

[文章编号] 1003-4684(2020)05-0117-04

# 舍里甲大桥施工控制分析

白应华, 杨启萌, 余天庆

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

**[摘要]** 为保证舍里甲大桥成桥后和施工过程中桥梁的线形以及受力状态符合设计要求,利用有限元软件 Midas/Civil 建立全桥模型,通过影响矩阵法等方法。对桥梁施工过程中的线形、应力和索力进行施工控制,并将施工过程中得到的实测值与有限元软件的计算值进行对比分析。结果表明:拱肋、主梁的线形和应力与设计值吻合良好,数值在合理范围内;吊杆索力大小分布均匀,索力实测值与计算值的误差在设计允许的范围,达到了良好的控制效果,为今后同类桥梁施工提供有效参考。

**[关键词]** 公路桥梁; 施工控制; 数值计算; 系杆拱桥

**[中图分类号]** TU997 **[文献标识码]** A

随着我国经济的迅速发展,基础建设的步伐越来越快。其中桥梁建设是我国基础建设过程中不可或缺的一份子。系杆拱桥因其优美的造型和良好的力学性能,得到越来越多建设者的青睐<sup>[1-3]</sup>。随着桥梁跨度的增加,桥梁施工控制的应用在桥梁建设中越来越广泛,主跨跨度为 200 m 的上海柳港大桥是成功应用施工控制方法的典型案例<sup>[4]</sup>。近年来,有很多学者对拱桥的施工控制进行了研究:杜森<sup>[5]</sup>以捞刀河大桥为例研究了复式钢箱中承式拱桥的施工受力;杜海龙等<sup>[6]</sup>研究了超大跨径拱桥的施工控制方法;刘俊杰<sup>[7]</sup>对大跨度拱桥吊杆张拉施工技术进行了研究。但是由于不同桥梁的造型和建设环境的不同,使桥梁具有独特性,所以目前施工控制在大跨度桥梁的应用还需完善。成熟的施工控制经验和监测手段是保障桥梁建设安全性和成桥合理性的关键。

## 1 工程概况

舍里甲大桥为钢结构下承式钢箱拱桥,位于南昌市经开区,主桥全长 120 m,主梁由正交异性板钢箱梁构成,钢拱肋采用二次抛物线作为拱肋线形,拱顶预拱度设为 45 mm。舍里甲大桥主梁采用双箱单室钢箱梁,梁顶宽 33.5 m,支座处中心梁高 3.5 m。采用顺桥向单吊杆体系,预应力钢绞线吊杆顺桥向和横向吊杆间距分别为 4 m 和 0.5 m。8 组预应力钢绞线系杆布置于主跨钢梁内和拱脚处。拱

肋、钢箱梁先在工厂通过分阶段预制后,沿横断面分块进行运输,然后在现场通过吊装,吊装至临时墩进行拼装。舍里甲大桥拱肋梁采用支架架设的施工方案进行拼装,保证成桥后的线形与设计线形相吻合。吊杆抗拉强度为 1860 MPa,钢结构主桥材质为 Q345D。

## 2 施工控制方法

施工控制方法是在提出理想状态下的施工阶段控制参数后,结合施工过程中得到的实测数据,对结构计算影响较大的设计参数进行研究分析。依据设计要求,采取合适的方法对桥梁施工过程中所需要的控制量进行预测和监测,指导桥梁施工过程,保证最后成桥状态满足设计要求。

## 3 有限元计算

### 3.1 有限元建模

使用 MIDAS/Civil 建立舍里甲大桥的全桥模型,运用梁格法<sup>[8]</sup>建模。空间梁单元考虑了截面剪切变形对结构受力的影响,主拱圈和主梁都用该梁单元模拟计算,采用桁架单元对吊杆和系杆进行模拟,全桥共划分 1115 个单元。支座与主梁通过弹性连接的方式进行连接,对施工过程中主梁支撑与拱肋支架通过在桥面节点处设置节点弹性支承进行模拟,利用 MIDAS/Civil 的激活与钝化功能实现主梁支撑与拱肋支架的搭设与拆除的模拟,吊杆合理成

[收稿日期] 2020-4-15

[第一作者] 白应华(1975-),男,湖北应城人,湖北工业大学副教授,研究方向为新型混凝土材料与结构

[通信作者] 杨启萌(1995-),男,湖北天门人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为结构工程

桥索力通过 MIDAS/Civil 自带的未知荷载系数法求得,吊杆索力以初拉力的形式施加。图 1 为舍里甲大桥有限元模型。

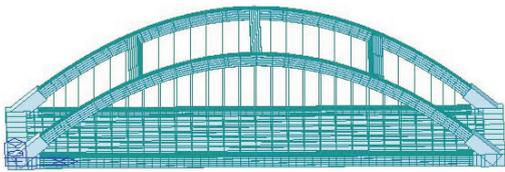


图 1 舍里甲大桥有限元模型

### 3.2 有限元计算结果分析

选取成桥阶段有限元计算结果进行分析研究。

1)位移由图 2 成桥阶段的桥梁竖向位移图所示,拱肋在拱顶处产生向下最大位移,位移值为 19.5 mm。主梁边纵梁跨中处发生最大的向上竖向位移,位移值为 56.9 mm。

2)应力由图 3 成桥阶段的应力图可知,拱肋轴向最大压应力为 59.4 MPa,主梁最大拉应力为 69 MPa。

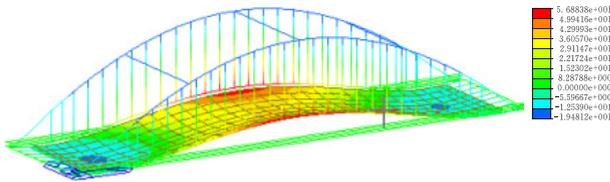


图 2 成桥阶段竖向位移

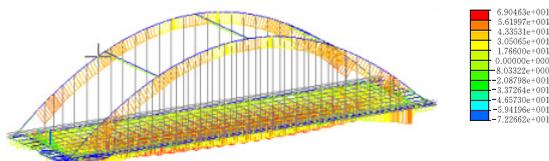


图 3 成桥阶段应力

## 4 施工控制内容

### 4.1 拱肋线形控制

为减小拱肋线形误差,拱肋通过在工厂预制后运送到施工现场,并通过支架法进行拼装。在施工过程中,为保证拱肋的施工线形与计算线形的误差在设计允许范围之内,在拱肋节段接头位置处顶面内边缘的布置测点,通过全站仪对拱肋标高和拼装轴线进行监测并获得实时的监控数据。拱肋拼装现场如图 4 所示。

这里拱肋的施工预拱度的设置考虑拱顶处的预拱度值,按二次抛物线分配法<sup>[9]</sup>进行分配。由二次

$$F_0 = [819.5 \ 407.2 \ 404.8 \ 530.4 \ 535.4 \ 535.5 \ 526.4 \ 525.3 \ 528.2 \ 525.2 \ 527.2 \ 527.7 \ 531.2]$$

当模型计算不计二期重量和自重时,给吊杆 1 单位力,在 Midas/Civil 中得到吊杆 1 单独作用时对其他吊杆的影响量,记为  $A_1 = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{14}]$ ,同理可得其他吊杆单独作用时的影响量,则该桥索力调整的

抛物线分配法计算拱顶总挠度  $\delta$  为

$$\delta = \delta_1 + \delta_2$$

其中: $\delta_1$  为恒载挠度, $\delta_2$  为 1/2 活载挠度



图 4 拱肋安装现场图

通过有限元计算得到挠度  $\delta_1 = 19.5 \text{ mm}$ ,  $\delta_2 = 11.1 \text{ mm}$ 。由二次抛物线分配法计算抛物线方程为

$$y = -\frac{17}{2000}(x - 60)^2 + 30.6$$

得到预拱度曲线如图 5 所示。

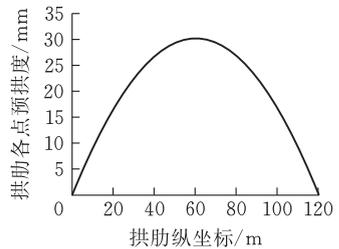


图 5 拱肋曲线各点预拱度

拱肋线形的控制在设计曲线的基础上,加上各点的预拱度进行搭设,在施工过程中监控各点线形变化,保证最后成桥线形满足设计要求。

### 4.2 应力控制

系杆拱桥施工过程复杂,及时、准确了解施工过程中主梁和拱肋应力变化,不仅可以起到安全预警的作用,同时可以对理论进行校核,为施工控制提供依据。通过无线采集系统进行应力监测,该监测系统解决了传统人工巡检应力测试工作量大、测试周期长等缺点,扩展了应力测试的领域。同时,应力监测时记录气温、桥面特殊施工荷载等因素,为理论设计优化与预测提供更加准确的数据。

### 4.3 吊杆索力控制

吊杆索力是桥梁设计中的重要参数,主梁的线形和主梁内力分布可以直接被索力大小影响。利用影响矩阵法<sup>[10]</sup>进行吊杆索力控制,首先在模型中只进行吊杆安装,而不进行张拉,在二期和恒载作用下求得 1—14 吊杆索力:

影响矩阵为

$$A = [A_1 \ A_2 \ \dots \ A_n]^T$$

该桥设计索力为  $[F]$ , 则得到受调向量

$$D = F - F_0 \tag{1}$$

$$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{A}^{-1} \boldsymbol{D} \quad (2)$$

由联立公式(1)(2)可得吊杆张拉力  $\boldsymbol{x}$  ,将得到的吊杆张拉力按施工阶段施加在吊杆中,得到两次吊杆控制索力,如表 1 所示给出部分索力控制值。

表 1 部分吊杆张拉控制索力 kN

吊杆编号	第一次张拉力	第二次张拉力
1	510	760
2	320	350
3	330	330
4	420	440
5	430	440
6	410	430
7	390	430

在现场利用频谱分析法<sup>[11-12]</sup>进行索力测试,该法利用索力与拉索自振频率之间的关系获得索力。为防止拱肋支撑对吊杆索力产生影响,拱肋临时支撑在吊杆安装前即进行拆除。依据设定拟定的张拉顺序,两次张拉顺序均为由中间 14 号吊杆依次向两边张拉的顺序进行张拉,张拉力大小按表 1 索力进行施加,吊杆布置图如图 6 所示。进行索力监测时,除记录气温、临时荷载等影响因素,同时避免日照不均匀温度场的影响,选择日照较弱时间段进行索力监测,从而减小索力测试的误差,为索力施工控制的理论计算与预测提供准确的理论支持。

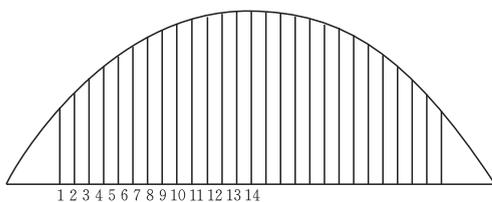


图 6 吊杆布置

## 5 控制结果分析

这里选取成桥阶段的控制结果进行分析。

### 5.1 拱肋线形控制结果分析

选取拱肋 1/8 处、1/4 处等关键截面进行线形测点布置,拱肋到成桥阶段累计位移的计算值与实测值进行对比分析如图 7 所示。

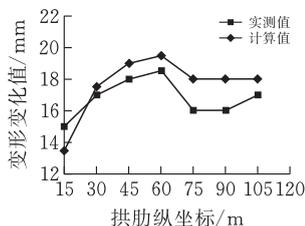


图 7 拱肋竖向位移

由成桥拱肋竖向位移图可知,整个施工阶段拱肋拱顶处累计位移最大,有 18 mm,拱肋整体位移变

化趋势与有限元理论计算吻合良好,说明按二次抛物线进行预拱度分配所进行的线形控制取得了良好的效果,同时也验证了有限元计算边界条件设置与荷载布置符合工程实际。

### 5.2 拱肋应力控制结果分析

选取上游拱肋在成桥状态的应力进行分析,实测值与计算值对比分析如表 2 所示。

表 2 上游拱肋应力监测结果 MPa

拱肋截面	实测值	计算值	误差
拱脚	-53.1	-54.0	0.9
1/4 处拱肋	-50.8	-47.6	3.2
1/2 处拱肋	-36.5	-38.7	2.2
3/4 处拱肋	-49.3	-47.6	1.7

拱肋良好的应力状态是结构安全的重要保证,应力监控过程中,应力以拉为“+”,以压为“-”。由表 2 可知,在成桥后,拱肋最大应力不超过 60 MPa,拱肋实测应力与计算值最大误差不超过 5 MPa,说明拱桥受力状态合理。拱脚处压应力最大,最大压应力为 53.1 MPa,远小于材料的容许应力,在合理范围内。

### 5.3 吊杆索力控制结果分析

对成桥后的吊杆索力实测索力值与计算值进行对比研究,如图 8 所示。

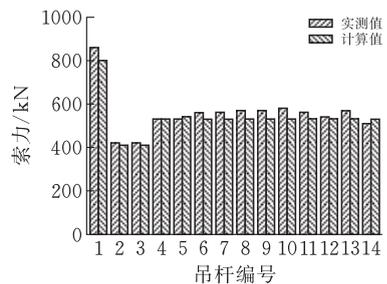


图 8 吊杆索力对比

由图 8 对比分析可知,在成桥后的实测索力值与计算值的误差控制在 10% 以内,索力分布均匀,误差在设计允许的范围。说明按照影响矩阵法所求得的吊杆张拉力进行张拉,桥梁结构最终的成桥状态符合满足设计要求。由于 1 号吊杆靠近拱脚,拱脚处刚度较大,导致 1 号吊杆索力值明显高于其它吊杆。吊杆索力实测值远小于钢材的抗拉强度,满足设计要求。1 号吊杆设计值与实测值误差相对于其他吊杆误差较大,主要原因是拱脚处受力复杂,而模型主梁与横梁均使用梁单元模拟,参数设置较为简化,但误差仍在设计允许的范围,可指导实际施工。

## 6 结论

通过对舍里甲大桥施工监控过程进行了介绍和

分析,得出以下结论:

1)拱肋线形控制以调整预拱度为主,以二次抛物线分配法进行预拱度分配,通过与理论计算值对比,桥梁结构成桥后,拱肋位移最大处位于拱顶,实测位移值与计算值吻合良好。利用二次抛物线分配法进行系杆拱桥预拱度计算,可以达到拱肋线形控制的目的,并取得良好的控制效果。

2)在对拱肋的应力监测中,拱脚是拱桥受力的关键部位,拱脚处最大应力为远小于材料容许应力,在设计允许的范围内。同类桥梁施工时,应重点关注拱脚受力情况。

3)在吊杆索力的控制中,利用影响矩阵法求解吊杆张拉索力,通过计算索力值与实测索力值对比,计算值与实测值相吻合,误差在设计允许的范围内。利用影响矩阵法求得的两次吊杆张拉力合理,成桥后索力分布均匀,最后达到设计要求索力,能够指导钢箱系杆拱桥索力控制施工。

4)对于整体结构受力复杂的部位,可单独进行有限元分析,提高理论设计的精确性。

#### [参 考 文 献]

[1] 郑皆连.我国大跨径混凝土拱桥的发展新趋势[J].重庆

交通大学学报(自然科学版),2016,35(S1):8-11.

- [2] 陈宝春,韦建刚,周俊,等.我国钢管混凝土拱桥应用现状与展望[J].土木工程学报,2017,50(6):50-61.
- [3] 陈宝春,叶琳.我国混凝土拱桥现状调查与发展方向分析[J].中外公路,2008(2):89-96.
- [4] 李莎.大跨高墩预应力刚构桥施工控制的研究[D].武汉:武汉理工大学,2012.
- [5] 杜森.复式钢箱中承式拱桥施工过程分析[J].中外公路,2016,36(5):139-143.
- [6] 杜海龙,秦大燕,罗小斌,等.超大跨径拱桥施工控制[J].公路,2019,64(6):120-125.
- [7] 刘俊杰.大跨度钢管混凝土拱桥吊杆张拉控制技术研究[D].华北水利水电大学,2019.
- [8] 戴公连,李建桥.桥梁结构空间分析设计方法与应用[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [9] 李振云.无应力状态法在钢管混凝土系杆拱桥中的研究与应用[D].西安:长安大学,2019.
- [10] 肖汝诚,项海帆.斜拉桥索力优化的影响矩阵法[J].同济大学学报(自然科学版),1998(3):3-5.
- [11] 吴康雄,刘克明,杨金喜.基于频率法的索力测量系统[J].中国公路学报,2006(2):62-66
- [12] 沈超明,杭振园,李年维.力传感器修正频率法在吊杆张力测试中的应用[J].铁道建筑,2012(4):40-43.
- [13] 黄天立,傅金龙.支架现浇刚性系杆拱桥的吊杆施工张拉力确定方法[J].桥梁建设,2016,46(5):35-40.

## Analysis of Construction Control of Shelijia Bridge

BAI Yinghua, YANG Qimeng, YU Tianqing

(School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

**Abstract:** As a through steel box tied arch bridge, the main bridge of Shelijia Bridge has a total length of 120m and is located in the Economic Development Zone of Nanchang. A bridge model was established by means of Midas/Civil, and the influence matrix method and other methods were used to control the linear shape, stress and cable force in the construction process of the bridge, which ensured the alignment and forced state of the bridge meet the design requirements after the bridge was formed. The field test data obtained during the construction process were compared with the calculated values of the finite element software, providing an effective reference for future bridge construction. The results showed that the alignment, stress of the arch rib and main girder in the bridge stage are consistent with the calculated values, which are within a reasonable range. The suspender cable forces are well distributed, and the error between the measured value and the calculated value is within the allowable range of the design. It is well controlled during the construction period and provides an effective reference for similar bridge construction in the future.

**Keywords:** highway bridge; construction control; numerical calculation; bowstring arch bridge

[责任编辑:裴 琴]