调整的,而未完成节段的状态与精确的仿真计算有关,与已完成的节段的误差无关。这就决定连续刚构桥的施工控制应重在预测,即准确给定梁端的立模标高。首先,假定结构处于理想状态,各种结构参数分别按规范或设计图纸取值,给出理想状态下的预抛高以指导上部结构的施工。对已完成的节段进行应力和标高的测量,当得到的测量标高和测量应力与计算值不符合时,分析可能产生误差的原因,对一些重要的参数进行识别,得到修正的结构参数,重新计算各施工节段的理想状态。

经过计算,发现珠江大桥成桥阶段原设计跨中底板应力储备不足,并发文向业主和设计单位反映。由设计单位作出设计变更,把跨中底板预应力束由 19 ϕ 15.24 钢绞线变更为 22 ϕ 15.24。

4 珠江大桥施工监控的参数识别

现行公路桥梁设计规范不能直接考虑混凝土的配合比和强度等级。在珠江大桥的分析过程中,我们对弹性模量和收缩系数进行了修正。在施工悬臂 0 号块时,同时制作了 3 块弹性模量试块,标准养护 28 d 后测试弹性模量,取弹性模量的平均值作为修正值。浇注 1 号块时制作了一条 150 cm \times 15 cm \times 15 cm 的小梁,在其中埋设了无应力计,用电脑采集系统采集无应力计的应变,对收缩系数进行了修正。

徐变系数的识别采用在主梁中性轴处埋设应变计,利用主梁中性轴应力只与预应力有关,中性轴的应力可以利用预应力束张拉前后的应变直接测量,而与主梁重量无关的特点来识别徐变系数,具体流程如图 2 所示。

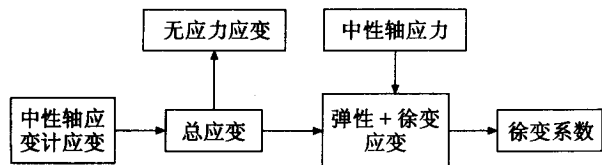


图 2 徐变系数识别流程

影响主梁标高的因素包括主梁节段重量、混凝土弹性模量、混凝土收缩徐变系数以及施工荷载等。其中混凝土弹性模量可以通过弹性模量试验获取,

混凝土收缩徐变系数在应力测试中可以较好地识别出来,而施工荷载在进入主梁标准节段施工后基本不变,较容易把握。剩下的主梁节段重量则由于混凝土浇注量和混凝土容重的精确度较难把握,需要通过理论识别获取。此外,通过灵敏度分析可以发现,主梁节段重量对主梁标高的影响程度远比混凝土弹性模量、混凝土收缩徐变系数的影响大,因此主梁节段重量的识别就显得尤为重要。由于浇注混凝土过程中存在涨模等因素的影响,因此主梁节段难免会超重。珠江大桥主梁超重识别的方法如下:

- (1) 通过理论分析,获得主梁每节段施工完毕后引起的主梁前端头 5 个节段主梁标高的理论增量值;
- (2) 通过现场实测,获得上述量值的实测增量值;
- (3) 据此获得相应量值的增量偏差;
- (4) 通过节段重量的影响矩阵,识别出当前节段的超重;
- (5) 主梁的平均超重,可以通过对各节段的超重作平均获得;
- (6) 利用当前各应力测量断面上下缘应力实测差值进行微调,得出较准确的主梁超重量。

由此可见,在主梁超重识别过程中,综合利用了主梁标高测量以及应力测量的成果。识别结果表明,珠江大桥主梁节段普遍超重,超重幅度为 0.6%~1.8%。上述主梁节段重量识别是逐段进行的,每节段的重量识别仅依赖短时间内获取的实测数据,这样就可以完全避开混凝土收缩徐变等不确定时间效应的影响。主梁节段重量识别出来以后,结合阶段性全桥实测应力,即可识别出相应的主梁内力(应力)来评估主梁内力状态。

5 立模标高的确立与调整

大跨径连续刚构桥的成桥线形和合拢精度,主要取决于施工过程中梁段挠度的控制。梁段的前端挠度是考虑了挂篮变形、梁段自重、预应力大小、施工荷载、结构体系转换、混凝土收缩徐变、日照和季节温差等因素后计算求得,并且以梁段前端立模标高的形式给定。

箱梁各悬浇梁段的前端立模标高为:

$$H_i = H_0 + f_i + f_{\epsilon} + f_x \quad (1)$$

式中: H_i 为待浇梁段前端底板处挂篮底盘模板标高; H_0 为该点设计标高; f_i 为本梁段及以后各梁段对该点的挠度影响值; f_{ϵ} 为挂篮弹性变形对该点的影响值(在挂篮加载试压后得出); f_x 为由混凝土

收缩徐变、日照及季节温度变化、结构体系转换、二期恒载、活载的一半等因素对该点挠度影响值。

悬臂端施工挠度为：

$$f = f_a + f_b + f_c \quad (2)$$

式中： f_a 为已完成结构的累计变形（涉及混凝土的收缩、徐变和预应力等效应）； 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； f_c 为施工节段和挂篮自重引起的挂篮变形。

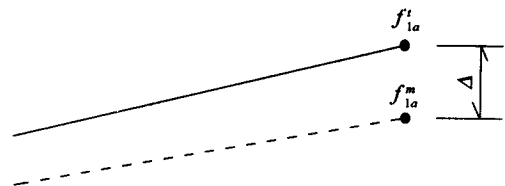
按照参数识别，对一些重要的参数进行识别，得到修正的结构参数，重新进行计算各施工节段的理想状态，就可以对理想状态的立模标高进行预测和调整。修正的预拱度从 6 号块开始采用。

6 温度影响及相对立模标高的确立

在珠江大桥的施工过程中，主梁前端标高会受到主梁温度梯度的影响。在进入主梁长悬臂施工阶段后，主梁前端标高受温度影响在一天当中有相当可观的变化幅度。以番禺岸主梁中跨 13 号节段为例，该节段的立模在下午进行，当时阳光猛烈，温度较高，立模标高为 24.226 m。第二天清晨复测时，该标高值变为 24.247 m，绝对标高上升将近 21 mm。由于结构实际温度场很难在每个立模时刻都准确知道，因此由温度导致主梁前端标高的变化就难以通过理论计算获取。考虑到主梁每个节段的长度较短，可以认为在不同温度场下主梁前端前后两个节段的标高差保持不变，因此立模时只需先测出前一节段的实际标高，再叠加上设计温度场下前后两个节段的标高差，即可得到考虑温度影响效应的主梁立模标高。为保证立模标高的可靠性，应在接近设计温度场情况下（第二天清晨）进行复测，以便进一步核准。

采用相对法立模时主梁立模标高的确定，分别考虑以下 3 个工况：

工况 a：如图 3 所示，设计温度条件下，浇注完上一节段混凝土，预应力束未张拉，挂篮未前移。



f_{1a}^t 为工况 a 上一节段 (1) 前端标高理论值
 f_{1a}^m 为工况 a 上一节段 (1) 前端标高实测值

图 3 相对立模标高工况 a

由图 3 可知，上一节段的标高施工误差 $\Delta = f_{1a}^t - f_{1a}^m$ 。

工况 b：如图 4 所示，设计温度条件下，浇注完上一节段混凝土，预应力束已经张拉，挂篮已经前移。

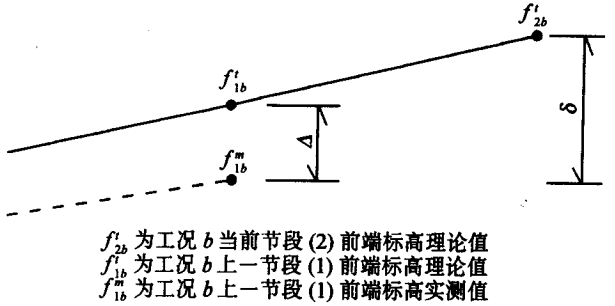


图 4 相对立模标高工况 b

假定预应力束张拉和挂篮前移后，上一节段标高施工误差不变，即：

$$f_{1b}^t - f_{1b}^m = f_{1a}^t - f_{1a}^m = \Delta$$

由图 4 可知，主梁前端前后两个节段标高差的计算公式为：

$$\begin{aligned} \delta &= f_{2b}^t - f_{1b}^m \\ &= f_{2b}^t - f_{1b}^t + \Delta \\ &= f_{2b}^t - f_{1b}^t + f_{1a}^t - f_{1a}^m \end{aligned} \quad (3)$$

式中： $f_{1b}^t = 1$ 处的成桥标高 + 1 处的预拱度 — 由上一节段施工（浇注混凝土、张拉预应力束）和挂篮前移引起的挠度； $f_{2b}^t = 2$ 处的成桥标高 + 2 处的预拱度。

工况 c：如图 5 所示，实际温度条件下，浇注完上一节段混凝土，预应力束已经张拉，挂篮已经前移。

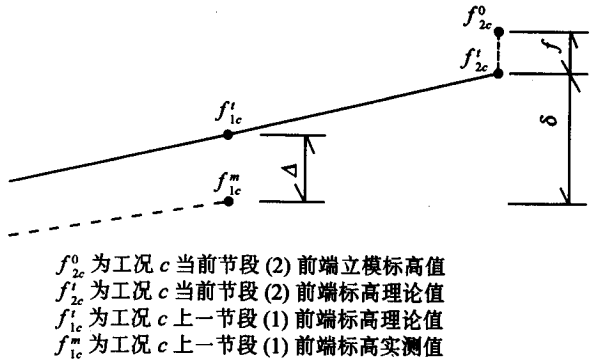


图 5 相对立模标高工况 c

假定不同的温度场，主梁前后两个节段的标高差保持不变，即：

$$f_{2c}^t - f_{1c}^m = f_{2b}^t - f_{1b}^m = \delta$$

由图 5 可知,采用相对法立模时,主梁立模标高的计算公式为:

$$f_{2c}^0 = f_{1c}^m + \delta + \epsilon \quad (4)$$

式中: δ 可由式(3)求得; ϵ 为挂篮在自重和当前节段混凝土重量作用下的自身变形,由施工单位确定,向下为正,向上为负。

7 珠江大桥施工控制的成果

按照上述介绍的方法,对珠江大桥整个施工过程的桥面标高进行监控,理论计算与实测结果符合较好,取得了良好的效果,为珠江大桥高精度合拢和主梁线形平顺提供了有力的技术保证。

(1) 边跨与中跨合拢精度。

珠江大桥边跨合拢精度和中跨合拢精度见表 1,左幅边跨合拢精度为 5 mm 和 -3 mm,右幅边跨合拢精度为 8 mm 和 5 mm;左幅中跨合拢精度为 9 mm,右幅中跨合拢精度为 7 mm。中跨合拢段实测标高与理论计算标高的偏差左幅最大为 1.3 cm,右幅最大为 1.1 cm。合拢处标高偏差控制在 ± 20 mm 范围内,完全达到设计要求。

表 1 珠江大桥合拢精度 mm

| 位置 | | 主梁边跨 | | 主梁中跨 | |
|----|-----|------|------|------|------|
| | | 合拢精度 | 标高偏差 | 合拢精度 | 标高偏差 |
| 左幅 | 广州侧 | 5 | 10 | 9 | 13 |
| | 南海侧 | -3 | 7 | | 4 |
| 右幅 | 广州侧 | 5 | 8 | 7 | 4 |
| | 南海侧 | 8 | 6 | | 11 |

(2) 线形平顺满足设计要求。

珠江大桥施工控制有效地保证了珠江大桥施工的顺利进行,各节段标高偏差完全控制在 ± 2 cm 内。没有出现明显的折点现象,主梁线形平顺,合拢后线形优美,如图 6 所示。

8 结论

(1) 在珠江大桥施工监控中,采用了结果参数先按规范和设计取值,取实测完成节段的弹性模量和

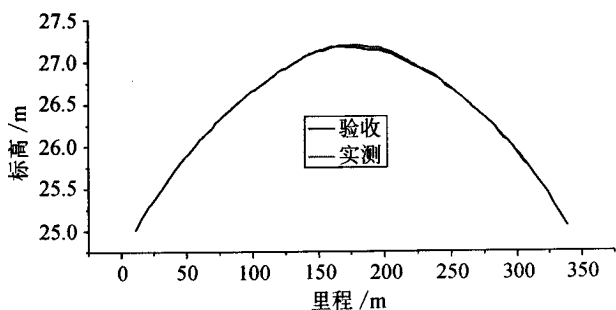


图 6 左幅实测和验收标高比较

收缩系数,以及通过实测对徐变系数和主梁节段重量误差进行参数识别,来修正计算模型参数的方法,使计算模型与实际结构相符合,从而更好地预测了施工的立模标高。

(2) 为避免温度影响,在长悬臂节段采用相对法立模,可以有效地加快施工进度,同时也是确保标高控制的重要手段。

(3) 监控单位针对整个施工过程及有关影响因素,进行了详尽的模拟计算,同时连续监测大桥施工过程的结构响应,在此基础上及时识别有关参数并提出有效的调整措施,为大桥的高质量、高速度施工提供了强有力的技术保证。实践表明,在珠江大桥施工监控过程中所采用的技术流程与管理流程具有很强的实用性,为大桥的成功修建起了关键的作用。

参考文献:

- [1] 向木生,等. 大跨度预应力混凝土桥梁监测监控技术研究[J]. 公路交通科技,2002,(4).
- [2] 林智敏. 桥梁施工控制中的参数识别方法研究[J]. 四川建筑,2004,(6).
- [3] 许润平. 大跨度曲线连续刚构桥施工控制分析[J]. 铁道建筑技术,2003,(4).
- [4] 韩大建,苏成,邓江. 崖门大桥施工过程的参数识别与调整措施[J]. 桥梁建设,2003,(1).
- [5] 苏成,徐郁峰,邓江. 崖门大桥施工过程中温度影响的分析、实测与补偿[J]. 桥梁建设,2003,(1).
- [6] 华南理工大学. 广珠西线珠江特大桥预应力连续刚构总结报告[R]. 2004.