

文章编号:1671-6833(2009)03-0022-04

## 湛河斜靠式拱桥静力性能分析

申哲会<sup>1</sup>, 陈 淮<sup>2</sup>, 胡 锋<sup>3</sup>

(1. 江苏省交通科学研究院, 江苏 南京 210017; 2. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 3. 河南省交通科学技术研究院, 河南 郑州 450006)

**摘 要:** 采用 Midas/civil 有限元软件建立了平顶山市城东河湛河桥主桥——120 m 跨径的斜靠式拱桥的空间有限元计算模型, 计算了该桥在恒载和恒载+活载作用下的静力特性。计算结果表明, 全桥各混凝土构件总体处于受压状态, 杆梁最大正应力值为 6.28 MPa, 拱肋最大正应力值为 12.0 MPa, 均小于 C50 混凝土设计抗压强度; 主拱吊杆安全系数为 2.94, 稳定拱吊杆安全系数为 2.70, 满足拱桥设计要求最小安全系数不得小于 2.5 的规定; 系杆梁最大竖向位移为 0.039 m, 拱肋最大竖向位移为 0.03 m, 最大横向位移为 0.101 m, 满足桥梁设计规范正常使用极限状态下的变形要求。

**关键词:** 斜靠式拱桥; 静力性能; 有限元法

**中图分类号:** U 448.22\*5 **文献标识码:** A

### 0 引言

平顶山市城东河湛河桥主桥为跨径 120 m 的斜靠式拱桥, 由 4 片拱肋组成, 中间两片为向桥外侧倾斜 1 度的拱肋(称为主拱肋), 主拱肋两侧各布一片向内侧倾斜 8.0075 度的拱肋(称为稳定拱), 主拱肋为桥梁的主要承重结构, 稳定拱与主拱肋组成空间稳定体系, 提供了结构的稳定性。主拱与稳定拱拱轴线均为二次抛物线, 主拱矢跨比 1/4.444, 稳定拱矢跨比为 1/2.711, 主拱肋和稳定拱都采用箱形截面, 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, 主拱与稳定拱在拱顶部拱段用横向联系梁相连, 形成三角形结构, 保证结构的横向稳定性。在主拱拱脚处设置系杆梁, 采用预应力混凝土箱形截面, 宽 1.5 m, 高 2.7 m, C50 混凝土, 主拱与桥面相交处设置强大的端横梁, 以提高两片主拱的面外横向稳定, 端横梁采用预应力混凝土箱型结构, 截面满足受力及对拱脚的约束要求。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。桥面横向布置(半幅): 2.75(3.75) m 人行道 + 3.0 m 非机动车道 + 1.75 m 主拱吊杆区 + 7.5 m 机动车道 = 30(32) m。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, 全桥共设主拱吊杆 28 对, 稳定拱吊杆 18 对。

自 1987 年西班牙建筑师 Santiago Calatrava 成功设计第一座斜靠式拱桥 Bacde Roda Bridge 以来, 这一结构体系便被引入我国城市桥梁建设。由于斜靠式拱桥外形新颖美观, 桥面开阔畅通, 富有曲线美和力度感, 在城市桥型特别是宽桥桥型的选择中具有明显的优势, 是近些年来发展起来的一种新型的桥梁结构形式, 但该种桥型空间效应明显, 受力复杂<sup>[1-2]</sup>。为了正确进行桥梁设计和建造, 需要了解桥梁的受力性能, 笔者以平顶山市城东河路湛河斜靠式拱桥为工程实例, 进行斜靠式拱桥的静力性能分析。

收稿日期: 2009-03-30; 修订日期: 2009-05-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50748028)

作者简介: 申哲会(1981-), 男, 河南浚县人, 助理工程师, 硕士, 主要从事桥梁设计和科研工作。E-mail: szh@ti.js.cn; 通讯作者简介: 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工作。E-mail: chen@zzu.edu.cn。

## 1 桥梁空间计算有限元计算模型

为了分析湛河斜靠式拱桥成桥状态下的静力性能,采用桥梁空间计算有限元软件 Midas/civil 进行建模.该桥由拱肋、吊杆和桥面系3部分组成,桥面系包括水平系杆梁、端横梁、中横梁、小纵梁和桥面板.结合类似桥梁计算建模经验<sup>[3-6]</sup>,在桥梁有限元建模中,系杆梁、横梁、小纵梁、拱肋和横撑等构件均采用空间梁单元进行模拟;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,桥梁空间有限元计算模型如图1所示,计算模型节点总数为758个,单元总数908个,其中空间梁单元642个,空间杆单元92个,空间板壳单元174个.计算模型空间坐标系方向规定如下:纵桥向为 $x$ 轴,横桥向为 $y$ 轴,竖向为 $z$ 轴.桥梁边界条件按以下方式选取:对桥梁的4个角点进行约束,其中一侧拱肋左端拱脚处结构需约束3个方向的线位移,而不约束平面内的转角,即沿 $y$ 轴方向的转动自由度 $rot_y$ ,同时还约束其他两个方向的转角;为考虑结构在水平方向可以自由伸缩和绕特定轴发生转动变形,此侧拱肋右端释放水平纵向自由度 $ux$ 和转动自由度 $rot_y$ ,其他4个自由度均需约束,另一侧拱肋的一端拱脚释放横向自由度 $uy$ ,另一端释放横向自由度 $uy$ 和转动自由度 $rot_x$ .计算采用的材料常数根据桥梁规范确定,其值为:钢材弹性模量 $1.95 \times 10^5$  MPa,镀锌钢丝弹性模量 $1.90 \times 10^5$  MPa,C50混凝土弹性模量 $3.45 \times 10^4$  MPa,钢材的容重取 $7.65 \times 10^4$  N/m<sup>3</sup>,钢筋混凝土的容重取 $2.65 \times 10^4$  N/m<sup>3</sup>,桥面板的密度考虑桥面铺装及防撞栏的重量折算为 $3.072 \times 10^4$  N/m<sup>3</sup>.

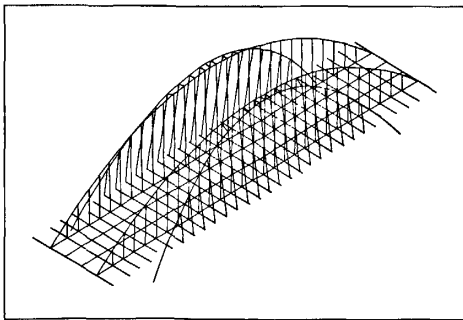


图1 桥梁空间有限元计算模型

Fig.1 The space finite element model of Zhanhe Bridge

## 2 计算结果及其分析

为了分析该拱桥在静力荷载作用下的力学性能,笔者计算了该桥在恒载和恒载+活载作用下的静力性能.桥梁的恒载根据输入的桥梁材料参数和几何参数按给定的数据文件由程序自动加载,桥梁所承受的活载根据《城市桥梁设计荷载标准》中城-A级汽车荷载确定,系杆梁和横梁的预应力通过程序自带的预应力钢束的方式来施加,吊杆的施工初索力通过Midas/civil对桁架单元直接施加.拱桥在恒载+活载作用下的内力图如图2所示,变形图见图3.由于该桥关于桥梁中心线上下游对称,上游各吊杆在恒载+活载作用下的张力与成桥恒载设计值的对比图见图4、图5,在恒载+活载作用下上游吊杆的安全系数见图6,具体数值详见文献[7].

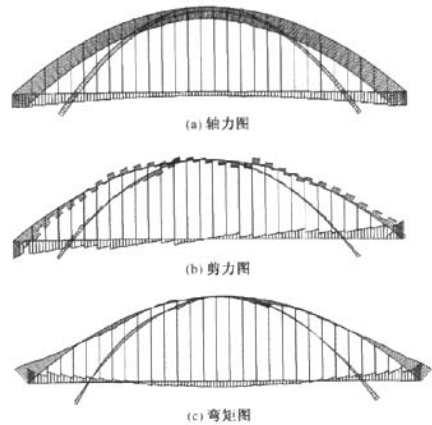


图2 恒载+活载作用下拱桥内力图

Fig.2 Drawing of internal force under dead load plus live load

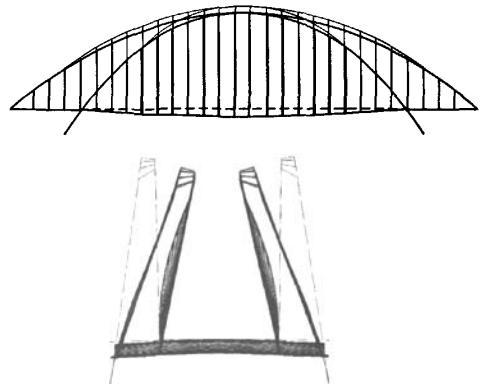


图3 恒载+活载作用下拱桥变形图

Fig.3 Displacement under dead load plus live load

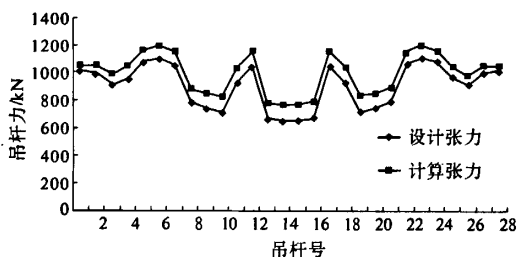


图4 上游内吊杆张力图

Fig.4 Upstream inner suspender force graph

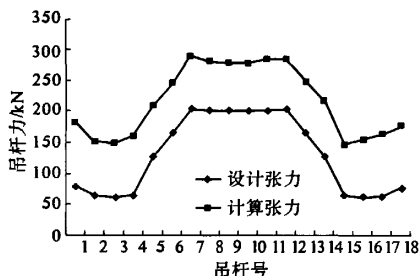


图5 上游外吊杆张力图

Fig.5 Upstream outer suspender force graph

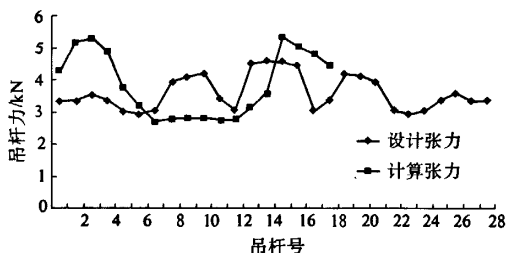


图6 上游吊杆安全系数

Fig.6 Upstream suspender safety degree

分析图2拱桥内力图可知,拱肋轴力大小关于跨中对称,变化大致均匀,拱肋各个截面全截面受压;拱肋剪力在拱脚处最大,在有吊杆的位置剪力发生突变,拱肋剪力关于跨中对称;拱肋弯矩变化不均匀,拱脚最大,拱肋弯矩也关于跨中对称。系杆梁轴力大小关于跨中对称,变化均匀,系杆梁虽然承受拱肋的推力,但由于系杆梁布置有多道预应力筋,预压力抵消了来自拱肋的推力,所以系杆梁截面全跨受压,由于预应力的损失,端部轴力最大,跨中最小;系杆梁剪力在端部最大,在有吊杆的位置剪力发生突变,系杆梁剪力关于跨中对称;系杆梁弯矩变化不均匀,端部正弯矩、跨中负弯矩分别达到最大值,在1/4跨处的弯矩为0,在有吊杆的位置弯矩发生变化,系杆梁的弯矩也关

于跨中对称。

分析图3拱桥变形可知,全桥变形以桥面的竖向位移和拱肋的横向偏移为主。拱肋竖向最大变形发生在跨中,达到0.03 m,拱肋横向变形在活载作用下比恒载作用下有较小幅度的增大;系杆梁竖向位移均向下,跨中最大的竖向位移为0.039 m,两端有向上的微小位移。

分析图4~图6可知,吊杆索力大小关于跨中对称,活载增大了吊杆所受的索力,吊杆安全系数曲线与其对应的张力值趋势相似。全桥吊杆安全系数均大于2.5,其中内吊杆最小安全系数2.94,发生在6号吊杆,外吊杆最小安全系数2.70,发生在7号吊杆。

根据以上计算结果可知,各混凝土构件总体处于受压状态,桥梁设计以最大压应力小于材料容许应力为控制目标,系杆梁最大正应力值为6.28 MPa,拱肋最大正应力值为12.0 MPa,均小于C50混凝土设计抗压强度;主拱吊杆最大索力为1202 kN,其安全系数为2.94,稳定拱吊杆最大索力为291 kN,其安全系数为2.70,满足拱桥设计要求最小安全系数不得小于2.5的规定;系杆梁最大竖向位移为0.039 m,拱肋最大竖向位移为0.03 m,最大横向位移为0.101 m,满足桥梁设计规范正常使用极限状态下的变形要求。

### 3 结论

湛河斜靠式拱桥的拱肋主要承受压力,弯矩较小;系杆梁虽然是一个拉弯构件,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,且吊杆索力对桥面系的线形控制作用比较明显;桥梁各构件受力和变形均在桥梁设计规范规定范围之内,表明桥梁结构受力合理。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,主拱吊杆最小安全系数为2.94,稳定拱吊杆最小安全系数为2.70,满足桥梁设计要求最小安全系数不得小于2.5的规定;系杆梁线形控制较好,最大竖向位移为0.039 m,拱肋最大竖向位移为0.03 m,最大横向位移为0.101 m,满足设计规范正常使用极限状态下的变形要求。计算结果表明,该桥梁设计安全可靠,所得结论对于同类桥梁的设计、研究以及施工控制具有一定的参考价值。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张天航, 李清富. 多跨连续斜靠式异型拱桥的设计与稳定分析[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2006, 27(2): 107-109, 112.
- [3] 陈淮, 孙应桃, 胡风. 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.
- [4] 谷定宇, 陈淮, 王艳, 等. 潮洲韩江北桥斜靠拱桥稳定性分析[J]. 公路交通科技, 2006, 23(3): 100-103.
- [5] 陈淮, 胡锋, 申哲会, 等. 斜靠式拱桥稳定性分析[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2005, (增刊), 182-186.
- [6] 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.
- [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硕士学位论文, 2006.

## Static Characteristics Analysis of Zhanhe Leaning-type Arch Bridge

SHEN Zhe-hui<sup>1</sup>, CHEN Huai<sup>2</sup>, HU Feng<sup>3</sup>

(1. Jiangsu Transportation Research Institute, Nanjing 210017, China; 2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Henan Transportation Science and Technology Research Institute, Zhengzhou 450006, China)

**Abstract:** Zhanhe Bridge of Cheng dong Road in Pingdingshan is a 120m span leaning-type arch bridge. According to the structural characteristics of the bridge, its space finite element computational model is set up. For the research object, the author calculated the bridge's static characteristics under dead load and dead load plus live load. The result indicates that all the concrete elements of the bridge are in compression. The binding rod's biggest normal stress is 6.27 MPa, and the arch rib's biggest normal stress is 12.0 MPa. They both are under the C50 concrete's design compression strength. The assurance coefficient of the main arch suspender is 2.94, and the stable's is 2.70. They are all larger than 2.50. The largest vertical displacement of the binding rod is 0.039 m, and the arch rib's is 0.03 m. The largest lateral displacement of the arch rib is 0.101 m. They all meet the displacement requirements of the bridge code. The results of the paper may offer the related data to such bridge's research and reasonable design.

**Key words:** leaning-type arch bridge; static characteristics; finite element method