

# 某飞雁式拱桥结构设计分析

Structural design and analysis of a flying goose arch bridge

张建强

Zhang Jianqiang

(中国华西工程设计建设有限公司 610031)

(China Huaxi Engineering Design and Construction Co., Ltd. 610031)

**摘要:** 飞雁式拱桥结构优美,随着钢管混凝土材料的使用使该类型结构跨越能力大大提升,更加适合于城市建设对环境要求高、景观协调性强的区域。本文结合对某飞雁式拱桥的设计总结,包括对主拱、边拱、副拱、吊杆及系杆等结构的计算分析结论,可为类似桥梁的设计建设提供参考。

**Abstract:** with the use of concrete filled steel tube (CFST), the spanning capacity of this type of structure has been greatly enhanced, and it is more suitable for urban construction in areas with high environmental requirements and strong coordination of landscape. In this paper, the design of a flying goose arch bridge is summarized, including the main arch, side arch, auxiliary arch, hanger bar and tie bar, which can provide reference for the design and construction of similar bridges.

**关键词:** 飞雁式、钢管混凝土、中承式拱桥、T构、可换式系杆

**Key words:** flying goose type, concrete-filled steel tube, half-through arch bridge, t-frame, replaceable tie bar

## 1. 工程概况

某大桥总长 573 米,跨越水面宽度约 380m 的大型河流,是连接老城区和新城区的重要交通枢纽,该河流为通航河流,航道位于左侧边跨内。其中主桥全长 356m,采用弯月形钢管混凝土复合式拱桥,其主桥具体孔跨布置为 75m+206m+75m,边中跨比为 0.364。主桥主跨为净跨径 196 米的中承式钢管混凝土拱,两侧边跨为上承式钢筋混凝土悬臂半拱;采用柔性系杆来平衡拱的不平衡推力。桥面纵坡以跨中为最高点,两侧均为 -2.5%,桥面横坡为 1.5%。桥面总宽 27.34m,组成为 3m 人行道+2.92m 结构空间+15.5m 车道+2.92m 结构空间+3.0m 人行道。

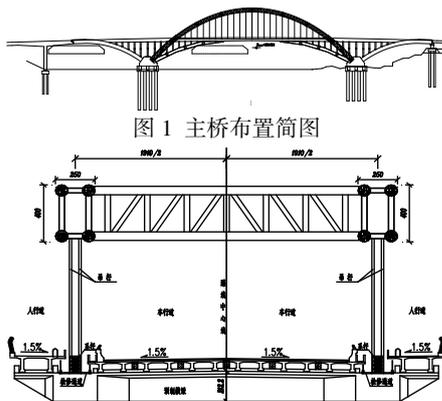


图1 主桥布置简图

图2 主桥桥面布置图

## 2. 主要技术标准

- 道路等级: 城市主干道,双向四车道
- 设计速度: 40km/h
- 桥梁宽度: 净 15.5m+2×3.0m 人行道,主桥全宽 27.34m,引桥全宽 21.5m
- 荷载等级: 主桥: 城-A
- 人群荷载: 主桥 2.875KN/m<sup>2</sup>,引桥 3.5KN/m<sup>2</sup>
- 航道等级: IV(3),通航净空为 55×8m,最高通航水位采用 H<sub>33.3%</sub>=247.00m
- 设计洪水频率: 1/100
- 地震动峰值加速度: 0.05g

## 3. 主桥设计

### 3.1 主桥概述

主桥为飞雁式钢管混凝土拱桥,全长 356m,孔跨布置为 (75m+206m+75m),边中跨比为 0.364。主跨为由主拱和副拱组合构成的弯月形复合式拱,计算净跨 196 米,结构为钢管混凝土拱。边跨为钢筋混凝土半拱;采用预应力钢绞线柔性系杆来平衡拱的不平衡推力。主桥横桥向平行布置两榀拱肋,其横向轴距为 19.1m,中间通过吊杆吊预制横梁和立柱连接横梁,横梁上纵铺桥面板形成行车道系,拱肋外侧设在横梁挑梁上纵铺人行道板形成人行道系。

### 3.2 主拱部分

主拱拱肋采用钢管混凝土桁架式结构,拱轴线采用悬链线,计算跨径 L=196m,计算矢高 f=49m,矢跨比 f/L=1/4。

主拱拱肋为 4 肢钢管桁架式断面,每一拱肋为两片由腹杆钢管与上、下弦杆钢管焊接形成的桁架片横向连接形成。桁架横向采用平联钢管将两片桁架片连接为一整体,组成一条拱肋。拱肋钢管桁架为等截面布置,拱肋高 4.0m,宽 2.50m。上、下弦杆钢管均采用  $\phi 800 \times 14\text{mm}$  的直缝焊接钢管。腹杆及平联钢管采用  $\phi 351 \times 10\text{mm}$  无缝钢管。桁架主弦管及腹杆、平联均采用 Q345C 钢材。拱肋的上、下弦钢管内灌注 C50 微膨胀混凝土,形成钢管混凝土组合受力构件。

主拱拱脚 8.8m 长度范围内考虑锈蚀及洪水期漂流物或船只撞击的可能性,采用 C50 混凝土外包,形成空心箱形截面,截面高 4.3m,宽 2.8m。拱脚 8.8m 以上至桥面以下为保证钢结构的耐腐蚀性,采用每根钢管外包 10cm 的钢筋混凝土。

两片钢管拱肋间距 19.1 米,其间共设置 11 道风撑。风撑布置纵向桥面以上为 18m,桥面以下每侧设 2 道。风撑除桥面以上第一道为“K”型撑以外,其余均为“一”字型钢管桁架,风撑钢管均采用 Q345C 钢材。

主拱采用缆索分段吊装,分为 7 段吊装,最大吊装重量 50T。最大吊装长度 35 米。

### 3.3 边拱

边拱拱肋采用钢筋混凝土结构,拱轴线为悬链线,拱轴系数 m=1.65,拱肋为悬臂半拱。边拱计算跨径 L=55.1355m,计算矢高 f=18.4613m,矢跨比 f/L=1/5.973。

边拱采用钢筋混凝土箱形截面,截面高 3.8m,宽 2.8m,顶底板厚 40cm,腹板厚 30cm,混凝土标号为 C60。边拱在桥面部分与横梁形成整体,桥面以下部分每隔 12m (两道立柱) 设一道钢筋混凝土横撑将左右两片拱肋连成一个整体。横撑采用箱形截面,高 3.5m,宽 2.0m,顶底板及腹板均厚 20cm,混凝土标号为 C50。边拱设置系杆的检修更换通道。

### 3.4 副拱

副拱不作为受力结构,采用钢管桁架结构,每片拱肋由4肢 $\phi 351 \times 10\text{mm}$ 的无缝钢管组成,各弦之间由 $\phi 146 \times 5\text{mm}$ 无缝钢管腹杆和平联连接成整体,为保证桥梁的整体美观性,桁架外贴2mm厚的钢板形成矩形截面。标准段截面高3.0m,宽2.05m,在跨中部分高1.5m,宽2.05m。左右两片拱肋之间设横撑连接。横撑由 $\phi 195 \times 8\text{mm}$ 的无缝钢管构成主弦, $\phi 108 \times 5\text{mm}$ 的无缝钢管构成腹杆和平联,横撑宽2.0m,高度以横撑的主弦中心线与副拱主弦中心线相交为准。全桥共设11道副拱横撑。

### 3.5 系杆系统

本桥系杆采用环氧喷涂钢绞线成品系杆,为可更换式。每一拱肋设8束成品系杆索,单束系杆由37根直径15.2mm的环氧喷涂钢绞线外套PE层构成索体。钢绞线的抗拉强度标准值 $f_{pk}=1960\text{MPa}$ ,每束系杆钢束破断荷载为9635kN。系杆拉索设置于系杆保护箱内,由专用系杆支撑架支撑于横梁顶,系杆两端锚固于边拱拱肋端。

系杆张拉采用两端张拉方式,施工中与主拱加载流程配合进行分次张拉,以平衡施工阶段的拱肋恒载推力,并为运营阶段的拱肋活载推力提供部分平衡。

系杆体系采用全新防腐结构及防止索体开裂的新技术,并配套具有在低应力状态下高可靠锚固性能的锚固体系,以有效解决钢绞线在低应力状态下的锚固问题。系杆钢绞线的防腐系统应包含由环氧涂层、油脂层、单根钢绞线PE套、系杆外层HDPE层构成四层防腐体系,以延长系杆拉索的使用寿命。

系杆锚具采用与之配套的可调更换式系杆专用锚具。

### 3.6 吊杆系统

主拱吊杆采用热聚乙烯拉索结构,钢丝为 $\phi 7\text{mm}$ 消除应力镀锌高强度钢丝束,每个吊杆内设61根钢丝,钢丝标准强度为1770MPa。横桥向一片拱肋内设两根吊杆,两根吊杆间距为60cm。顺桥向吊杆间距6m,全桥设26对吊杆。

吊杆锚具采用墩头锚具,设上下锚点分别于拱肋下弦(靠近桥面的两根短吊杆上锚点设于主拱上弦)和横梁底部连接。上锚点采用钢结构焊接锚箱的形式,焊接于主拱肋相应的上下弦上。上锚点为张拉端,吊杆安装时使锚具固定螺母位于锚杯的中间。

下锚点设于横梁底,作为吊杆锚固端。

为确保吊杆的使用性能,设计中吊杆拉索采用双层PE,锚具配弧形矫正装置,要求矫正装置能提供吊杆 $\pm 6$ 度的转角,以减小吊杆二次应力、提高索体防锈蚀性能和减少PE层开裂的现象产生。

### 3.7 副拱吊杆

副拱吊杆为刚性结构。每吊点由两片钢板组成可转动的铰装置。纵向吊点间距为6m。上吊点吊于横梁和主拱下弦上,下吊点设于副拱上主弦上,上下钢板的连接采用销钉栓,销钉可提供水平位移和转动位移。

### 3.8 横梁

本桥横梁体系包括吊杆横梁、立柱横梁、肋间横梁和端横梁。

所有吊杆及立柱横梁均为预应力混凝土构件,采用C50混凝土预制,截面为“T”字型。横梁预应力钢束采用预制完成后一次性张拉到位。吊杆横梁和立柱横梁采用预制吊装施工,单片横梁的最大吊装重为88T。

端横梁为预应力混凝土构件,采用C50混凝土支架现浇。端横梁主要为提高全桥的稳定性而设,故采用大尺寸的实心结构。

### 3.9 桥面系

桥面系由桥面板、钢纤维混凝土现浇层和沥青混凝土铺装层组成。桥面板采用 $\pi$ 形预制板,车行道板梁高70cm,肋宽25cm,人行道板梁高107.9cm,肋宽25cm。车行道板最大吊装重量12吨,人行道板最大吊装重量18吨。

桥面板按先简支后桥面连续设计,对于横梁上方桥面板接头负弯矩区采取于现浇层内增设一层桥面连续钢筋的方法来限制现浇层的裂缝宽度,以减少接缝处裂缝对结构耐久性和整体性的影响。钢纤维混凝土铺装层中的钢纤维能有效地阻止裂缝的发生与扩展,使碳化速度减缓,腐蚀介质难以侵入到混凝土内部,进一步提高了桥面结构的耐久性能。

### 3.10 下部结构设计

主墩拱座采用实体式重力式,横向宽9m,顺桥向长19m,为C40钢筋混凝土结构。主墩基础采用分离式承台群桩基础。承台下接8根桩径2.5m的钻孔灌注桩,行列形式排列,桩基按嵌岩桩设计。

为保证左右拱座的变形协调和全桥稳定性,横桥向两个拱座承台采用三道系梁连接。

## 4. 结构分析

### 4.1 杆系模型简述

结构计算按空间杆系结构进行分析,结构由主拱肋、边拱肋、副拱、横梁及吊杆、立柱、基础和引桥T构等部分组成。

分析中的边界条件为:施工阶段根据支架施工及缆索吊装的顺序设置支座的安装与拆除,成桥状态下为按实际设计情况布置约束条件。墩柱桩基础按m法计算土的弹性约束,按节点弹性支承的形式施加。



图3 计算模型

### 4.2 主拱钢管桁架分析

表1: 施工阶段钢管拱肋特征截面应力(MPa)

| 截面位置 | 拱脚 |      | 1/8 |     | 1/4 |     | 3/8 |     | 拱顶  |     |     |
|------|----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|      | 上弦 | 下弦   | 上弦  | 下弦  | 上弦  | 下弦  | 上弦  | 下弦  | 上弦  | 下弦  |     |
| 最大应力 | 数值 | 56.3 | 169 | 155 | 164 | 143 | 147 | 149 | 119 | 154 | 104 |
| 对应阶段 |    | 成桥   | 成桥  | 成桥  | 成桥  | 成桥  | 成桥  | 成桥  | 成桥  | 成桥  | 成桥  |

表2: 使用阶段钢管拱肋特征截面应力(MPa)

| 截面  | 使用阶段名义正应力      |       |       |
|-----|----------------|-------|-------|
|     | 上弦             | 下弦    |       |
| 拱脚  | $\sigma_{max}$ | 83.4  | 197.0 |
|     | $\sigma_{min}$ | 32.4  | 146.0 |
| 1/8 | $\sigma_{max}$ | 174.0 | 186.0 |
|     | $\sigma_{min}$ | 143.0 | 153.0 |
| 1/4 | $\sigma_{max}$ | 163.0 | 168.0 |
|     | $\sigma_{min}$ | 133.0 | 131.0 |
| 3/8 | $\sigma_{max}$ | 178.0 | 144.0 |
|     | $\sigma_{min}$ | 133.0 | 95.4  |
| 拱顶  | $\sigma_{max}$ | 182.0 | 122.0 |
|     | $\sigma_{min}$ | 144.0 | 84.5  |

施工及成桥阶段钢管桁架拱肋均满足规范要求;使用阶段下名义正应力的控制断面为拱脚断面,钢管最大压应力 $197.0\text{MPa} < [\sigma] = 210\text{MPa}$ ,满足规范要求;任何工况中钢管均未出现拉应力,充分的发挥了钢管混凝土的优势。

钢管混凝土桁架极限承载能力检算均满足规范要求。

表3: 主拱拱肋控制截面极限状态组合内力

| 截面 | Nmax |   | Nmin |   | Mmax |   | Mmin |   |
|----|------|---|------|---|------|---|------|---|
|    | N    | M | N    | M | N    | M | N    | M |
|    |      |   |      |   |      |   |      |   |

|     |       |        |       |        |       |       |       |         |
|-----|-------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|---------|
| 拱脚  | 67840 | -43100 | 51330 | -54350 | 54620 | 3390  | 65020 | -101200 |
| 1/8 | 55310 | -2377  | 41330 | -4602  | 43970 | 10080 | 53210 | -14810  |
| 1/4 | 49720 | -5096  | 37010 | -1723  | 38840 | 13510 | 48230 | -14460  |
| 3/8 | 45850 | 5510   | 34040 | 7882   | 43110 | 28260 | 37220 | -10770  |
| 拱顶  | 44230 | 18920  | 32850 | 13570  | 42130 | 30970 | 35360 | -813    |

4.3 主拱腹杆及平联分析

主拱为桁架结构，腹杆有两种结构，一是φ400×10的圆管，二是拱脚外包段采用的钢板焊接矩形管。平联有两种，一是一般段采用的φ400×10的圆管，二是吊杆处采用的钢板焊接矩形管，所有腹杆和平联采用的都是Q345材质。平联和腹杆按容许应力法检算，通过空间建模计算，得出主拱腹杆及平联均满足要求，最大应力140MPa。吊杆平联由于其特殊性，其安全系数应同吊杆甚至要大于吊杆的安全系数，本桥为345/87.8=3.93，大于吊杆规范允许值。

4.4 边拱分析

边拱按普通钢筋混凝土结构进行设计，均满足规范要求

4.5 副拱分析

副拱采用钢管桁架结构，主弦管为φ351×8mm，材质为Q235C，副拱不作为受力结构，它主要承受自身重量和极少的活载。检算按容许应力法检算主弦的使用应力

通过计算副拱上弦最大应力为86MPa，下弦的最大应力为79.3MPa，均满足要求。

4.6 吊杆内力分析

主吊杆采用横向双吊点，型号为61φ7的成品吊杆索，吊杆为无应力安装。通过计算：吊杆内力基本均匀，恒载最小值505kN，恒载最大值829kN。吊杆最终的张拉调整力可按Fi=700kN(拱肋张拉端平均值)考虑。吊杆活载最大受力为1#吊杆的靠内侧一根，其值为1164kN，内力变化幅度最大的吊杆是9#吊杆(副拱端的第一组吊杆)的靠内侧一根。φ7钢丝吊杆破断力为4155kN。本桥吊杆最小安全系数为K=3.57>[K]=2.5。吊杆运营阶段的汽车、人群及温度活载下最大应力变化幅度：Δσ=176MPa<200MPa，即吊杆疲劳强度满足规范中的建议要求。

4.7 系杆内力

系杆运营阶段的最大拉力为4052kN,应力为785MPa,相对其极限强度的比值为:785/1960=0.399,即σmax=0.399f<sub>tk</sub>,系杆强度满足要求。系杆运营阶段的由使用荷载引起的应力变化幅度很小,只有19MPa,系杆疲劳强度满足规范要求。

系杆的主要作用为平衡恒载推力及部分活载推力。本桥计算中最大车道活载推力为-2219kN(向边跨),最小汽车活载推力为134(向河心);人群活载推力最大推力为-877kN(向边跨),最小人群活载推力为179(向河心);温度变化产生的不平衡推力为593kN,运营阶段拱脚荷载不平衡推力为:最大3096kN(向边跨),最小=313kN(向河心)。系杆张拉完成后的不平衡推力反向储备最小为845kN(左墩),最大为879kN(右墩)。即左墩能平衡27.2%的活载推力,右墩能平衡28.4%的活载推力,其余活载推力由主墩承担。若按作用的长期效应组合的频遇值系数(汽车0.4,人群0.4)计算,活载推力为1238kN,该值基本被系杆力所平衡。所以系杆张拉力设计合理。

5. 其它偶然工况分析

偶然工况除地震外还需考虑洪水冲击、飓风、船撞等按规范本桥的设计洪水频率应为1/300,但是由于受城市建设规划控制,实际按照1/100的设计洪水频率进行设计,但必须考虑极端频率1/300工况下桥梁的安全,考虑洪水期同时风速也大,故同时考虑100年一遇的风力作用于水面上桥梁结构上。同时该桥跨越四级航道,边拱需考虑极端船撞的风险。

表4 风力、流水冲击力及船撞作用下构件位移汇总表

| 结构部 | 横桥向 (mm) | 顺桥向 (mm) |
|-----|----------|----------|
|-----|----------|----------|

| 位    | 流水   | 风力   | 船撞    | 流水    | 风力    | 船撞   |
|------|------|------|-------|-------|-------|------|
| T构梁体 | 0.1  | 0.6  | 1.04  | 0     | 0.02  | 0.04 |
| 边拱   | 0.24 | 1.64 | 6.02  | 0.004 | 0.29  | 0.39 |
| 主拱   | 0.23 | 41.7 | 3.35  | 0.05  | 0.167 | 0.27 |
| 副拱   | 18.2 | 53.8 | 340.7 | 0.2   | 0.62  | 3.8  |
| 桥面系  | 0.3  | 20.3 | 5.06  | 0.01  | 0.39  | 0.33 |

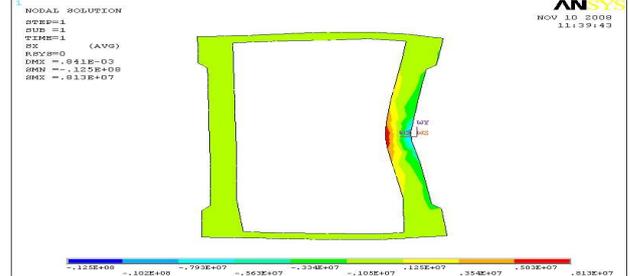


图4 船撞局部分析

为保证主桥在使用状态下使人不产生恐慌感,需保证有良好的刚度,表4为桥梁在个偶然荷载下的位移值,可以看出,各构件的位移值均很小,桥面系最大位移为20mm,对行人车辆的影响均可忽略。

6. 结语

该桥构思新颖、独特,采用主副拱组合、生动的勾勒出了一轮明月。

整个结构通过计算分析,满足规范要求,各主要构件使用应力均在规范允许范围内。但是该桥型结构复杂,施工步骤较多,且各环节具体的施工顺序和加工时间,加载步骤直接影响到桥的内力、应力状况。施工单位在施工时严格按照图纸提供的加载步骤和监控数据数据实施,确保了桥梁的顺利竣工,取得了良好的社会效益。

一般飞雁式拱桥边跨采用桥墩支撑边拱,该桥由于通航需求,左边跨无法设置桥墩,设计采用T构形式作为边拱的支承,既满足了通航需求,又不破坏飞雁式拱桥的优美,可为有类似需求的项目提供参考。

参考文献:

- [1]上海市市政工程设计研究总院,城市桥梁设计规范[S],中国建筑工业出版社;
- [2]中交公路规划设计院有限公司,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S],人民交通出版社有限公司;
- [3]福州大学,钢管混凝土拱桥技术规范[S],中国计算出版社;
- [4]四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院,公路钢管混凝土拱桥设计规范[S],人民交通出版社;
- [5]重庆交通科研设计院,公路斜拉桥设计细则[S],人民交通出版社;
- [6]陈宝春,钢管混凝土拱桥(第三版)[M]人民交通出版社2016年9月
- [7]陈宝春 韦建刚 吴庆雄,钢管混凝土拱桥技术规程与设计应用[M],人民交通出版社2011年10月;
- [8]钟善桐,钢管混凝土结构[M],黑龙江科学技术出版社;
- [9]赵廷衡,桥梁钢结构设计细则[M],西南交通大学出版社;
- [10]冯明友 钢管混凝土拱桥设计[J] 城市道桥与防洪2017年第11期

作者简介:张建强(1977-),男,高级工程师,注册土木工程师(道路)、注册咨询师(投资)、注册一级建造师,主要从事桥梁设计、技术咨询工作。