

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.09.039

# 多跨连续蝶形拱梁组合体系桥梁结构设计与分析

王 帅

(陕西省交通规划设计研究院有限公司, 陕西 西安 710000)

**摘 要:** 钛谷渭河大桥是位于宝鸡市代马组团, 沟通渭河南北两岸的重要通道。主桥为下承式连续蝶形拱梁组合体系结构, 拱圈为组合式蝶形拱圈, 造型独特, 受力复杂。主要介绍该桥的设计思路与受力特点, 并对整体与局部进行了建模分析计算。

**关键词:** 蝶形拱; 多跨连续梁; 拱梁组合

**中图分类号:** U442.5

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2023)09-0166-05

## 1 工程概况

宝鸡钛谷渭河大桥处于宝鸡市代马组团, 是沟通渭河南北两岸的重要通道, 将与盘龙大桥一起成为行政中心与高新区的主要连接枢纽。设计起点为现状钛谷路与高新路(规划)交叉处, 沿现状钛谷路往北连续跨越滨河南路、渭河、北侧河堤路、滨河北路、连霍高速、高速辅路后与与龙岗路顺接, 终点位于龙岗路与行政大道交叉口, 路线全长约1.455 km。通过适当提高宝鸡渭河南北岸跨河桥梁的布局密度, 加强了南北客流联系的便利程度, 为远期南北交通提供充足的富余量。



图1 主桥效果图

主桥桥长460 m, 桥宽30.5 m。主梁为预应力混凝土变截面连续箱梁。拱圈是通过横撑、斜撑和三根拱肋钢管组成的组合式拱圈, 主拱内填充C50自密实补偿收缩混凝土, 三根钢管均为抛物线, 主拱直径1.8 m, 矢跨比1/5.5, 位于竖直平面内; 两根副拱直径1.5 m, 矢跨比4.25, 由竖直平面向两侧旋转19.081°得到。横撑采用外径60 cm, 壁厚20 mm的

钢管; 斜撑采用外径70 cm, 壁厚20 mm的钢管。吊索采用挤压锚固钢绞线拉索体系。主桥总体布置与横断面布置如图2、图3所示。

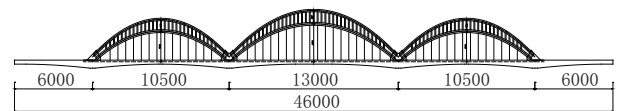


图2 主桥上部总图布置图(单位: cm)

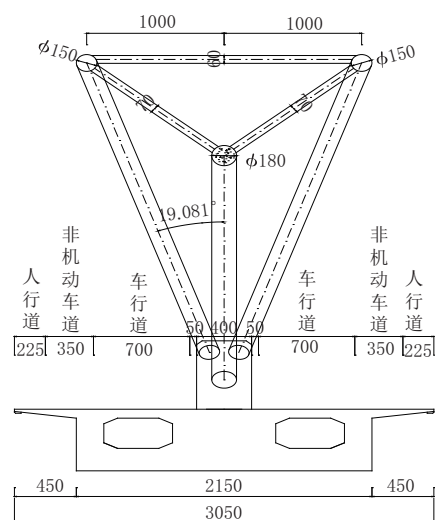


图3 主桥横断面布置(单位: cm)

## 2 主要技术标准

- (1) 设计标准: 城市次干路。
- (2) 桥梁: 城市桥梁。
- (3) 设计速度: 主路40 km/h。
- (4) 设计荷载: 城-A级。
- (5) 设计桥梁宽度: 2.25 m(人行道)+3.5 m(非机动车道)+7.0 m(机动车道)+0.5 m(路缘带)+4.0 m(拱肋区)+0.5 m(路缘带)+7.0 m(机动车道)+3.5 m(非机动车道)+2.25 m(人行道)=30.5 m。
- (6) 洪水频率: 1/100(设计流量7 275 m<sup>3</sup>/s, 设计

收稿日期: 2022-10-10

作者简介: 王帅(1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁结构设计工作。

水位 564.9 m)。

(7)地震设防烈度:抗震设防烈度为 8 度,构造措施按 9 度设防。

(8)桥梁设计基准期:100 a,设计安全等级为一级。

### 3 结构设计

#### 3.1 主梁设计

结构总体设计采用刚性主梁柔性拱的蓝格尔拱体系,由于拱的存在,对次边跨及中跨有一定程度的加劲与封闭作用,在很大程度上阻止了中跨与边跨之间荷载的相互传递,主墩支点几乎成了相邻两跨的隔离点。边跨与次边跨、中跨的内力影响大为减弱,边跨很难出现负反力,因此可以大大降低边跨的跨径,提高主桥通航能力。但主桥的布孔还要考虑施工方法与全线的结构布置,边跨与匝道相交须加设变宽段,故本桥边中跨比并未降低,而采用对全线更合理的边中跨比,主桥跨径布置为(60+105+130+105+60)m。

因钛谷大桥横跨渭河,主桥施工考虑经济性因素采用悬臂浇筑法,可通过吊杆张拉调整拱与梁的分担比例,即为方便施工,拟依靠预应力混凝土主梁承担主要结构自重,蝶形拱结构辅助主梁承担二期恒载与活载。与普通刚构施工不同,悬浇段长度采用等长划分,主要考虑吊杆与横梁间隔固定,若为平衡梁段重量采用不等长悬浇段,则内模板难以重复利用,施工效率大大降低,故将施工节段划分为 15 个 3m 的悬臂浇筑节段。0 号块长度的设计主要考虑拱座与 0 号块为整体结构,由于拱肋管径较大,根据《公路钢管混凝土拱桥设计规范》(JTG/T D65-06—2015)8.2.8 条的构造要求,拱座尺寸也相应较大,故 0 号块长度设计为 12 m。全桥的施工划分为边跨 7 m 现浇段、2 m 边跨合龙段、15×3 m 悬浇段、12 m 零号块、3 m 次边跨合龙段、3 m 中跨合龙段及 22 m 中跨现浇段。其中,22 m 中跨现浇段在河道中搭支架现浇,待拱肋施工完毕拱架拆除后及时拆除满堂支架,确保结构受力明确。

主梁跨中梁高 3 m,墩顶梁高 5.5 m,采用 1.8 次抛物线变化;顶板厚 32 cm,底板厚 32~70 cm;腹板由 55 cm 变化至 80 cm;悬臂长度 4.5 m。在吊索锚固张拉处设置矮横梁,矮横梁高度 1.2 m。吊杆处标准截面如图 4 所示。

钛谷大桥拱肋为单槓拱肋,吊索布置在横断面

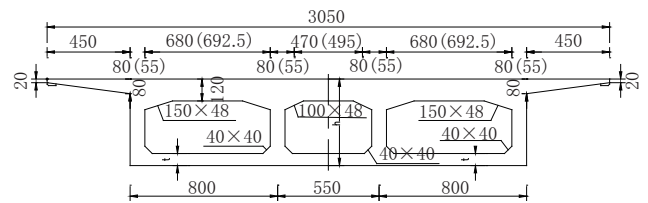


图 4 吊杆处标准横截面(单位:cm)

中心,故将主梁断面设计为中箱室小、边箱室大的单箱三室断面,从而加大中箱室刚度,保证拱梁传力。横梁设置主要有三种方法,在中箱设置矮横梁、横向通长设置矮横梁、通长设置横隔板。通过 MIDAS FEA 局部建模分析计算,仅在中箱设置矮横梁导致中腹板产生较大拉应力,通长设置矮横梁仅在中箱倒角处产生较小拉应力,通长设置横隔板受力最优。若通长设置横隔板,混凝土方量过大,且因箱室大而封闭,采用钢模板难拆模、拼接缝过多而导致浇筑质量差,故考虑施工因素,选用通长矮横梁方案。

预应力设计基本与普通刚构结构相同,但由于中跨存在现浇段,须加强中跨底板束的纵向预应力,且因拱肋设计为柔性拱,而相较于刚构,本桥主梁梁高较低,中跨刚度略低,故需在 0 号块设置局部短束,避免墩顶处出现拉应力。

#### 3.2 拱肋设计

拱圈是通过横撑、斜撑和三根拱肋钢管组成的组合式拱圈,主拱内填充 C50 自密实补偿收缩混凝土,三根钢管均为抛物线,主拱直径 1.8 m,壁厚 30 mm,矢跨比 1/5.5,位于竖直平面内;两根副拱直径 1.5 m,壁厚 25 mm,矢跨比 4.25,由竖直平面向两侧旋转 19.081°得到。

由于拱圈造型特殊,整体稳定性较差,又因市政桥梁对于美观要求性高,须在尽可能不考虑两侧设置风揽的前提下提高整体稳定性。通过 MIDAS CIVIL 整体建模对比分析,采用同样的主副拱肋管径,是否灌注混凝土、调整吊杆力对稳定性影响较小,而调整斜、横撑管径可大大加强主副拱之间的连接从而提高稳定性,但过大的斜横撑管径既影响美观,也会导致钢管布置净距难以满足规范要求。故设置了不同的斜横撑管径,横撑采用外径 60 cm,壁厚 20 mm 的钢管;斜撑采用外径 70 cm,壁厚 20 mm 的钢管。

由于主拱管径较大,且与吊杆、斜撑锚固连接,若不灌注混凝土易引起局部钢管变形,影响结构安全,故主拱采用钢管混凝土结构;副拱为空钢管结构,在每组斜横撑交汇处设置三道环向加劲肋保证局部受力安全。

### 3.3 吊索设计

吊杆间距一般取 4~8 m, 主要考虑对称设置, 为避免短吊杆过短可能产生的疲劳问题, 以及长吊杆过长导致的主梁变形过大问题, 取吊杆间距为 6 m, 次边跨无索区长度为 13.5 m, 共设置 14 根吊索; 主跨无索区长度 14 m, 共设置 18 根吊索。次边跨吊索最不利工况下拉力为 1 510~1 624 kN, 采用 3.0 安全系数设计, 选用 OVM.GJ15-19 挤压锚固钢绞线拉索体系; 中跨吊索最不利工况下拉力为 2 857~2 941 kN, 采用 3.0 安全系数设计, 选用 OVM.GJ15-37 挤压锚固钢绞线拉索体系。

## 4 结构分析

### 4.1 整体模型计算分析

采用 MIDAS CIVIL 对桥梁进行分析计算, 并以《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015) 和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004) 为标准, 按全预应力混凝土结构进行验算。有限元离散模型节点 748 个, 单元 1 200 个, 边跨支座采用弹性连接模拟, 桥墩处约束采用一般支撑模拟 (见图 5)。



图 5 整体计算模型

设计中考虑了以下荷载:

- (1) 结构自重 (自重系数 1.04);
- (2) 18 cm 沥青混凝土桥面铺装、栏杆等二期恒载;
- (3) 城 -A 级活载, 按双向 6 车道布置;
- (4) 正负温度梯度;
- (5) 整体升降温 22℃;
- (6) 静风荷载。

### 4.2 整体计算结果

#### 4.2.1 主梁计算结果

按照公路混规 (JTG D62—2004) 第 5.1.5 条  $y_{os} \leq R$  验算, 结构重要性系数  $\times$  作用效应的组合设计最大值均小于等于构件承载力设计值, 满足规范要求, 见图 6。

按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004) 第 6.3.1-1 条验算:  $\sigma_{st} - 0.80 \sigma_{pc} = 9.34 \text{ MPa}$ , 满足规范要求, 见图 7。

按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004) 第 7.1.5 条验算:

$$\sigma_{kc} + \sigma_{pt} = 17.24 \text{ MPa} \leq 0.5 f_{ck} = 17.75 \text{ MPa}$$

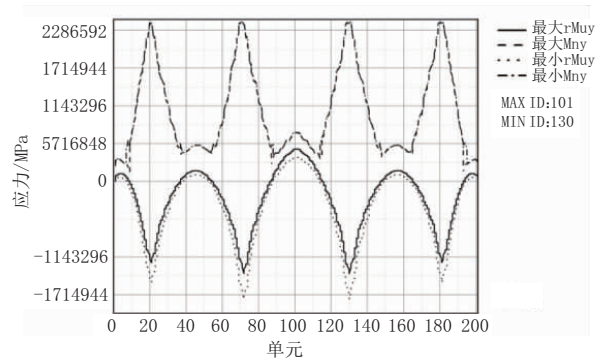


图 6 正截面抗弯承载力验算结果图形

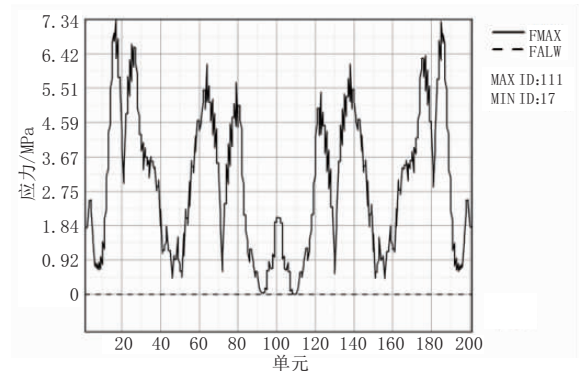


图 7 结构正截面抗裂验算结果图形

其中:  $\sigma_{kc}$  为混凝土法向压应力;  $\sigma_{pt}$  为预加力产生的混凝土法向拉应力, 满足规范要求, 见图 8。

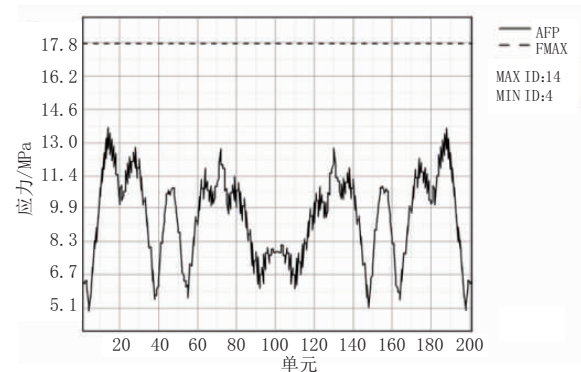


图 8 正截面混凝土法向压应力验算结果图形

按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004) 第 7.1.6 条验算:  $\sigma_{cp} = 17.24 \text{ MPa} \leq 0.6 f_{ck} = 21.30 \text{ MPa}$ , 满足规范要求, 见图 9。

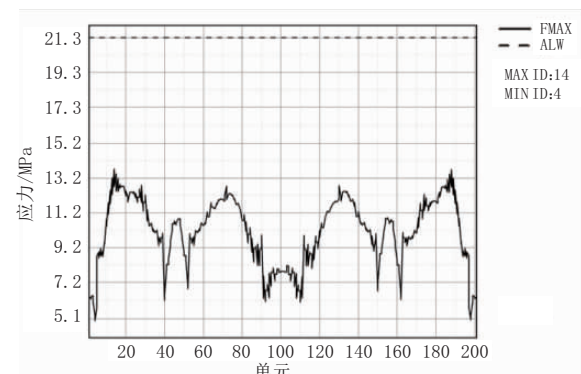


图 9 斜截面混凝土的主压应力验算结果图形

按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)第 7.2.8 条验算: $\sigma_{tec}=19.56\text{MPa}\leq 0.70 f'_{ck} = 19.88\text{MPa}$ ,满足规范要求,见图 10。

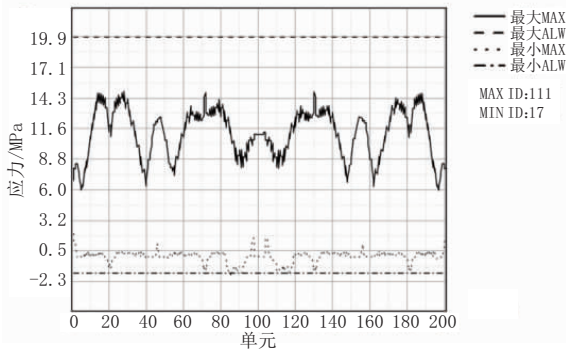


图 10 短暂状况构件应力验算结果图形

### 4.2.2 吊杆成桥内力

为方便河道施工,通过调整吊杆力的方式分配拱梁内力,使得混凝土主梁可承担自身自重与施工临时荷载,蝶形拱圈协助主梁承担二期恒载与活载,以便采用悬臂浇筑的施工工艺,全桥合龙后,在桥面架设蝶形拱结构。

根据上述设计原则,得到吊杆成桥内力如下:

成桥状态下,吊杆承担所有恒载的比例约 11.6%,其合力已超过全部二期恒载,可以看出,通过吊杆张拉,拱圈大比例分担二期恒载,并帮助主梁分担其自重荷载,达到设计要求,成桥索力见图 11 与图 12。

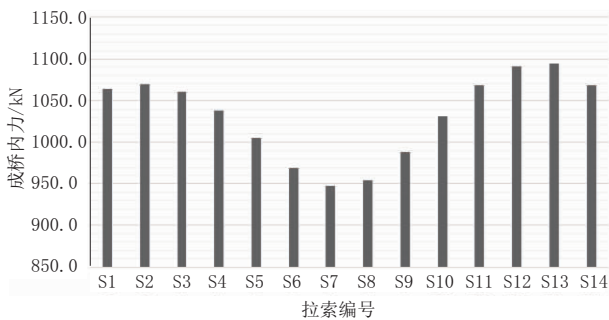


图 11 边跨吊杆成桥内力图(kN)

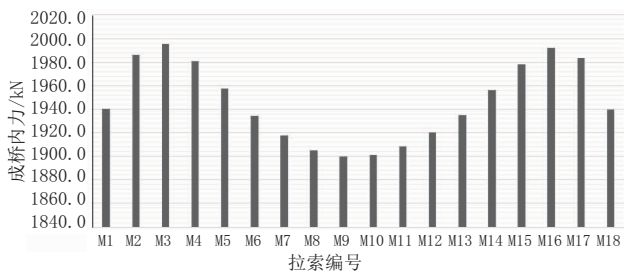


图 12 中跨吊杆成桥内力图(kN)

### 4.2.3 拱圈整体计算结果

拱圈主要构件结果见表 1。

### 4.3 整体稳定性计算结果

一阶稳定系数为 6.24,失稳模态如图 13 所示。

表 1 各主要钢构件应力表

构件	最大应力 /MPa	最小应力 /MPa
主拱肋钢管	-42.2	-181.3
主拱肋混凝土	-3.9	-20.3
副拱肋钢管	-15.3	-162.1
斜撑	137.2	-134.9
横撑	18.4	-17.5

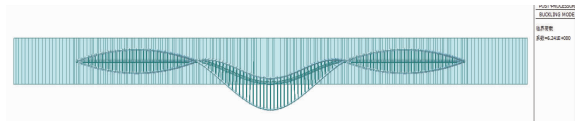


图 13 一阶整体失稳模态

### 4.4 拱座局部计算结果

拱座局部实体模型图(见图 14)。

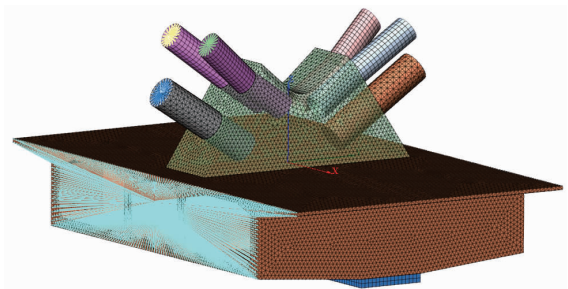


图 14 拱座局部实体模型

由于拱座不仅承受拱肋传来的巨大轴向力,同时还收到主梁传来的巨大内力,在拱肋和主梁作用下拱脚处于复杂的空间受力状态;同时拱座是一个不规则的实体构造,此类不规则的复杂受力构件难以通过杆系模型计算其受力状态,须建立有限元空间实体模型分析。本次局部计算选取边中跨拱肋、拱座及主梁 0 号块结构进行实体建模分析,采用大型通用有限元软件 MIDAS FEA 建立拱座局部模型,拱肋钢管采用板单元,混凝土采用实体单元,于 0 号块中心 4 m 范围内建立支座垫石并施加固结约束。实体模型建立考虑施工阶段,即按照实际施工顺序先激活主梁单元及自重,后激活拱座及拱肋单元并施加拱肋内力(见图 15)。



图 15 拱座分析结果图

根据拱座模型对拱座的主拉应力和主压应力分别进行了计算,计算结果如下:

#### (1)主拉应力

拱座主拉应力整体很小,满足钢筋混凝土受力要求。主拱肋与拱座连接处及拱脚与主梁连接处较大,最大应力值接近 3 MPa,但其范围很小。拱座由于次边跨与中跨拱肋在拱座内部的轴向挤压作用,表面产生平均 1 MPa 的主拉应力,理论上虽不影响结构的受力安全,但稳妥考虑,在拱座外部外包钢板对拱座混凝土起套箍作用并防止了表面开裂引起的钢筋锈蚀锈胀问题。

#### (2)主压应力

主压应力主要分布在  $-1.0\sim-5.4$  MPa,局部最大主压应力达到  $-18$  MPa。

## 5 结 语

市政桥梁不同于公路桥梁,对美观要求更高,结构整体造型与梁高的选取尤为重要,同时必须兼顾经济性,需在美观性和经济性间找到合理的平衡。在结构造型推陈出新的同时,安全性始终是设计的第一道红线,对于参考桥型不能盲目套用,结构参数宜重新设计计算。由于市政桥梁大都造型独特,结构复杂,施工可行性和安全性必须纳入到设计的重要考虑因素中,同时施工必须严格按照设计的方法和步骤进行,以确保受力状态满足设计要求。

#### 参考文献:

- [1] 顾安邦.向中富.桥梁工程(下册)[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [2] 陈宝春.钢管混凝土拱桥设计与施工[M].北京:人民交通出版社,1999.

---

## 《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿邮箱:cdq@smedi.com 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com