

文章编号:1671-6833(2011)01-0001-04

## 斜靠式拱桥施工阶段静力性能分析

陈 淮<sup>1</sup>,申哲会<sup>2</sup>,李静斌<sup>1</sup>,葛素娟<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 土木工程学院,河南 郑州 450001;2. 江苏省交通科学研究院,江苏 南京 210017)

**摘 要:**采用空间有限元方法建立平顶山市城东河路湛河斜靠式拱桥施工阶段受力分析的空间有限元计算模型,通过对拱肋的浇筑以及拱架卸架过程中的内力和位移、吊杆张拉顺序的计算,给出了各施工阶段桥梁构件应力和位移、吊杆索力等随施工阶段变化的规律;拱肋主要承受压力,弯矩较小;由于系杆梁预应力的作用,系杆梁全跨受压;吊杆索力分布比较均匀,对桥面系的线形控制作用比较明显;各混凝土构件总体处于受压状态,桥梁设计最大压应力小于材料容许应力,具有较大安全储备,桥梁的变形均在设计规范规定范围之内,表明该桥梁施工方案合理. 计算结果已为该桥的施工监控提供参考.

**关键词:**斜靠式拱桥;静力计算;有限元法;施工阶段

**中图分类号:** U448.22<sup>+</sup>5

**文献标志码:** A

### 0 引言

大跨径混凝土中、下承式拱桥是分阶段逐步施工完成的,这一过程也是结构形式及受力状态不断变化的过程,在每一个施工阶段都有可能伴随着混凝土收缩和发生徐变、边界约束条件改变、预应力张拉、吊杆索力张拉或调整等. 另外,后期结构的力学性能也与前期结构的施工情况密切相关,改变施工方案将直接影响桥梁成桥的受力状态和线形<sup>[1]</sup>. 笔者以平顶山市城东河路湛河桥主桥——斜靠式拱桥为例,进行该类型桥梁的施工阶段静力计算,所得结果可为该桥的施工监控和同类桥梁的设计与施工提供参考.

### 1 桥梁有限元建模

平顶山市城东河路湛河桥主桥为跨径120 m的斜靠式拱桥(图1),由4片拱肋组成,主拱为中间两片向桥外侧倾斜1°的拱肋,稳定拱为两侧向内侧倾斜8.007 5°的拱肋,主拱肋为桥梁主要承重结构. 桥梁设计荷载为城—A级,挂—120,双向4车道,两侧各设一个非机动车道和人行道;桥面宽30 m,跨中设弧形观景平台,中间最大宽度32 m. 主拱与稳定拱的拱轴线均为二次抛物线,主拱矢跨比1/4.444,稳定拱矢跨比1/2.711,主拱和

稳定拱肋都采用箱形截面,C50混凝土,主拱肋高2.7 m,宽1.5 m,纵向采用跨径120 m下承式系杆拱体系,稳定拱肋高2.7 m,宽1.2 m,纵向采用跨径92 m中承式系杆拱体系.



图1 平顶山市城东河路湛河桥

Fig.1 The Zhanhe Bridge on Chengdonghe Road in Pingdingshan

两片主拱在横向没有连接,主拱与稳定拱在拱顶部拱段用横向联系梁相连,组成空间稳定体系,提供了结构的横向稳定性. 系杆梁采用预应力混凝土箱形截面,箱宽1.5 m,高2.7 m,采用C50混凝土,主拱与桥面相交处设置端横梁,以提高两片主拱的面外横向稳定性,端横梁采用预应力混凝土箱型结构,中横梁采用预应力混凝土T形

收稿日期:2010-09-10;修订日期:2010-10-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50748028)

作者简介:陈淮(1962-),男,河南淮阳人,郑州大学教授,博士,主要从事桥梁结构分析和工程结构抗震研究. E-mail:chenh@zzu.edu.cn.

梁,与系杆梁刚性相接;桥面板采用普通钢筋混凝土板.在两拱肋及系杆梁中间,分别设两道纵梁,与桥面板及各横梁刚性相接.主拱吊杆采用镀锌高强钢丝制成的平行钢丝束、冷铸墩头锚体系,间距 4 m,稳定拱吊杆间距同主拱肋,分别吊于各横梁端部,主拱设吊杆 28 对,稳定拱设吊杆 18 对.主拱采用盆式橡胶支座支承在钢筋混凝土箱形墩身,稳定拱肋每个拱脚下采用 6 根  $\Phi 120$  cm 钻孔灌注桩<sup>[2]</sup>.

由于斜靠式拱桥为复杂的空间结构体系<sup>[3]</sup>,为分析湛河斜靠式拱桥各施工阶段的静态力学性能,采用有限元软件 Midas/civil 进行空间有限元建模,根据类似桥梁有限元建模经验<sup>[4-6]</sup>,系杆梁、横梁、小纵梁、拱肋和横撑等构件采用空间梁单元模拟;吊杆采用只承受拉力的空间桁架单元模拟;桥面板用板壳单元模拟,有限元计算模型节点总数 758 个,单元总数 908 个,其中空间梁单元 642 个,空间桁架单元 92 个,空间板壳单元 174 个.根据桥梁施工阶段的不同,桥梁的节点、单元、边界条件也会随之发生变化,桥梁边界条件按以下方式选取:(1)满堂支架采用弹性支撑模拟,其刚度由施工单位提供的支架预压试验确定;(2)主拱 4 个拱脚处施加简支边界条件,稳定拱 4 个拱脚处施加固定约束.通过将以上单元及边界约束条件在某一施工阶段激活或钝化的方式来模拟该施工阶段的状态<sup>[7]</sup>.计算采用的材料常数根据桥梁规范确定,计算模型空间坐标系方向为:桥梁纵桥向为  $x$  轴,横桥向为  $y$  轴,竖向为  $z$  轴.

主桥采用满堂支架现浇的方式进行施工,施工顺序为首先在支架上浇筑系杆梁、横梁、小纵梁和桥面板,然后在桥面上搭设拱架浇筑钢筋混凝土拱肋,张拉系杆梁预应力和吊杆索力,最后进行桥面铺装.根据该桥的施工方

案,制定桥梁施工过程中模拟计算的施工阶段,如表 1 所示.

表 1 桥梁结构施工阶段划分		
Tab.1 The divisions of the bridge construction stage		
施工阶段	施工进度	说明
施工桥面系	1	系杆梁、横梁施工完毕
	2	小纵梁、桥面板施工
	3	张拉端横梁、中横梁直预应力筋、系杆梁第 1 批预应力筋
内外拱肋施工	4	施工内拱 1#块
	5	施工外拱 1#块
	6	施工内拱 2#块
	7	施工外拱 2#块
	8	施工内拱 3#块
	9	施工外拱 3#块
	10	施工内拱 4#块
	11	施工外拱 4#块
	12	施工横向联系
	13	拆除拱肋下部支架
吊杆张拉及系杆预应力筋张拉	14	系杆梁第 2 批预应力筋张拉
	15	张拉内拱 9 号吊杆
	16	张拉外拱 4 号吊杆
	17	张拉内拱 12 号吊杆
	18	张拉外拱 7 号吊杆
	19	张拉内拱 4 号吊杆
	20	系杆梁第 3 批预应力筋张拉
	21	张拉内拱 7 号吊杆
	22	张拉外拱 2 号吊杆
	23	张拉内拱 10 号吊杆
	24	张拉外拱 5 号吊杆
	25	张拉内拱 3 号吊杆
	26	张拉内拱 13 号吊杆
	27	张拉外拱 8 号吊杆
	28	张拉内拱 8 号吊杆
	29	张拉外拱 3 号吊杆
	30	张拉内拱 11 号吊杆
其它	31	张拉外拱 6 号吊杆
	32	张拉内拱 2 号吊杆
	33	张拉内拱 14 号吊杆
	34	张拉外拱 9 号吊杆
	35	张拉内拱 1 号吊杆
	36	张拉内拱 6 号吊杆
	37	张拉外拱 1 号吊杆
	38	张拉内拱 5 号吊杆
	39	中横梁剩余预应力筋张拉
	40	拆除下部支架
	41	桥面铺装

2 计算结果及其分析

2.1 施工阶段拱肋变形

图 2、图 3 分别给出了拱肋控制截面竖向及横向位移随施工阶段变化的曲线(图中横轴为施工阶段编号,以下图中横轴均与此相同,不再另外说明),从图中可以看出,在桥梁的施工过程中,由于吊杆及系杆梁预应力筋的作用,使得拱肋的位移变化比较复杂:主拱在拱顶和 1/4 处,随着施工的进程,其变位趋势大体相同,系杆梁预应力的存在可以有效地抑制拱肋的竖向和横向变形,拱

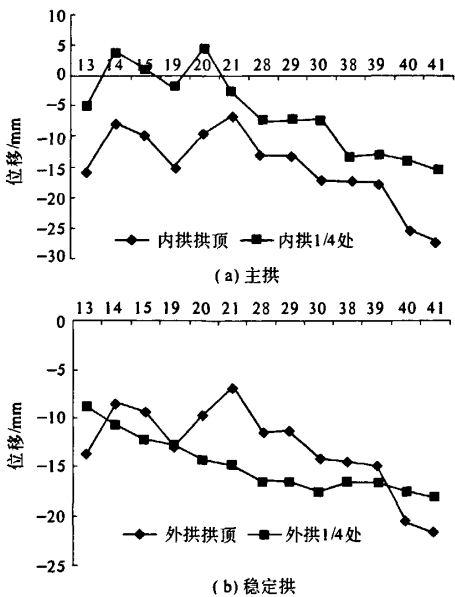


图 2 拱肋控制截面竖向位移随施工阶段变化曲线  
Fig.2 The vertical displacement curve of the rib control sections changed by different construction stages

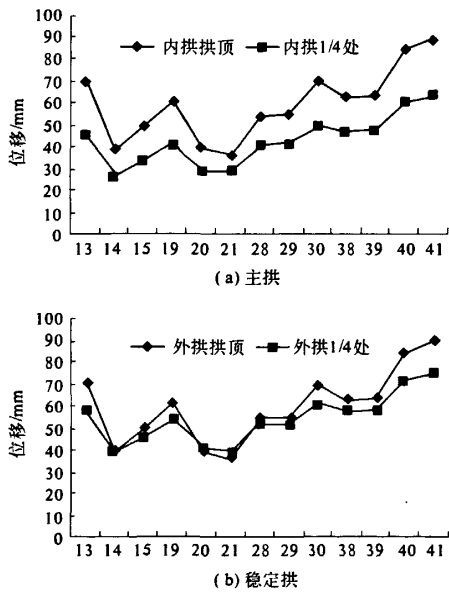


图 3 拱肋控制截面横向位移随施工阶段变化曲线  
Fig.3 The transversal displacement curve of the rib control sections changed by different construction stages

横向变形在拱顶和 1/4 处趋势均与主拱相近。桥梁各构件变形均在桥梁设计规范规定范围之内,满足规范要求。

2.2 施工阶段拱肋受璃

图 4 为拱顶截面上、下缘的正应力随着施工

阶段的变化曲线,由图 4 可以看出在桥梁施工过程中,主拱顶上缘正应力介于  $-2.6 \sim -8.3 \text{ MPa}$ ,下缘正应力介于  $-0.7 \sim -7.7 \text{ MPa}$ ;稳定拱顶上缘正应力介于  $-0.9 \sim -3.9 \text{ MPa}$ ,下缘正应力介于  $-0.7 \sim -2.9 \text{ MPa}$ ,都小于混凝土抗压强度值,桥梁各构件受力均在桥梁设计规范规定范围之内,桥梁结构受力合理,施工安全。

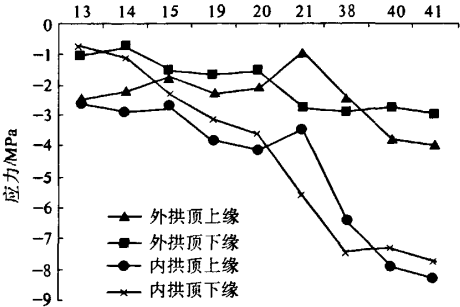


图 4 拱顶截面正应力随施工阶段变化曲线  
Fig.4 The normal stress curve of the arch crown section changed by different construction stages

2.3 施工阶段吊杆索力

从吊杆索力随施工过程变化图可以看出,随着桥梁施工的进行,在吊杆的张拉过程中,大部分吊杆索力逐渐减小,而在施工阶段后期,由于拆除桥面系下部支架和进行桥面铺装,使得吊杆索力明显增大;每新挂一组吊杆对已张拉吊杆的索力

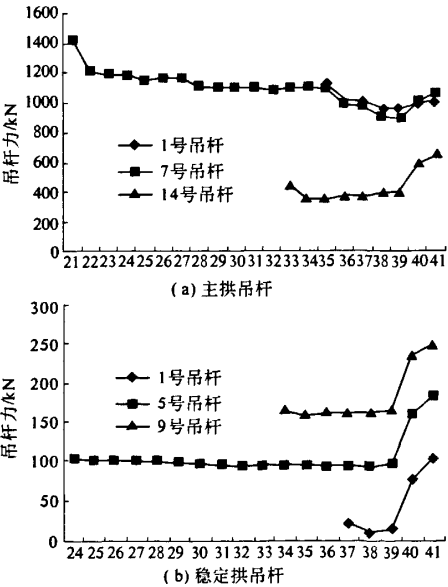


图 5 吊杆索力随施工阶段变化曲线  
Fig.5 The suspender tension curves changed by different construction stages

有明显的影响;张拉主拱吊杆使得邻近吊杆的索力有所下降,而对相对较远的吊杆,其索力稍许增加;张拉稳定拱吊杆时,由于其索力值相对较小,对主拱吊杆索力影响不大<sup>[7]</sup>.限于篇幅,图5仅给出了拱肋端部、1/4处及拱顶吊杆索力随着施工阶段变化的曲线.

### 3 结论

从计算结果可以看出,拱肋主要承受压力,弯矩较小;系杆梁虽然是一拉弯构件,但由于布置有多道预应力筋,截面全跨受压;吊杆索力比较均匀,对桥面系的线形控制作用比较明显;各混凝土构件总体处于受压状态,桥梁设计最大压应力小于材料容许应力,具有较大安全储备;桥梁的变形均在设计规范规定范围之内.计算结果表明该桥梁施工方案合理,计算结果已为该桥的设计、施工提供技术依据,也为该桥梁的施工监控提供参考.

### 参考文献:

- [1] 葛耀君.分段施工桥梁分析与控制[M].北京:人民交通出版社,2003:22-26.
- [2] 张秀成,王宏艳,任毅勇.斜靠式提篮拱桥设计特点[J].公路,2005(12):32-34.
- [3] 肖汝诚,孙海涛,贾丽君,等.昆山玉峰大桥——首座大跨度无推力斜靠式拱桥的设计研究[J].土木工程学报,2005,38(1):78-83.
- [4] 陈淮,孙应桃,胡锋.拱肋施工偏差对斜靠式拱桥力学性能的影响[J].桥梁建设,2007(1):36-38.
- [5] 陈淮,申哲会,胡锋,等.斜靠式拱桥动力特性研究[J].郑州大学学报:工学版,2005,26(4):25-28.
- [6] 申哲会,陈淮,胡锋.湛河斜靠式拱桥静力性能分析[J].郑州大学学报:工学版,2009,30(3):22-25.
- [7] 申哲会.斜靠式拱桥施工控制研究[D].郑州:郑州大学土木工程学院,2006.

## Static Analysis of Double X-shaped Arch Bridge in Construction Stage

CHEN Huai<sup>1</sup>, SHEN Zhe-hui<sup>2</sup>, LI Jing-bin<sup>1</sup>, GE Su-juan<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Jiangsu Transportation Science Institute Corporation, Nanjing 210017, China)

**Abstract:** The Zhanhe Bridge on Chengdonghe Road in Pingdingshan city is a double X-shaped arch bridge, which is the research object in this paper. Above all, the spatial finite element calculation model of it was established by using the spatial finite element method. Then both the internal force and displacement in arch rib of the bridge during the concrete pouring stage and the arch shelf discharging stage and the suspender tension sequence were calculated in detail. As a result the change law of the bridge component's stress and displacement, the change law of the cable force in suspender in different construction stages all can be deduced and summarized by the following points: The compression force is the main force than flexural torque in the arch rib. The tie beam is supported compression in the whole span because of the prestress force. The cable forces are uniform in all of the suspenders, so they play a remarkable role to the bridge's line shape control. Most of the concrete members of the bridge are in compressive state. The maximal compressive stress is less than the material allowable stress in bridge design. So the bridge has a higher safety factor, the bridge deformation is in the permissible range and the bridge construction is safe and reliable. The calculated results of the bridge provide references for the bridge construction monitoring and control.

**Key words:** double X-shaped arch bridge; static analysis; finite element method; construction stage