

# 外倾拱肋系杆拱桥的设计与施工实践

应伟强 庄年

(北京市市政工程设计研究总院 北京 100045)

**摘要:**某桥梁工程是座下承式外倾拱肋系杆拱桥,主桥跨径111m,拱肋采用箱形截面,本文结合该桥的设计情况,浅析该类类型的设计构思、造型特点和受力特性,以及施工方案的选择和施工方法。

**关键词:**外倾拱肋 系杆拱桥 桥梁设计 桥梁施工

## 1 工程概述

拱桥是一种古老的桥型,材料运用多种多样,近年来随着经济的高速发展,城市景观化程度提高,各种造型美观的拱桥应运而生。张家口工业南桥是跨越河北省张家口市清水河的一座桥梁,在主桥桥型选择上,为了展现张家口市现代城市的风格,在满足使用功能的前提下,经多方案比较,最终选定采用跨径111m的下承式钢结构外倾拱肋系杆拱桥方案。

## 2 总体布置

张家口工业南桥位于清水河水环境治理三期工程新河道桩号9+800处,由两侧引桥,及主跨径111m的主桥构成,桥梁全长147m。主桥为下承式钢结构外倾拱肋系杆拱桥,拱肋外倾18.4度。主桥为双向4车道,双侧非机动车道及双侧人行道;全桥宽39.5~51m,桥梁立面布置及横断面如图1所示。

## 3 结构设计

### 3.1 总体设计构思

张家口工业南桥主桥矢高为22.2m,矢跨比为1/5;双拱肋外倾,倾斜度为1/3;车行道断面宽度为17.8m,人行步道与车行道分离,断面宽度为6.2m。该方案的主体寓意为“清水聚缘”,希望把桥梁的功能性、观赏性和艺术性地结合在一起,凸现时代精神。如图2为建成后的张家口工业南桥夜景。

注:《河北张家口市清水河工业南桥桥梁工程》项目获第三届欧维姆预应力技术奖三等奖。本文原载《特种结构》2010年第4期

### 3.2 拱肋设计

本桥主拱结构为外展式拱桥,拱轴线为二次抛物线。拱肋、拱肋加劲肋、拱肋隔板均采用Q390D钢材。

拱肋为箱型截面,拱脚处截面在边支点13m范围内渐变,由最大截面尺寸2.2×2.2m变为2.2×1.7m,外层板厚均为4cm;其余至拱顶段均为标准截面,截面尺寸为2.2×1.7m,外层板厚均为2.5cm。

拱脚变宽段设置十字肋,至拱顶标准段纵桥向间距2m布置一块隔板,吊索处隔板垂直布置,非吊索处隔板垂直于拱轴线布置。纵向加劲肋穿隔板处在隔板开孔,开孔处隔板与纵向加劲肋单侧焊接。

拱肋共分为7个节段,单节最大吊装重量为42t。图3为拱肋横断面,其中图3a为标准拱肋断面,图3b为拱脚变截面段拱肋断面。

### 3.3 吊索设计

全桥纵桥向共设12排吊索,每排吊索共4根,外侧吊索布置在靠步道一侧横梁,内侧吊索布置在靠车行道一侧横梁。吊索纵向间距8m。

吊索成品索采用1860级 $\phi 15.24$ 无粘结环氧喷涂钢绞线缠包后外挤PE,外侧吊索采用15-6型钢绞线,内侧吊索采用15-19型钢绞线。

吊索上端锚点为穿销铰,吊耳钢板深入拱肋内与对应隔板焊接;下端直接锚固于横梁底板上。吊索及吊耳设计安全系数取值为3.0。

### 3.4 系杆设计

系杆截面尺寸为1.0×1.0m,顶底板厚度为

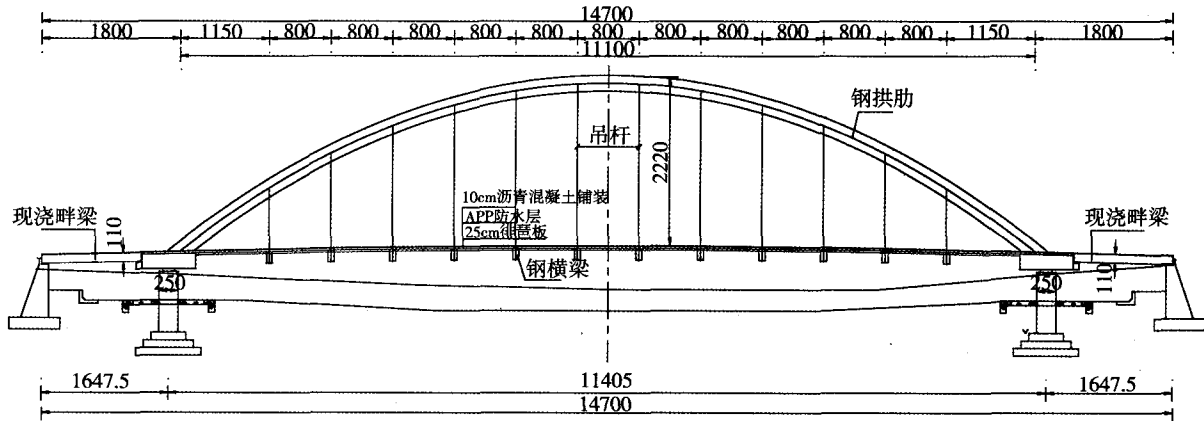


图1a 张家口工业南桥立面布置 (单位: cm)

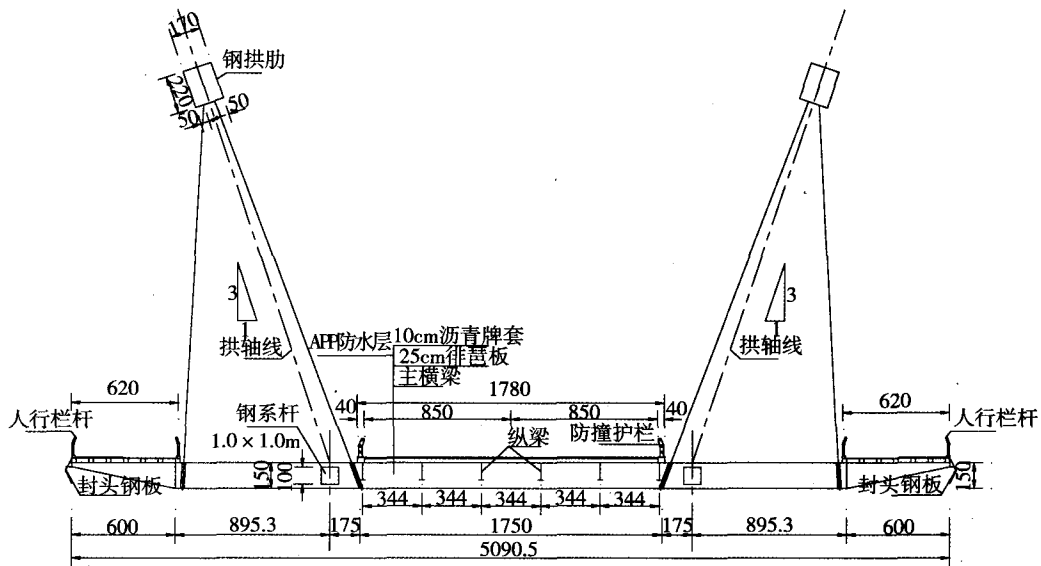


图1b 张家口工业南桥横断面 (单位: cm)

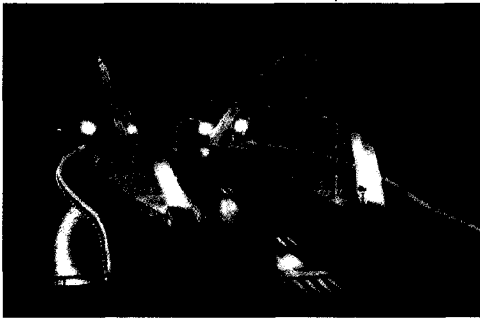


图2 张家口工业南桥夜景

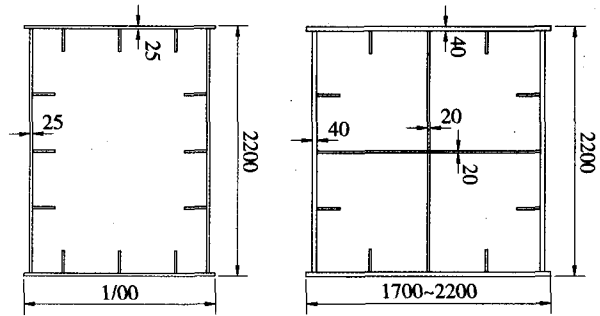


图3 拱肋断面 (单位: mm)

2cm, 腹板厚度为1.6cm。系杆每隔2m设置1道隔板, 系杆与拱脚连接处深入端横梁内与拱脚下钢板焊接。

系杆与主横梁连接处采用主横梁掏孔系杆连续穿过, 并与主横梁腹板及加劲肋焊接。横梁加

工时应 在出厂前与部分系杆共同预制, 预制系杆两侧伸出横梁各50cm; 系杆与横梁角度为 $90^\circ$ , 节间直线连接。

### 3.5 梁格设计

主横梁、端横梁、次横梁、人行道纵梁和车

行道纵梁均采用Q345D钢材,其中主横梁截面尺寸为 $1.5 \times 0.8\text{m}$ 箱型截面,人行道处横梁为变截面,截面尺寸由 $1.5 \times 0.8\text{m}$ 变为 $0.25 \times 0.8\text{m}$ ;主横梁纵桥向间距为 $8\text{m}$ ,箱室内与车行道纵梁对应处及系杆两侧位置设置横隔板。

端横梁截面为单箱双室截面,截面全宽为 $7.8\text{m}$ ,箱室中心高度 $2\text{m}$ ;顶、底板厚度为 $2\text{cm}$ ,腹板厚度为 $1.6\text{cm}$ ;端横梁在引桥方向设 $90\text{cm}$ 高, $80\text{cm}$ 宽牛腿,牛腿与端横梁底板为整钢板。牛腿上支座位置设 $2\text{cm}$ 垫铁,其上放置引桥支座。

端横梁加工时应在出厂前在对应位置上预焊出 $25\text{cm}$ 车行道纵梁,车行道横梁间共设6道纵梁,纵梁间距为 $3.44\text{m}$ ;纵梁采用尺寸为 $\text{I}1000 \times 300\text{mm}$ 工字钢,上翼缘板厚度为 $1.8\text{cm}$ ,下翼缘板厚度为 $1.6\text{cm}$ ,腹板为 $1.2\text{cm}$ ,纵梁与主梁预焊段现场焊接。

纵梁在相对应位置上应预焊出 $25\text{cm}$ 车行道横梁,车行道横梁之间布置次横梁,间距 $2.2 \sim 2.4\text{m}$ 不等,次横梁尺寸为 $\text{I}600 \times 300\text{mm}$ 工字钢,上、下翼缘板厚度为 $1.2\text{cm}$ ,腹板厚度为 $0.1\text{cm}$ ,与纵梁预焊段焊接连接。

车行道采用 $25\text{cm}$ 厚钢锭铣削型钢纤维砼桥面板,人行步道采用 $1.2\text{cm}$ 厚钢桥面板,车行道桥面板内有预应力钢束。

## 4 结构受力特点及整体计算

### 4.1 结构受力特点

张家口工业南桥主桥结构不同于常规的下承式系杆拱桥,采用外倾式拱肋,横桥外倾,使结构受力十分复杂。两片拱肋之间无横向联系,拱肋为陡拱,自身稳定性较差。拱肋上24个吊索锚固位置,48根吊索,每根吊索长度及倾角均不相同,且内外侧吊索与拱肋平面夹角、索力差值较大,更影响了拱肋的稳定性,增加了拱肋受力复杂性。

### 4.2 计算模型及荷载工况

计算采用通用有限元程序MIDAS/Civil建立空

间有限元模型。将整个桥梁结构划分为1120个空间梁单元,48个桁架单元和240个板单元。其中拱肋和纵横梁采用梁单元模拟,吊索采用桁架单元模拟,桥面板采用板单元模拟。计算模型如图4所示。

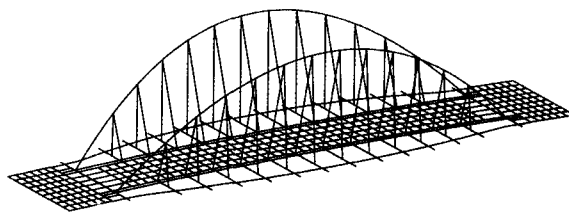


图4 张家口工业南桥空间有限元计算模型

张家口工业南桥结构计算主要考虑了以下荷载

(1) 结构自重:由于空间梁单元不能考虑横隔一级连接板件的重量,通过密度修正使得结构自重与图纸设计自重相同。

(2) 二期恒载:主桥车行道铺装按 $10\text{cm}$ 沥青混凝土计算, $q=0.1 \times 25=2.5\text{kN/m}^2$ ;人行道铺装按 $2\text{cm}$ 铺装计算, $q=0.02 \times 25=0.5\text{kN/m}^2$ ;车行道栏杆按 $3.5\text{kN/m}$ 计算;人行道栏杆按 $3.5\text{kN/m}$ 计算;

(3) 汽车荷载:城市A级,4车道,同时考虑汽车冲击和偏载的影响。

(4) 人群荷载: $3\text{kN/m}^2$ 。

(5) 温度荷载:系统温升 $30^\circ\text{C}$ ;系统降温 $-45^\circ\text{C}$ ;主桥车行道混凝土桥面板日照升温 $10^\circ\text{C}$ ,降温 $-5^\circ\text{C}$ ;吊杆与主梁升温差 $10^\circ\text{C}$ ,降温差 $-10^\circ\text{C}$ 。

(6) 风载计算:

根据地勘报告,本工程所在位置的百年一遇基本风速为 $32.5\text{m/s}$ ,风压为 $0.6\text{kN/m}^2$ ;桥位所在地区地表状况按开阔水面考虑,地表类别按A类取用。根据《公路桥梁抗风设计规范》(JTGD60-01-2004),可计算出:拱肋从拱底到拱顶横风荷载为 $4.20\text{kN/m}$ ,吊杆的横风荷载为 $0.062\text{kN/m}$ ,主梁的横风荷载为 $2.80\text{kN/m}$ 。

### 4.3 静力及稳定计算结果

经计算,在最不利荷载组合下拱肋最大拉应力出现在拱肋拱脚处上缘,应力值为26.3MPa,最大压应力出现在拱肋变截面处下缘,应力值为-142.1MPa;系杆最大拉应力为114.0MPa,最大压应力为-19.9MPa;纵梁最大拉应力为145.0MPa,最大压应力为-59.1MPa。从计算结果可以看出在轴力和弯矩的共同作用下,拱肋、系杆、纵梁中的拉、压应力均较小,能够满足受力要求。

考虑以下4种荷载工况对张家口工业南桥进行了稳定性分析:(1)恒载;(2)恒载+风荷载;(3)恒载+风荷载+4车道满跨车道荷载+人行道满布荷载;(4)恒载+风荷载+4车道偏载车道荷载+人行道一侧满布荷载。表1列出了成桥状态下该桥在各荷载工况下的稳定系数,结构的1阶失稳模态为拱肋的对称面外失稳。

从稳定性分析可以看出,风荷载对结构的稳定影响作用较小,可以忽略不计。还可以看出,工业南桥在荷载工况3和荷载工况4下,其稳定系数基本一致,因此该桥计算中仅考虑恒载+满跨荷载的情况进行稳定分析即可,可减小计算工作量。计算结果表明结构稳定系数满足规范的要求。

表1 成桥状态下稳定系数

荷载工况	荷载工况1	荷载工况2	荷载工况3	荷载工况4
稳定系数	11.879	11.868	9.0785	8.9281

## 5 施工方法

根据本场地条件主桥采用满堂支架法施工,即首先在满堂支架上架设横梁及主拱肋,待桥面主次梁拼装完毕后再进行桥面系施工及吊索安装,桥面荷载通过吊索调整和支架拆除传至吊索。具体施工流程为:

(1)基坑开挖,浇注扩大基础;施工桥台台身及中墩墩柱;

(2)主桥支架基础处理、搭设支架、进行支架预压处理;搭设支架时应预留洪水导流通

道,以满足排洪要求。

(3)拼装端横梁、主横梁、系杆,形成桥面系承重框架结构;利用桥面系框架结构作为施工平台安装车行道、人行道纵横梁;浇注车行道桥面板混凝土,拼装人行道桥面板钢板;

(4)搭设临时支墩,拼装拱肋、挂拱肋临时索并张拉,满足设计及规范要求的拱肋位移量,拱肋横桥向向内位移量4cm;

(5)对拱肋涂装、以及其他专业需要高空作业预埋件予以验收合格后,拆除拱肋临时支架。

(6)由两端向跨中方向对称同步张拉车行道吊索(一次4根);

(7)拆除临时索,待拱肋稳定后由两端向跨中方向对称同步张拉人行道吊索(一次4根);

(8)拆除桥面系支架;

(9)搭设引桥支架,现浇引桥;

(10)拆除引桥支架,施工桥面铺装及其他桥面附属设施,完成大桥施工。

## 6 结语

张家口工业南桥主桥结构不同于常规的下承式系杆拱桥,而是采用外倾式拱肋,横桥向外倾,该桥方案的主体寓意为“清水聚缘”,该桥建成后已成为张家口市的一个标志性建筑。该桥的计算分析、设计研究和施工特点可以为同类桥梁的设计提供借鉴和经验,具有一定的参考价值。

### 参考文献

- [1] 孟杰. 系杆拱桥结构体系研究[D]. 湖南大学, 2002
- [2] 小西一郎. 钢桥[M]. 戴振蕃译. 北京: 中国铁道出版社, 1983
- [3] 杨光. 异型拱桥的拱轴线优化和稳定分析[D]. 大连理工大学, 2008
- [4] 张治成, 徐芸青, 王云峰等. 大跨度中承式拱桥侧向性稳定的空间有限元分析[J]. 中南公路工程, 2003,28(3)
- [5] 张建民, 郑皆连, 秦荣. 拱桥稳定性研究与发展[J]. 广西交通科技, 2000,25(12)