

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.07.023

丰城紫云大桥组合钢板梁设计

林友强

[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: 丰城市紫云大桥陆上引桥采用连续组合钢板梁,南岸标准段跨径布置为(34.5+2×36+3×42+2×36+34.5)m。主梁采用双主梁组合钢板梁结构,小横梁体系,梁高 2.1 m。钢梁由焊接工字钢纵梁、中间小横梁以及支点横梁等组成,中支点两侧各约 0.125 L 范围内的钢纵梁纵向板件采用 Q420qD 钢,其余钢材采用 Q345qD 钢。桥面板采用全宽预制的预应力混凝土桥面板,湿接缝混凝土采用超高性能混凝土(UHPC),预制桥面板纵向钢筋外伸长度大于 10 d,无需现场焊接或绑扎。板梁连接采用新型灌浆剪力键,钢梁与桥面板通过焊钉连接件、槽口、高强砂浆填充料、注浆孔、通气孔以及橡胶条,形成一个完全连接的整体。钢梁采用临时支架分段吊装施工,预制桥面板采用先吊装结合正弯矩区桥面板后负弯矩区桥面板的顺序铺设。对结构进行强度、稳定和变形分析,结果均满足设计要求。

关键词: 组合钢板梁;双主梁;小横梁;UHPC;预制桥面板;灌浆剪力键;结构设计;吊装施工

中图分类号: U448.21+6 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-7716(2024)07-0090-05

1 概 述

1.1 工程概况

丰城市紫云大桥新建工程^[1]起点位于龙津新区丰源大道交叉口,终点位于河东新区府佑路交叉口,与北接的丰厚一级公路、南接的丰乐一级公路,共同构成了丰城市路网骨架的中轴线,也是中心城区的主要过江通道。工程范围内路线全长约 5.5 km,其中主线桥梁实施长度约 5.1 km,另包含立交、匝道、梯坡道桥和地面跨河桥梁等工程,项目地理位置如图 1 所示。本工程陆上引桥采用组合钢板梁。

1.2 主要技术标准

- (1)道路等级:一级公路兼城市主干路。
- (2)设计车速:60 km/h。
- (3)设计车道:分幅布置,单向 3 车道。
- (4)设计荷载:公路 I 级(城-A 级复核)。
- (5)抗震设防标准:抗震设防烈度 6 度。
- (6)环境类别:Ⅰ类环境。

2 桥梁设计

2.1 总体布置

丰城市紫云大桥新建工程陆上引桥采用连续组合钢板梁,双主梁结构,小横梁体系。其中 RS32~



图 1 紫云大桥项目地理位置示意图

RS41 和 LS32~LS41 联为标准段,跨径布置为(34.5+2×36+3×42+2×36+34.5)m,桥梁全长 339 m,桥梁总体布置如图 2 所示。

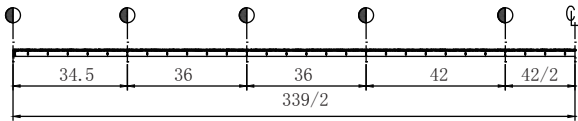


图 2 桥梁总体布置(单位:m)

桥梁采用长联布置,一方面减小边跨指标,降低用钢量,提高经济性;另一方面减少伸缩缝数量,提高行车舒适性。立面上全桥等高,既提高了工厂化制造的经济性,也便于钢梁的运输和安装。

主梁采用组合钢板梁,桥梁总宽 12.75 m,总高

收稿日期: 2023-09-20

作者简介: 林友强(1991—),男,工程硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

2.1 m,其中钢梁高 1.7 m,高跨比为 1/24.7。两片主纵梁腹板的中心距为 7 m,约为桥梁总宽的 0.55^[2]。小横梁主要功能是保证施工期间结构的侧扭稳定,通过计算确定标准间距为 6 m,故在桥跨选择上以 6 的模数为宜。支点横梁及小横梁标准横断面如图 3、图 4 所示。

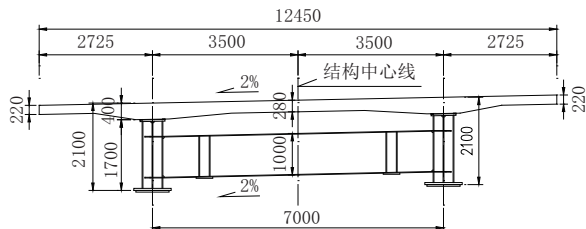


图 3 支点横梁标准横断面(单位:mm)

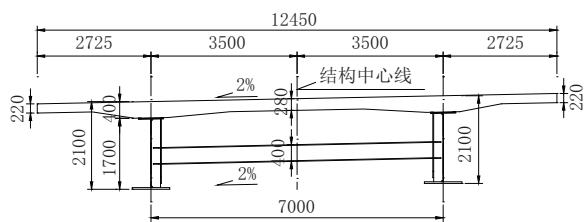


图 4 小横梁标准横断面(单位:mm)

2.2 钢结构

组合梁钢结构主要是由焊接工字形钢纵梁、中间小横梁和支点横梁组成的双主梁梁格体系。钢主梁采用焊接工字形双主梁钢板梁,腹板中心间距为 7 000 mm,高度为 1 700 mm。钢纵梁的上下翼缘纵桥向等宽,上翼缘宽度为 600 mm,下翼缘宽度为 900 mm。翼缘板变厚朝向腹板方向,即翼缘外对齐,便于桥面板施工的同时满足美观要求。翼缘板厚度在一跨内作 3 次变化。

小横梁和支点横梁均采用焊接工字形截面。小横梁纵桥向标准间距为 6 m,梁高 400 mm,上下翼缘均为宽 300 mm、厚 16 mm,腹板厚 12 mm。支点横梁高 1 000 mm,上下翼缘均为宽 400 mm、厚 20 mm,腹板厚 20 mm。

主梁和小横梁、支点横梁通过 T 形断面的“横梁连接加劲”连接。小横梁处,连接加劲仅在纵梁内侧布置,腹板宽 220 mm、厚 16 mm,翼缘宽 250 mm,厚 20 mm;支点横梁处,连接加劲在纵梁两侧对称布置,腹板宽 220 mm、厚 20 mm,翼缘宽 450 mm,厚 30 mm。在与横梁翼缘齐平的位置设置水平加劲,作为横梁翼缘的延伸,其板厚均为 20 mm。支点横梁顶升位置设置板肋加劲,宽 180 mm,厚 20 mm。

主梁钢结构跨中区域和边支点附近采用 Q345qD 钢材,支点附近钢纵梁顶、底、腹板和部分支

承加劲肋采用 Q420qD 钢材。全桥用钢量指标约为 125 kg/m²。

2.2.1 钢纵梁优化

传统组合钢板梁结构顶底板一般取为同宽,上翼缘设置的焊钉数量较多,板厚受到焊钉尺寸的构造控制,往往顶板应力偏小,钢材强度无法充分利用。钢板组合梁形成组合截面后,中性轴位置往往靠近顶板,顶板应力大部分由结合前的阶段产生,增加顶板宽度对结构受力改善的效率较低^[3]。因此,顶板宽度可适当减小,根据焊钉布置的构造要求确定,并通过计算确定顶板厚度。该桥钢纵梁顶板宽度 600 mm,底板宽度 900 mm,顶、底板宽度比 0.67,如图 5 所示。通过计算可知,钢梁顶板最大拉应力 302 MPa(Q420qD),出现在 42 m 跨中支点附近,最大压应力 257 MPa(Q345qD),出现在边跨跨中附近;钢梁底板最大拉应力 253 MPa(Q345qD),出现在边跨跨中附近,最大压应力 321 MPa(Q420qD),出现在 42 m 跨中支点附近,均小于钢材设计强度。

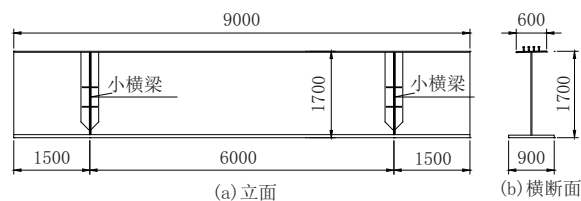


图 5 标准钢纵梁梁段构造(单位:mm)

2.2.2 钢纵梁腹板加劲肋优化

传统组合钢板梁按照钢结构相关规范设计,横梁间往往设置 1~2 道腹板加劲肋,当腹板较高时,还要在 0.2 h 处设置 1 道纵向加劲肋,其目的是防止腹板局部屈曲。根据该桥钢纵梁实际的受力需求,对钢纵梁腹板加劲肋进行适当优化,取消了腹板纵向加劲肋和横向加劲肋。在减少钢材用量的同时,也显著降低了钢梁加工制造和运营养护的工作量,提高结构耐久性能,主体结构也极为简洁美观。通过理论计算分析可知,在未考虑桥面板抗剪作用的情况下,抗剪承载力为 7 488 kN,大于剪力设计值 4 360 kN;腹板稳定验算能满足受力要求,通过优化钢纵梁腹板加劲结构,平均节省钢材 4 kg/m²。

2.3 桥面板结构

该桥采用全宽预制的预应力混凝土桥面板,预制桥面板采用 C50 混凝土,纵桥向标准宽度 2.75 m,横向宽度 12.45 m,两块预制板之间预留 0.25 m 的湿接缝,平面布置如图 6 所示。

桥面板纵桥向采用等截面的构造形式,横桥向

采用变高形式,加腋部分厚 0.4 m,挑臂边缘厚 0.22 m,跨中厚 0.28 m,并设置横向预应力,桥面板横断面构造如图 7 所示。预制板标准预制板单块吊装重量约为 18.4 t。

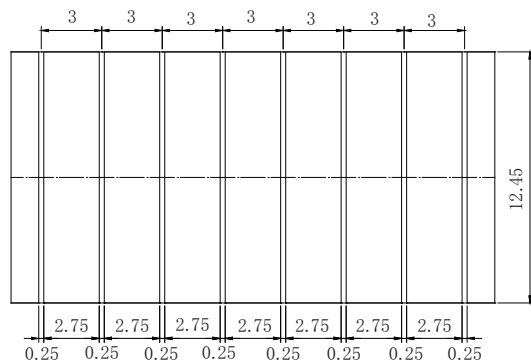


图6 桥面板平面布置(单位:m)

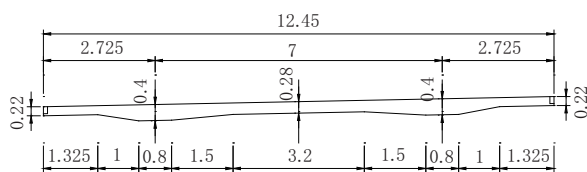


图7 桥面板横断面(单位:m)

预制板横桥向为预应力混凝土体系,按 A 类预应力混凝土构件设计,控制裂缝宽度为 0.2 mm。预制板纵桥向为钢筋混凝土体系,墩顶附近为了控制裂缝宽度而采用较高的配筋率(2.02%),跨中和边支点附近采用较低的配筋率(1.07%)。为适应装配化建造的趋势湿接缝采用 UHPC,减少钢筋现场焊接或绑扎的工作量。

板梁连接采用一种新型的灌浆剪力键构造。预制板内预留通长的深浅槽口,高度为 60 mm,焊钉处槽口加深至 95 mm,利用焊钉及高强砂浆与钢梁连接。

2.3.1 板梁连接——灌浆剪力键^[4-6]

传统全宽度预制的桥面板,为了解决和钢梁共同受力的问题,需要预留一块矩形区域,焊钉成群布置在桥面板就位后这些孔洞的下方,这些孔洞称作桥面板连接槽。钢和混凝土桥面板仅在开槽处通过焊钉连接,也就是将焊钉以簇群的方式与连接槽对应间断布置,后现场浇筑低收缩混凝土将其填满。组合结构桥梁的受力性能主要依赖于钢梁和混凝土桥面板之间连接的剪力传递,而传统的连接方式钢梁和混凝土桥面板仅在连接槽处完全连接,无槽孔区域钢梁和桥面板存在间隙。这种连接构造造成钢梁与桥面板之间剪力传递并不连续,焊钉无法充分发挥其抗剪性能,布置预应力时也受到孔洞位置的限制,再加上钢混结合面可查性差,长期耐久性能很难评价。

为了克服上述不足,该桥采用一种新型的板梁连接构造,可简称为灌浆剪力键,如图 8、图 9 所示。即在预制板内设置纵桥向通长的连接槽口,设置焊钉处连接槽口加深,使用时往注浆孔压注高强砂浆使钢梁和桥面板共同连接成一个整体。该连接结构构造简单、施工方便、受力合理、连接可靠。

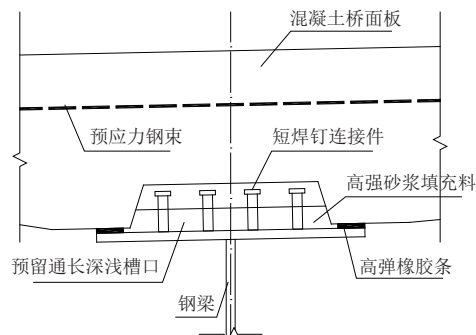


图8 桥面板横断面

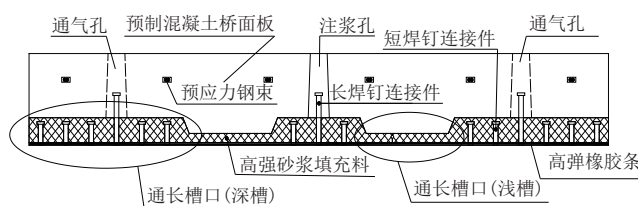


图9 桥面板横断面

2.3.2 湿接缝优化

传统的组合梁湿接缝常采用环形套箍的钢筋连接方式,相邻预制板钢筋需要在现场绑扎或者焊接,湿接缝宽度往往要求在 350 mm 以上。这种湿接缝形成产生的问题是现场工作量较大,同时现场的焊接质量也无法保证,无法充分发挥工厂化预制施工速度快、施工质量优的特点。该桥采用 UHPC 作为湿接缝混凝土,如图 10 所示,其优势在于预制板伸出钢筋采用直筋,外伸长度大于 10 d 即可,无需进行弯折,钢筋错缝布置,无需现场焊接或绑扎,加快现场施工周期,提高施工效率。

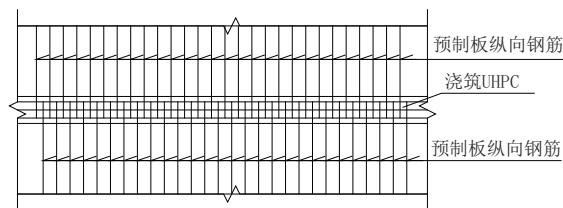


图10 湿接缝构造示意图

2.4 焊钉连接件

混凝土桥面板与钢梁通过布置于钢梁顶板的圆柱头焊钉连接,焊钉规格采用 $\phi 22 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$ 和 $\phi 22 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 两种。焊钉横桥向标准间距 100 mm,纵桥向标准间距 120 mm,焊钉布置于预制板通长深浅槽口的构造相匹配,3 m 标准节段的焊钉布置如

图 11 所示。其中注浆孔、冒浆孔和湿接缝位置采用 $\phi 22\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 焊钉,其余均采用 $\phi 22\text{ mm} \times 90\text{ mm}$ 焊钉。

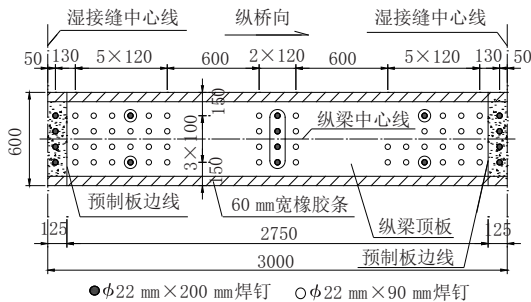


图 11 湿接缝构造示意图(单位:mm)

2.5 预应力

该桥桥面板为横向单向板受力,故设置横向预应力。其中标准段预制桥面板预应力采用 $4\phi 15.2\text{ mm}$ 预应力钢束,沿纵桥向 0.48 m 等间距布置,一块预制板共 6 束;端部的预制桥面板根据横向计算结果配合使用 $5\phi 15.2\text{ mm}$ 预应力钢束。预应力平面布置如图 12 所示。

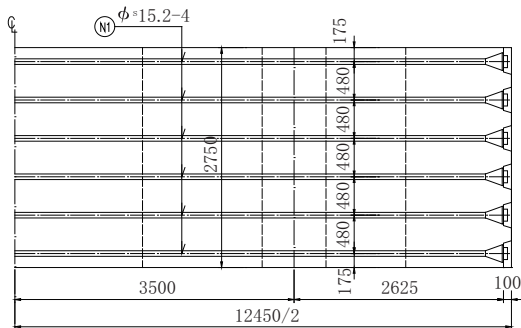


图 12 预应力平面布置(单位:mm)

3 施工方案

紫云大桥陆上引桥钢梁采用临时支架分段吊装施工,预制桥面板采用先吊装结合正弯矩区桥面板后负弯矩区桥面板的顺序铺设,主要施工步骤为:(1)工厂预制预应力桥面板,工厂制作加工钢梁节段;(2)现场架设临时支架,在支架上逐跨吊装钢梁,拼接完成形成连续结构后拆除临时支架;(3)铺设正弯矩区预制桥面板,浇筑正弯矩区湿接缝及灌浆剪力键;(4)正弯矩区湿接缝及灌浆剪力键混凝土达到指定强度后,铺设负弯矩区预制桥面板,浇筑负弯矩区湿接缝及灌浆剪力键;(5)负弯矩区湿接缝及灌浆剪力键混凝土达到指定强度后,桥面板铺设完毕,进行桥面系施工。

4 结构计算

利用空间有限元软件进行主梁静力计算,模型

采用平面梁格体系,按照施工步骤进行仿真分析。分析时考虑负弯矩区开裂引起的内力重分布、剪力滞效应的影响。得到以下主要结果:

(1)钢梁顶板最大拉应力 302 MPa ,出现在 42 m 跨中支点附近,最大压应力 257 MPa ,出现在边跨跨中附近;钢梁底板最大拉应力 253 MPa ,出现在边跨跨中附近,最大压应力 321 MPa ,出现在 42 m 跨中支点附近,均小于钢材设计强度。

(2)钢梁腹板最大剪应力出现在 42 m 跨中支点附近板厚变化处,腹板厚度 16 mm ,剪应力 135 MPa ,抗剪承载力满足规范要求。

(3)腹板剪应力较小时,截面强度由翼缘正应力控制设计,折算应力不控制设计,各验算截面均满足规范要求。

(4)钢梁负弯矩区侧扭扭转屈曲验算采用欧洲规范 EN1993-2:2006, 6.3.4.2 条的简化方法进行计算,最不利截面为 42 m 跨中支点处,下翼缘最大压应力 321 MPa ,小于侧扭失稳临界应力 331 MPa ,即侧扭失稳晚于强度破坏发生。

(5)预制板横桥向为预应力混凝土体系,按 A 类预应力混凝土构件设计,正截面拉应力、斜截面主拉应力、正截面抗弯强度均满足规范要求。预制板纵桥向为钢筋混凝土体系,墩顶处最大裂缝宽度 0.175 mm ,跨中处最大裂缝宽度 0.112 mm ,均满足 I 类环境不超过 0.2 mm 的要求。

(6)考虑混凝土板和钢梁相对位移,由车道荷载频遇值引起的挠度最大值为 46 mm ,位于 42 m 跨跨中,挠跨比为 $1/913$,小于 $1/500$ 的规范限制要求。

5 结 语

丰城紫云大桥陆上引桥为双主梁组合钢板梁结构。钢梁采用焊接工字形钢纵梁、中间小横梁和支点横梁组成的双主梁梁格体系,桥面板采用全宽预制的预应力混凝土桥面板。该工程结合组合结构的受力特点,优化钢纵梁构造,主梁钢材指标减少到约 125 kg/m^2 ,同时加劲肋的减少显著降低了钢梁加工制造和运营养护的工作量,提高结构耐久性能,主体结构也极为简洁美观。为了适应工业化建造的趋势,桥面板湿接缝混凝土采用 UHPC,外伸钢筋为直筋,现场无焊接和绑扎工作,加快现场施工周期,提高了施工效率。板梁连接采用一种创新构造,即灌浆剪力键,改善了钢梁与桥面板连接部位的受力状态,提高了连接界面的耐久性,加快了施工的效率。该桥设计

时践行创新引领,注重工匠精神,整体造型十分轻巧美观,如图 13 所示,上部结构综合造价与小箱梁相当,经济性突出,为今后同类型桥梁的设计提供借鉴。该桥于 2021 年 12 月开工,计划于 2024 年底建成通车。

参考文献:

[1] 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司. 丰城市紫云大桥新建工程图纸[Z].上海:上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,2021.
[2] 邵长宇. 梁式组合结构桥梁[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
[3] 常付平,汤虎,邵长宇. 巢湖大桥主桥设计[J]. 桥梁建设,2020,50(6):91-96.
[4] 林友强,邵长宇,张春雷,等. 一种混凝土桥面板与钢梁的连接构造:



图 13 紫云大桥陆上引桥效果图

中国,CN202320162397.9[P].2023-08-22.
[5] 林友强,邵长宇,张春雷,等. 一种混凝土桥面板与钢梁的连接构造及其施工方法:中国,CN202310085584.6[P].2023-05-09.
[6] 林友强. 梁桥:中国,CN202222086083.3[P].2023-03-28.

~~~~~  
(上接第 89 页)

表 3 E2 地震作用下各墩柱最大弯矩及其承载力汇总表

| 墩底墩号  | 轴力/kN   | 横桥向弯矩 /<br>(kN·m) | 轴力承载能力<br>$N_u$ /kN | 弯矩承载能力<br>$M_{bu}$ /(kN·m) |
|-------|---------|-------------------|---------------------|----------------------------|
| BYZ34 | -6 417  | 33 745            | 8 454               | 44 641                     |
| BYZ35 | -26 269 | 60 093            | 55 735              | 128 882                    |
| BYZ36 | -27 134 | 72 046            | 46 093              | 123 555                    |
| BYZ37 | -25 138 | -45 597           | 46 293              | -84 736                    |
| BYZ38 | -7 593  | 20 047            | 19 789              | 52 635                     |

6 结 语

城市高架桥斜交跨河,为平顺过渡两侧引桥,采用斜转正变高现浇连续箱梁方案是可行恰当的。但因其构造和受力复杂,在设计阶段需充分考虑长短腹板的受力异性,上部计算时可采用梁格模型等精

细化分析方法。另外由于斜桥在受地震作用时表现出来的动力特性,需采用非线性时程方法进行抗震分析。抗震计算表明,在地震基本烈度不大的区域(0.1g 及以下),花瓶类实体墩由于其尺寸较大,在 E2 地震作用下桥墩处于弹性状态且承载力仍有较大富余量。

参考文献:

[1] 汉勃利,郭文辉.桥梁上部构造性能[M].北京:人民交通出版社,1982.  
[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》应用指南[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.  
[3] 张忠效,张建勋.斜交转正交现浇预应力混凝土连续箱梁桥设计[J]. 城市建设,2011(15):386-387.