

蝶形拱桥设计与施工关键技术

王毅

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 蝶形拱桥作为新型拱桥,因其造型新颖独特易与周边环境相协调,在国内外城市景观桥梁建设中备受青睐。崇明南横引河桥位于曲线上,主桥采用69.514 m下承式结合梁蝶形系杆拱桥。对其结构设计及施工控制关键技术进行了详细介绍,总结了该桥梁的结构特点和受力特性,并提出了改善其受力性能的方法。

关键词: 蝶形;结合梁;系杆拱桥;总体设计;无支架施工

中图分类号: U448.22+5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)07-0069-05

0 引言

随着经济社会的持续发展,桥梁建设日新月异,大众审美标准不断提升,桥梁美学设计越来越得到重视。

蝶形拱桥作为新型拱桥,其造型新颖独特易与周边环境相协调,在国内外城市景观桥梁建设中备受青睐。本文以南横引河桥主桥为例,总结其结构设计和施工关键技术。

1 工程概况

建设公路(团城公路—北沿公路)改扩建工程作为崇明岛干线路网规划“四横七纵”中的一纵(见图1),南北向的重要交集散性公路,是崇明新城、建设镇对外辐射的重要通道,具有增加崇明北部集散能力,便捷沟通新城及东平国家森林公园,同时作为“生态、功能、环保”为理念的城市门户景观大道辐射整个崇明岛,是世界级生态岛建设的示范性道路。

建设公路(团城公路—北沿公路)改扩建工程南起崇明岛团城公路,北至北沿公路,全长约7.4 km,现状为三级公路,规划为二级公路,团城公路—南引河路及建星路—运粮河段参照城市道路标准设计,其平面布置如图2所示。南横引河桥作为建设公路沿线的大桥,跨径组合为30.5+31+32+69.514+32+2×31+30.5=287.514 m,桥长288 m。其中,主桥采用69.514 m下承式结合梁蝶形系杆拱桥,两侧引桥采



图1 建设公路地理位置示意图

用预应力混凝土小箱梁。

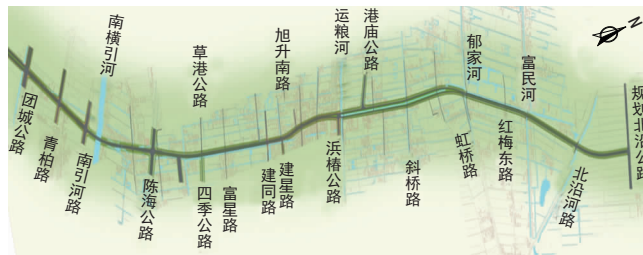


图2 建设公路(团城公路—北沿公路)平面布置图

2 主要技术标准

- (1)道路等级:二级公路。
- (2)设计车速:60 km/h(公路段)。
- (3)车道数:双向4车道,两侧设非机动车道及人行道。
- (4)汽车荷载等级:公路-I级;人群荷载,按《城市桥梁设计规范(2019版)》(CJJ 11—2011)等有关规定取用。
- (5)通航等级:Ⅵ级航道。
- (6)桥梁设计基准期:100 a。

收稿日期: 2024-05-07

作者简介: 王毅(1971—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计和研究工作。

- (7)设计安全等级:一级。
- (8)结构环境类别:Ⅱ类。
- (9)设计风速:100 a 一遇, $v_{10}=33.8$ m/s。
- (10)地震基本烈度 7 度,水平向地震动峰值加速度 0.1g,抗震设防分类为 B 类,桥梁抗震措施设防烈度为 8 度。

3 总体设计

3.1 总体布置

基于周边建设条件和场地特点,兼顾经济性和景观性,主桥采用下承式蝶形系杆拱桥,桥宽 35.08 m,双向 4 车道,两侧非机动车道宽 3.5 m,人行道宽 3 m。主桥跨径 69.514 m,主拱矢高 15.0 m,矢跨比为 1/4.63。横梁间距 3 m,吊索间距 6 m。主桥位于半径 980 m 的曲线上,采用曲桥直做。南横引河桥主桥总体布置如图 3 和图 4 所示。

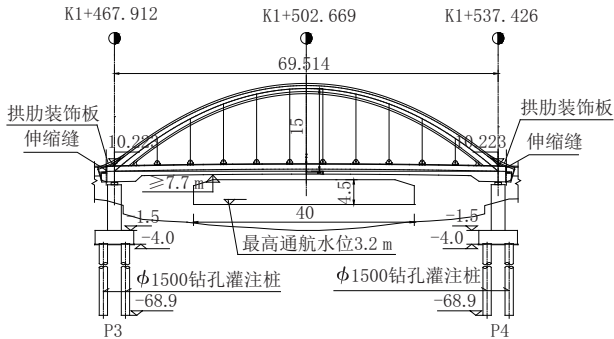


图 3 主桥立面布置图(单位:m)

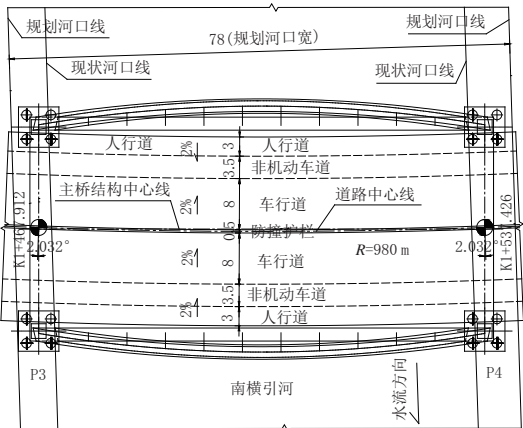


图 4 主桥平面布置图(单位:m)

主桥的跨中横断面布置为 3.103 m(拱肋、吊索区)+3.0 m(人行道)+3.5 m(非机动车道)+8.0 m(车行道)+0.5 m(防撞护栏)+8.0 m(车行道)+3.5 m(非机动车道)+3.0 m(人行道)+2.377 m(拱肋、吊索区)=34.98 m,如图 5 所示。

主桥造型新颖优美,酷似张开翅膀的“蝴蝶”,与水面相得益彰,宛如蝴蝶掠过水面。实景效果图如

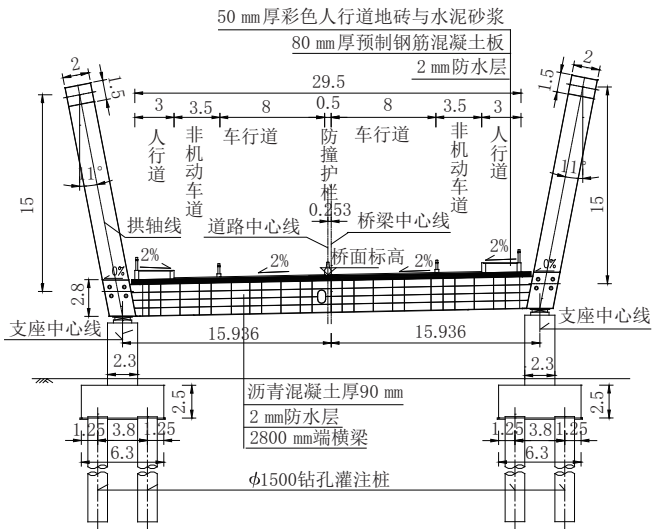


图 5 主桥横断面布置图(单位:m)

图 6 所示。



图 6 实景效果图

3.2 结构设计

3.2.1 拱肋

拱轴线采用二次抛物线,拱高 15.0 m,矢跨比为 1/4.63,拱肋外倾 11°。拱肋采用全焊接矩形截面,宽 2 m,高度沿拱轴线变化,跨中高 1.5 m,拱脚处高 2.2 m。拱肋顶、底板厚度为 28~24 mm;腹板厚度为 24~20 mm。顶底腹板均采用板式加劲肋。拱肋标准断面如图 7 所示。

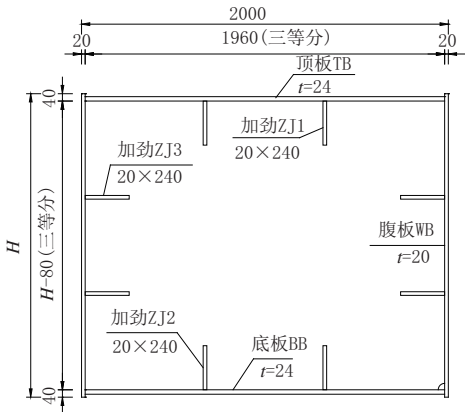


图 7 拱肋标准断面图(单位:mm)

3.2.2 主梁

主梁为钢结构主梁,桥面系采用钢-混凝土组

合结构桥面板。钢主梁为主纵梁、中横梁、端横梁、小纵梁组成的双主梁梁格体系,钢材采用 Q345qD。

主纵梁采用全焊接箱型截面,跨中尺寸为 2.037 mm × 1.8 m,拱脚处断面尺寸为 2.037 mm × 2.8 m,主纵梁中心距为 32.6 m。主纵梁间设置三道小纵梁。

中横梁采用工字形截面,间距 3 m,梁高 1.540~1.556 m;顶板厚 30 mm,宽 800 mm;底板厚 20~36 mm,宽 800 mm;腹板厚 16 mm。中横梁约 1.3 m 设置一道竖向加劲。

拱梁结合处设端横梁,接引桥侧设置下牛腿,牛腿宽 1.020 m,高约 1.6 m。端横梁顶板厚 40 mm,底板厚 30~40 mm,设置三道腹板,牛腿侧及中腹板厚 30 mm,主纵梁侧腹板厚 20 mm。端横梁约 1.5 m 设置一道横隔板。

小纵梁采用工字形断面,梁高 500 mm,顶板宽 600 mm,厚 16 mm;底板宽 400 mm,厚 16 mm;腹板厚 12 mm。

3.2.3 结合桥面板

结合梁桥面宽 29.5 m,结构全宽 34.98 m,由混凝土桥面板与钢梁组成,顶面设 2%单向横坡,如图 8 所示。桥面板通过剪力钉与横梁连接,与主纵梁断开。桥面板分为预制和现浇两部分,桥面板采用 C50 混凝土,端横梁处板厚为 340 mm,其余板厚均为 250 mm。桥面板设纵向预应力(标准强度 $f_{pk}=1\ 860\text{ MPa}$),规格为 $\phi^s15.2-5$,以减小裂缝宽度。

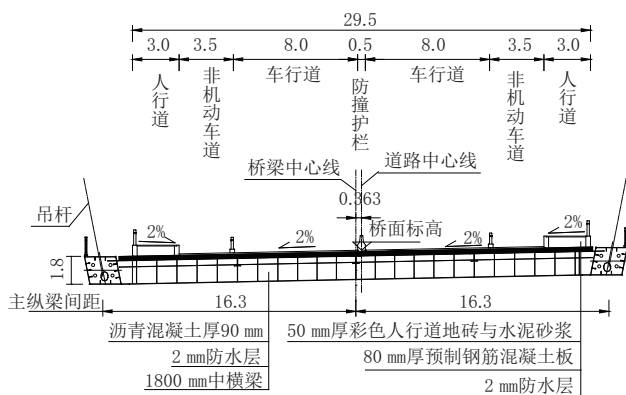


图 8 主梁标准断面图(单位:m)

3.2.4 系杆

主纵梁内设水平系杆,以平衡拱肋恒载及活载作用下水平推力,系杆分二组布置,每组 4 根,均采用环氧钢绞线(标准强度 $f_{pk}=1\ 860\text{ MPa}$),规格为 $\phi^s15.2-27$ 。虽然系梁能够平衡拱肋水平推力,但是因为一方面桥面板会参与结构整体纵向受力,另一方

面钢梁节段间对接焊缝,在活载作用下易出现疲劳破坏。通过设置柔性系杆来平衡水平推力,改善结构受力并确保结构有一定安全储备。

3.2.5 吊杆

主桥共设 10 对吊杆,间距 6 m。吊杆采用平行钢丝成品索(标准强度 $f_{pk}=1\ 670\text{ MPa}$),拱肋端设锚箱为张拉端,梁端采用耳板与主纵梁销接锚固,锚具为冷铸锚锚具。吊杆规格采用 PES7(FD)-109。

3.2.6 下部结构

主桥下部结构采用双柱墩,墩柱采用矩形截面,顺桥向、横桥向尺寸均为 2.3 m。承台顺桥向、横桥向尺寸均为 6.3 m,高 2.5 m;设置 4 根直径 1.5 m 钻孔灌注桩,桩长 60 m,按摩擦桩设计。

4 施工顺序

主桥采用先梁后拱的施工方法,主要施工步骤如下:

- (1)少支架吊装拱脚(拱梁结合段)、端横梁,主纵梁、对称安装中横梁及小纵梁;拆除拱脚及横梁支架。
- (2)吊装预制桥面板。
- (3)吊装左右相邻跨引桥。
- (4)吊装拱肋,安装吊杆、系杆,初次张拉吊杆。
- (5)拆除主梁支架,浇筑湿接缝,二次张拉吊杆。
- (6)湿接缝混凝土强度和龄期达到要求后张拉桥面板钢束,初次张拉系杆。
- (7)桥面铺装及栏杆等桥面系施工,调整吊杆及系杆索至设计值。
- (8)荷载试验,交工通车。

5 结构计算分析

5.1 计算模型

采用 MIDAS Civil 建立空间有限元模型,如图 9 所示。其中拱肋、主梁和横梁采用梁单元,吊杆采用桁架单元,桥面板采用板单元。

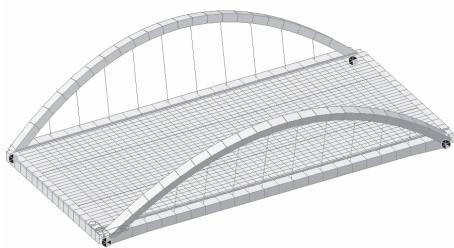


图 9 主桥有限元模型

5.2 总体静力计算

5.2.1 钢构件强度计算

基本组合下,主纵梁最大压应力和拉应力均在拱

梁结合段处,压应力为 148 MPa,拉应力为 90 MPa,如图 10 所示;主纵梁最大剪应力为 27 MPa,如图 11 所示。基本组合下,拱肋全截面受压,拱脚处最大压应力为 191 MPa,如图 12 所示。拱肋最大剪应力为 26 MPa,如图 13 所示。

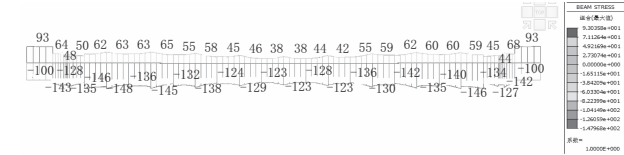


图 10 主纵梁正应力(单位:MPa)

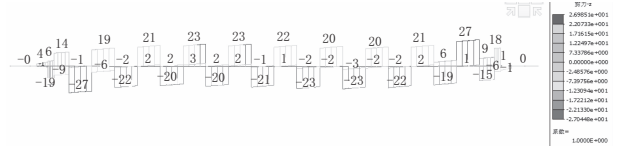


图 11 主纵梁剪应力(单位:MPa)



图 12 拱肋正应力(单位:MPa)

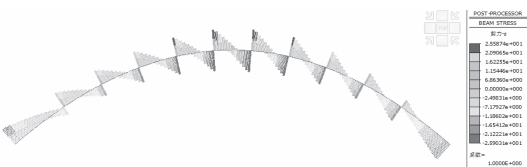


图 13 拱肋剪应力(单位:MPa)

5.2.2 桥面板强度计算

解决结合梁系杆拱桥桥面板开裂是设计的难点和要点。主桥桥面板顺桥向按照 B 类预应力混凝土构件设计,横桥向按照钢筋混凝土构件设计。桥面板纵向受力由桥面板局部受力与桥面板参与结构整体纵向受力两部分组成,为此对这两个体系裂缝宽度分别进行检算。桥面板主要计算结果如图 14 至图 19 所示,图中“+”为拉应力,“-”为压应力。

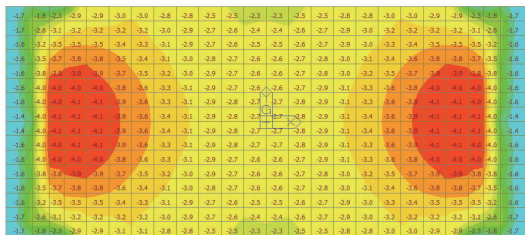


图 14 成桥状态 顺桥向桥面板上缘应力(单位:MPa)

成桥状态下桥面板计算结果如图 14、图 15 所示,除拱脚附近局部极小范围外,桥面板均有一定的压应力储备,满足规范要求。拱脚附近(扇形区域)压应力减小甚至出现拉应力主要由于收缩徐变引起。

频遇组合作用下桥面板应力分布如图 16 和图

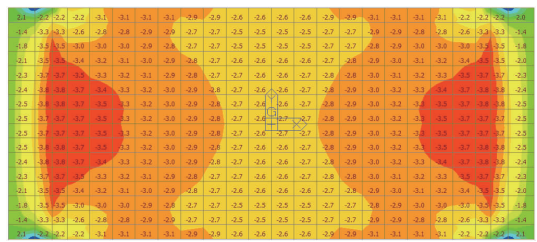


图 15 成桥状态 顺桥向桥面板下缘应力(单位:MPa)

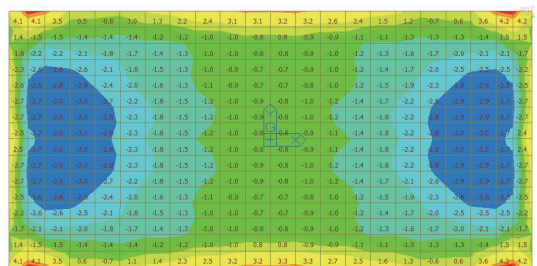


图 16 频遇组合 桥面板上缘正应力(单位:MPa)

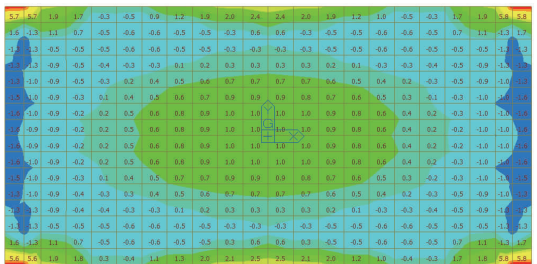


图 17 频遇组合 桥面板下缘正应力(单位:MPa)

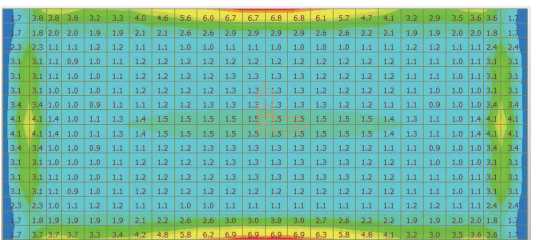


图 18 活载作用 桥面板上缘正应力(单位:MPa)

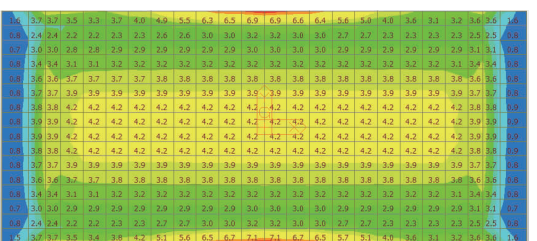


图 19 活载作用 桥面板下缘正应力(单位:MPa)

17 所示。桥面板顺桥向拉应力最大值出现在拱脚附近很小范围内,上缘拉应力为 4.2 MPa,下缘拉应力为 5.8 MPa。拱脚局部扇形很小区域出现较大拉应力由收缩徐变及温差引起,这部分桥面板可采用低收缩混凝土或采用钢纤维混凝土等措施以减小裂缝。跨中主纵梁附近出现较大拉应力分别为上缘 3.2 MPa 和下缘 2.4 MPa,须通过配筋控制裂缝宽度。活载作用下桥面板应力分布如图 18 至图 19 所示。主纵梁附近桥面板跨中出现较大拉应力主要是

由活载引起的。可通过适当增大拱肋与主梁截面的抗弯刚度比,从而使拱肋分担的活载弯矩增大,主梁分担的活载弯矩减小,达到减小桥面板拉应力的目的。

5.2.3 吊索计算

基本组合作用下,吊杆最大拉应力为 595 MPa,如图 20 所示。

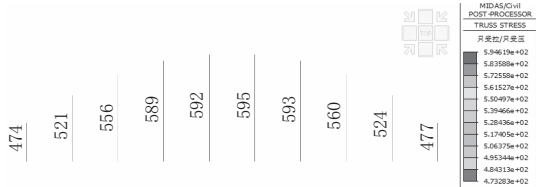


图 20 基本组合 吊杆应力图(单位:MPa)

活载作用下吊杆最大拉应力如图 21 所示,吊杆的应力幅为 73 MPa,满足规范要求。

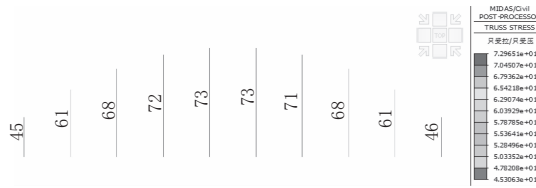


图 21 活载作用 吊杆最大拉应力(单位:MPa)

5.2.4 构件挠度计算

总体静力计算结果表明,桥梁构件强度及挠度等均满足规范要求,具有良好的受力性能。

表 1 主要构件挠度验算结果 单位:mm

名称	主纵梁	拱肋	横梁
恒载位移	6	20	67
活载位移	26	23	40
规范	87	70	65
结论	满足	满足	满足

5.2.5 屈曲稳定分析

如图 22 所示,一阶弹性失稳模态表现为拱肋的面外失稳,安全系数为 25.4,满足规范要求。

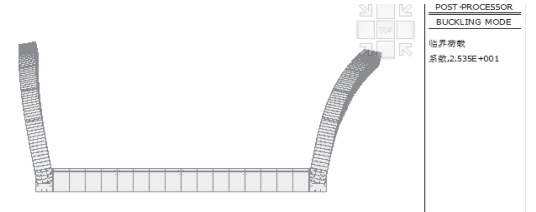


图 22 失稳模态

6 关键施工工艺

6.1 吊装施工顺序优化

主桥端横梁设牛腿支撑引桥小箱梁,对施工过程进行优化由常规拱桥合龙后吊装预制桥面板及引桥箱梁调整为先吊装预制桥面板及引桥箱梁后吊装拱肋合龙,以减小架设引桥箱梁使端横梁下挠带动拱肋侧向(向内)位移,进而改善拱肋结构线形及受力。

6.2 无支架拱肋吊装

通过精确计算合龙段拱肋重心位置,施工过程中严控拱肋空中姿态,实现了国内首创外倾式拱肋无支架整体架设的突破,拱肋安装精度达到了毫米级,如图 23 所示。有效缩短了工期、节约投资,使拱肋线形更美观,降低高空作业安全风险的同时有效规避高空焊接质量风险。



图 23 拱肋无支架整体吊装架设

6.3 系杆、吊杆张拉顺序优化

吊杆分三次张拉,分别为拱肋合龙后、桥面板与钢梁结合及桥面系施工完成三个阶段,使吊杆张拉力达到成桥状态。其中,第二次吊杆张拉在桥面板与钢梁结合前使主梁处于平直状态,确保桥面板在后续调整吊杆张拉力时不会出现拉应力。系杆初次张拉在一期恒载全部施工完以后,目的在于减小系杆的初张力,使其不需要承担一期恒载所产生的推力。

7 结 语

南横引河桥于 2019 年 3 月开工建设,2021 年 4 月 30 日正式通车。作为拱肋外倾的结合梁系杆拱桥,虽然跨度不大,但由于其宽跨比较大、拱肋外倾,结构所表现的空间效应突出。

通过对设计及施工采用的创新技术应用,解决了合理控制桥面板裂缝宽度难题、施工过程中外倾拱肋线形控制问题,在确保施工质量的同时缩短了工期,降低了造价,取得了良好的社会效益。该桥的设计和成功实施可为今后同类型桥梁提供借鉴。

参考文献:

[1] 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司. 建设公路(团城公路—北沿公路)改扩建工程初步设计[Z]. 上海:上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 2018.

[2] 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司. 建设公路(团城公路—北沿公路)改扩建工程施工图设计[Z]. 上海:上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 2019.

[3] 邵长宇. 基于“可持续发展工程”理念的城市桥梁技术展望[J]. 城市道桥与防洪, 2010(9): 8-10.