

# 扬州江广快速路连续钢桁架拱桥设计及计算

鄢余文, 孙一鸣

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

**摘要:** 结合扬州江广快速路茱萸湾大桥工程实例,系统介绍了工程概况、主要技术标准、总体布置、结构设计、结构计算,详细论证了连续钢桁架拱桥的主桁架、桥面系、组合桥面板、吊杆和系杆设计关键技术,对结构整体静力、动力、稳定、组合桥面板进行了深入计算分析,为类似桥梁工程建设提供参考。

**关键词:** 江广快速路;茱萸湾大桥;连续钢桁架拱桥;组合桥面板;稳定分析

**中图分类号:** U442.5

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2022)10-0081-04

## 1 工程概况

扬州江广快速路是扬州市中心城区快速路网的重要一横,是扬州主城区向东连接生态科技新城、江都区的快速通道,是市区与扬州东站高铁枢纽的集散通道。

江广快速路控制性工程——茱萸湾大桥跨Ⅱ级航道京杭大运河,主桥主跨 140 m,桥面总宽 53.2 m,布置双向 8 车道加人非车道。

大桥方案遵循“运河之城、时代巨轮、华美乐章”的设计理念。主桥采用下承式连续钢桁架拱桥,整体造型似一艘巨轮,致敬扬州悠久的运河文化。本桥刚劲的桁架与附近万福大桥柔性的主缆交相辉映、刚柔并济。主桥三片曲线形的桁架拱,外形优美流畅、现代大方,配以炫丽的景观亮化照明,谱写华美乐章,为扬州增添新的城市景观(见图 1)。



图 1 扬州江广快速路茱萸湾大桥建成实景

## 2 主要技术标准

(1)道路等级:城市快速路,设计车速 80 km/h。

收稿日期: 2022-01-26

作者简介: 鄢余文(1978—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁工程设计工作。

(2)设计荷载:汽车荷载采用城-A级,人群荷载按《城市桥梁设计规范》计取。

(3)通航标准:京杭大运河为Ⅱ级航道,设计最高通航水位 7.80 m,最低通航水位 3.33 m,通航净空尺度不应小于 130.43 m×7.0 m(宽×高,矩形断面)。

(4)抗震设防标准:抗震设防烈度 7 度,水平向设计基本地震动加速度峰值 0.15g;抗震设防类别乙类;抗震设防措施等级 8 度。

(5)结构安全等级:一级,重要性系数 1.1。

(6)设计基准期:100 a。

## 3 总体布置

### 3.1 立面布置

茱萸湾大桥的主桥为三跨 42 m+140 m+42 m 连续下承式钢桁架拱桥,采用柔性吊杆、组合桥面系。钢桁架拱整体为弧形曲线,桥梁结构通过钢桁架拱肋、桥面系和系杆构成无推力平衡体系(见图 2)。

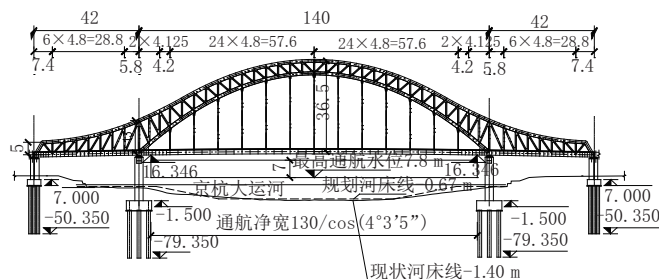


图 2 茱萸湾大桥立面布置图(单位:m)

### 3.2 横断面布置

主桥横断面整幅布置,钢桁架横向往 3 片拱肋,边拱肋宽度 1.2 m,中拱肋宽度 1.8 m。桥面车行道部分为双向 8 车道,两侧设置 4 m 宽非机动车道和 3.5 m 宽人行道,桥面总宽 53.2 m(见图 3)。

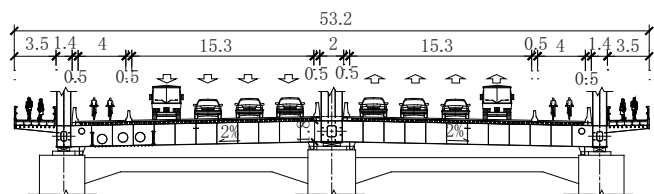


图3 茱萸湾大桥横断面布置图(单位:m)

## 4 结构设计

### 4.1 主桁架

主桥含三片钢桁架拱肋,桁架之间设置5道风撑。拱肋竖直,中心距 $2 \times 22.45$  m。桁架拱肋由上弦杆、下弦杆和腹杆组成<sup>[1]</sup>。

拱顶处上下弦杆竖向中心间距5.0 m。主墩顶处下弦杆与系梁相交于系梁中心,上弦杆中心与系梁中心竖向间距13 m。边墩处主梁中心与上弦杆中心竖向间距5.0 m。

下弦杆采用二次抛物线,下矢高32.0 m,矢跨比为 $1:4.375$ 。上弦杆采用二次抛物线与圆曲线结合,上矢高37 m<sup>[2]</sup>。

桁架腹杆在中跨连接拱肋上下弦杆,在边跨连接上弦杆和主梁。标准桁架节间长度为4.8 m。腹杆分为直腹杆和斜腹杆,斜腹杆方向中跨与边跨方向相反,并以主桥中心对称,全桥呈密布N型钢桁架梁拱结构形式。

钢桁架上下弦杆截面为箱型,中拱肋截面 $1.8$  m $\times$  $1.2$  m(宽 $\times$ 高)、边拱肋截面 $1.2$  m $\times$  $1.2$  m。腹杆为工字型断面,横桥向尺寸与对应的弦杆一致便于连接。

钢桁架在中跨设置5道风撑连接三片拱肋,边跨不设风撑。拱顶风撑为米字型布置,其余4道风撑均为K型布置,风撑截面均为工字型(见图4)。

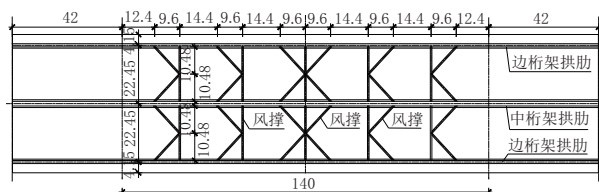


图4 茱萸湾大桥桁架结构平面图(单位:m)

### 4.2 桥面系

桥面系由系梁、小纵梁、中支点横梁、边支点横梁和标准中横梁组成梁格体系组成,并通过底钢板与现浇混凝土板组合成钢-混凝土组合结构桥面系。

系梁与钢桁架拱肋对应布置,共3道,中心距 $2 \times 22.45$  m。中跨系梁与系杆一道参与平衡拱桥的水平分力。系梁为箱型断面,中系梁尺寸为 $1800$  mm $\times$

$1800$  mm(宽 $\times$ 高)、边系梁尺寸为 $1200$  mm $\times$  $1800$  mm(宽 $\times$ 高)。

横梁包括标准中横梁、中支点横梁和边支点横梁,标准间距为3.2 m。标准中横梁为工字型断面,高度 $1800$  mm,翼缘宽度 $600$  mm。

中支点横梁为2道箱型断面,尺寸分别为 $2000$  mm $\times$  $1800$  mm(宽 $\times$ 高)、 $1800$  mm $\times$  $1800$  mm(宽 $\times$ 高),中间通过平联连接形成整体。边支点横梁同样为2道箱型断面,尺寸分别为 $1400$  mm $\times$  $1800$  mm(宽 $\times$ 高)、 $1073$  mm $\times$  $1800$  mm(宽 $\times$ 高),中间通过平联连接形成整体。

横断面上布置两道小纵梁,采用工字型断面,高 $800$  mm,顶板宽 $600$  mm、底板宽 $500$  mm。

人行道布置在两侧拱肋外侧,宽 $3.5$  m(含栏杆)。由钢挑梁、钢纵梁和钢盖板组成。

茱萸湾大桥1/4桥面系布置如图5所示。

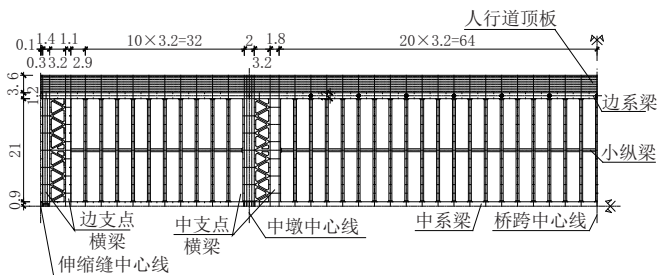


图5 茱萸湾大桥1/4桥面系布置图(单位:m)

### 4.3 组合桥面板

组合桥面板由底钢板、带孔钢板(PBL剪力键)、现浇混凝土、钢筋和焊钉等组成。

组合桥面板与系梁不直接连接,主要支撑在横梁和小纵梁上。底钢板四边焊接在横梁、小纵梁的顶板上,厚度为 $8$  mm。每个由横梁、小纵梁形成的矩形格子间设置一块底钢板。

底钢板上沿顺桥向设置开孔板(见图6),开孔板兼作底钢板的加劲和组合桥面板的剪力键,其标准间距为 $400$  mm;开孔板厚度为 $10$  mm,高度为 $100$  mm,开孔直径为 $50$  mm,开孔间距为 $100$  mm。

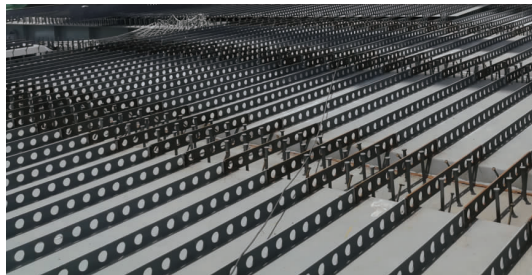


图6 组合桥面开孔板现场照片

现浇混凝土板的标准厚度为 $150$  mm,在与横梁和小纵梁连接处设置加腋,桥面板厚度增加至 $250$  mm。

混凝土采用 C50 低收缩、高抗裂、高韧性的混杂纤维混凝土<sup>[3-4]</sup>。

剪力钉主要布置在横梁、小纵梁顶面和承托处,采用  $\phi 22$  mm 圆柱头焊钉,高度 200 mm,材料为 ML15,剪力钉标准间距为 200 mm  $\times$  200 mm。

组合桥面板构造如图 7 所示。

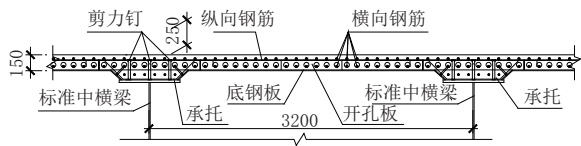


图 7 组合桥面板构造图(单位:mm)

4.4 吊杆和系杆

全桥在中跨对应拱肋共设置 3 排吊杆,每排 13 根吊杆,吊杆间距为 9.6 m。吊杆采用环氧钢绞线,型号为 25 股、31 股、43 股和 55 股  $\phi 15.24$  钢绞线。吊杆采用整束挤压锚固钢绞线拉索体系,梁端和拱端均冷铸锚,其中梁端为张拉端,设置球铰以适应吊杆微小转动。

为平衡拱肋水平推力,在中跨系梁内设置水平系杆,每个系梁内各设置 4 根系杆,中系梁内系杆型号为 37 股  $\phi 15.24$  钢绞线,边系梁内系杆型号为 19 股  $\phi 15.24$  钢绞线。水平系杆索采用环氧钢绞线,设计为可单根安装、张拉和更换,并配套采用相应的锚固、转向和分丝转向装置。

桥梁采用先拱后梁的施工方法。在施工过程中,设置临时系杆,以平衡体系转换前桁架拱的水平推力,每片拱肋设置 2 根临时系杆。

5 结构计算

5.1 整体静力计算

(1)计算模型。主桥整体计算采用 Midas Civil 进行空间有限元建模,桁架拱及桥面梁格体系采用梁单元模拟,组合桥面板采用双层板单元,吊杆和系杆采用桁架单元。

(2)计算荷载。汽车荷载按城 -A 级,人群荷载按 2.4 kPa 考虑。梯度温度按顶板升温 15℃,降温 7.5℃ 计算,风荷载取 1.6 kPa。

(3)钢结构强度验算。结构安全系数取 1.1,按规范要求的基本组合进行验算,取最不利工况验算结果。经验算,钢桁架拱肋弦杆最大压应力 230 MPa,位于中支点拱脚处;腹杆最大轴向压应力 106.8 MPa,位于边拱肋 1/4 跨处;系梁最大拉应力 190 MPa,最大压应力 206 MPa,均满足规范要求(见图 8 至图 10)。

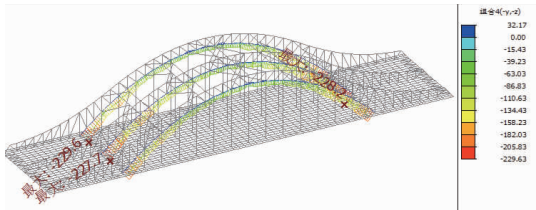


图 8 钢桁架拱肋弦杆正应力图(单位:MPa)

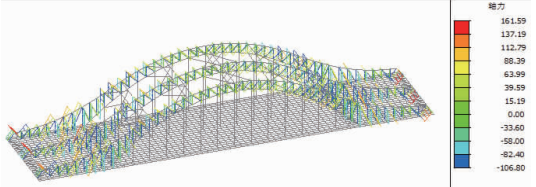


图 9 钢桁架拱肋腹杆正应力图(单位:MPa)

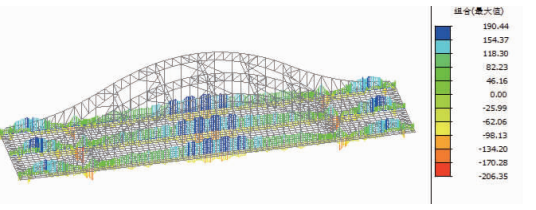


图 10 钢系梁正应力图(单位:MPa)

(4)吊杆和系杆应力。经验算,中拱肋在 1/4 拱跨处吊杆受力最大,最大吊杆应力为 891 MPa,边拱肋也是在 1/4 拱跨处吊杆受力最大,最大吊杆应力 778 MPa。

中系梁内系杆最大拉应力 1 000 MPa,边系梁内系杆最大拉应力 928 MPa。

吊杆和系杆应力均小于规范规定的钢绞线材料抗拉强度设计值。

5.2 动力分析

通过对主桥进行动力特性分析,成桥状态下一阶振型为主拱和主梁跨中竖弯,频率为 1.80(见图 11);二阶振型为主拱和主梁在 1/4 跨反对称竖弯,频率为 1.84。可见主桥具有良好的动力特性<sup>[5]</sup>。主桥前 6 阶典型自振频率和振型特征见表 1。

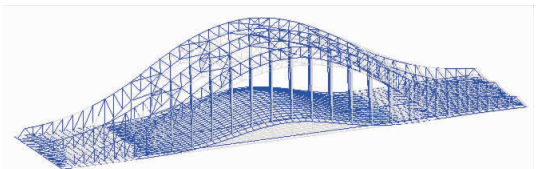


图 11 一阶振型(对称竖弯)

表 1 主桥前 6 阶自振频率

| 振型阶次 | 频率/Hz | 振型描述             |
|------|-------|------------------|
| 1    | 1.80  | 主拱和主梁跨中竖弯        |
| 2    | 1.84  | 主拱和主梁 1/4 跨反对称竖弯 |
| 3    | 2.28  | 主拱和主梁跨中反对称侧扭     |
| 4    | 2.35  | 主拱和主梁 1/4 跨反对称侧扭 |
| 5    | 2.48  | 主梁跨中横弯           |
| 6    | 2.53  | 主梁 1/4 跨对称竖弯     |



### 5.3 稳定分析

钢桁架拱肋的杆件以受压为主,其整体及局部稳定是设计的关键。

稳定计算的荷载考虑恒载、车道荷载、人群荷载和风荷载。采用未考虑初始缺陷的线弹性理论模型进行稳定分析,稳定系数不小于4.0<sup>[6]</sup>。

经计算,恒载作用下,拱肋稳定安全系数为18.1;恒载+活载作用下,拱肋稳定安全系数为15.6,均满足规范要求。一阶失稳模态均为拱肋整体多波节面外失稳,如图12所示。

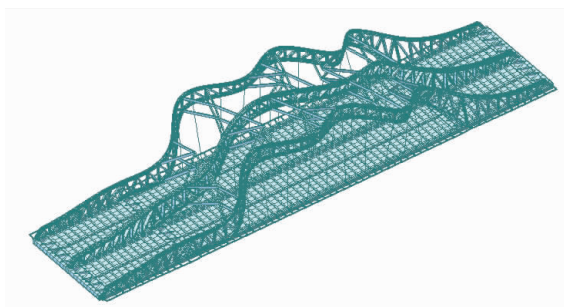


图12 钢桁架拱肋一阶失稳模态

### 5.4 组合桥面板计算

钢-混凝土组合桥面板与混凝土叠合桥面板相比,提高了桥面板的抗弯能力,减小了混凝土板的厚度。同时,底钢板作为浇筑混凝土的底模板,减小了模板的安装和拆除,缩短了工期。

钢-混凝土组合桥面板采用以概率理论为基础的极限状态设计法,进行以下验算。

(1)钢-混凝土组合桥面板的正截面抗弯承载力。

$$M_u = f_{cd} b x_c \left( h_0 - \frac{x_c}{2} \right) + f_{sd} A_s (h_0 - a_s) = 169.7 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_u = f_{sd} A_s (h - x_s - a_s) + \frac{1}{2} f_d b x_s^2 +$$

$$\frac{1}{2} f_d b (t - x_s)^2 = 78.57 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

经计算,桥面板支点弯矩71.5 kN,跨中弯矩51.1 kN,支点处最大剪力为96.2 kN,组合桥面板正弯矩抗弯承载力169.7 kN,大于51.1 kN,负弯矩承载力78.5 kN,大于71.5。

(2)斜截面抗剪承载力。斜截面抗剪承载力需要计算垂直于带孔钢板方向和平行于带孔钢板方向。垂直于带孔钢板方向是指桥面板截面的整体抗剪能力。平行于带孔钢板方向的斜截面抗剪承载力主要由混凝土和底钢板两部分共同承担。

a. 垂直于带孔钢板方向抗剪承载力。垂直于带孔钢板方向剪力作用范围为:

$$A = a + 2 \times 0.45 = 1.1 \text{ m}$$

因此取剪力作用范围内的有效肋宽:

$$W_r = 800 \text{ mm}$$

$$0.07 f_{cd} W_r h_0 = 193.18 \text{ kN} > 1.3 \times V_s = 125.1 \text{ kN}$$

b. 平行于带孔钢板方向抗剪承载力。平行于带孔钢板斜截面抗剪承载力主要由混凝土和底钢板两部分共同承担,即:

$$V_u = \frac{1.75}{1 + \lambda} f_{td} b h_0 + 0.2 f_{vp} b t = 340.38 \text{ kN}$$

(3)抗冲切承载力。

$$F_u = 0.6 f_{td} c_p h_c = 567 \text{ kN}$$

冲切承载力567 kN,远大于轮载。

(4)带孔钢板剪力键的抗剪承载力。当带孔钢板内有贯穿钢筋时,其承载力为:

$$A = \frac{\pi (d_p^2 - d_{st}^2)}{4} f_{td} + \frac{\pi d_{st}^2}{4} f_{st} = 105 \times 10^3 \text{ kN}$$

满足  $80 \times 10^3 \text{ N} \leq A \leq 380 \times 10^3 \text{ N}$

$$V_{zd2} = \frac{1.85A - 106.0 \times 10^3}{\gamma} = 89.78 \text{ kN}$$

带孔钢板孔间抗剪承载力:

$$V_s = \frac{5}{3} \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}} \cdot A_w = 117.8 \text{ kN} > V_{zd2}$$

带孔钢板焊缝承载力:

$$N_v = f_t^* l_y h_c = 190 \times 100 \times 6/1000 = 114 \text{ kN} > V_{zd2}$$

故带孔钢板剪力键抗剪承载力满足要求<sup>[4]</sup>。

(5)裂缝宽度验算。负弯矩区荷载准永久组合效应设计值为23.1 kN,频遇组合的效应设计值为37.4 kN,钢-混凝土组合桥面板负弯矩区的纵向受拉钢筋应力为48.3 MPa,裂缝宽度为0.026 mm。

## 6 结 语

(1)江广快速路茱萸湾大桥采用三跨连续钢桁架拱桥,总体布置与快速路功能和航道通航要求相适应,桥梁结构受力合理、造型流畅美观,建成后已成为当地的标志建筑。

(2)钢桁架拱在横桥向采用3片主桁拱肋,造型恢弘大气,整体性好。但各片拱肋的结构受力、系杆水平推力、吊杆力等均不一致,需处理好各构件间的结构尺寸和受力协调关系。设计中一方面采用增大中拱肋、中系梁的截面尺寸,并提高中间排吊杆和系杆规格;另一方面加大中支点横梁截面,以加强桥面横向刚度,使得桥面系受力和横桥向整体性得以满足要求。

(3)桥面板采用钢-混凝土组合桥面板,具体为

(下转第89页)



图 12 青年桥效果图

过一座轻盈通透到能够消隐在大自然中的步行桥连接起南北两岸。桥梁设计用了较多的元素寓意起航的风帆,预示着新川沙河即将驶入更重要的舞台。

推荐主跨为 106 m 的网状吊杆拱桥。风格以大气、和谐为主,其突出的特点是拱桥结构的力学美、形态的弧线美以及近视点的细节美(见图 13)。

6 结 语

城市跨行洪干河暨高等级航道桥梁的设计选型是一项系统研究工程,本文结合国内外城市桥梁景观群设计实例,从空间规划分析、设计理念,再到单体桥梁设计,总结了桥梁方案选型思路与方法。以吴淞江工程(上海段)新川沙河段跨河通道的桥梁方案为实例,结合相关规划、地理位置、周边环境、工程规模、当地文化等对 7 座桥梁的设计方案进行了统筹



(a)立面图



(b)透视图

图 13 沈陆宅桥效果图

考虑,为城市跨行洪干河暨高等级航道桥梁设计选型提供参考。

参考文献:

[1] 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司.吴淞江工程(上海段)新川沙河段初步设计研究报告[R].上海:上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,2020.  
[2] 李鹏飞.城市河道桥梁群规划设计方法浅析[J].城市道桥与防洪,2014(7):4-6.

(上接第 84 页)

底钢板上现浇 150 mm 厚度的混凝土面板,有效提高了桥面板的刚度和耐久性,并减小了混凝土板厚度,降低结构自重。底钢板作为浇筑混凝土的底模板,省去了模板的安装和拆除,施工方便快捷。此外,底钢板上设置开孔板,开孔板兼作底钢板的加劲和组合桥面板的剪力键,与桥面剪力钉一道,加强钢-混凝土组合桥面板连接整体性。

(4)系梁内设置预应力系杆,平衡拱的推力,进一步减小桥面板的拉应力,提高结构耐久性。此外,在先拱后梁法的施工过程中,设置临时系杆,以平衡体系转换前桁架拱的水平推力。

(5)钢桁架拱桥的杆件应力、桥梁整体稳定、吊

杆和系杆应力、组合桥面板受力等是计算分析的关键。通过对相关内容的深入计算,均满足规范要求,桥梁结构安全可靠、耐久适用。

参考文献:

[1] 易伦雄.南京大胜关长江大桥大跨度钢桁拱桥设计研究[J].桥梁建设,2009(5):1-5.  
[2] 鄢余文.平申线亭枫公路桥总体设计及关键技术[J].中国市政工程,2017(3):4-7.  
[3] JTG/T D65-06—2015,公路钢管混凝土拱桥设计规范[S].  
[4] DB51/T 1991—2015,钢-混凝土组合桥面板技术规程[S].  
[5] 张建功,翟晓亮,冯云成.大跨连续钢桁架拱桥设计[J].中外公路,2016(1):153-158.