

大跨径钢-UHPC组合梁桥设计与整体受力分析

王继全, 刘晓奎

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 嘉兴市市区快速路环线工程跨越京杭大运河地面老桥龙凤桥, 采用跨径布置为 65 m+95 m+65 m 的大跨径钢-UHPC 连续组合梁方案, 该方案在设计、施工和经济性方面都具有较显著的优势。采用 Midas Civil 2021 软件建立桥梁空间有限元模型, 在承载能力极限状态和正常使用极限状态下各项验算均满足规范要求, 可以为类似桥梁设计提供参考。

关键词: 超高性能混凝土(UHPC); 组合梁; 经济性; 承载力; 有限元分析

中图分类号: U448.21+6

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)04-0071-03

0 引言

利用 UHPC(Ultra-High Performance Concrete)材料高强度、高韧性、耐久性强的性能优势, 钢-UHPC 组合梁解决了普通钢-混组合梁桥面板自重过大、抗拉强度低的问题, 可以有效减轻组合梁桥结构自重和基础规模, 提高结构耐久性和桥梁的跨越能力等^[1-5]。

嘉兴市市区快速路环线工程跨京杭大运河地面老桥龙凤桥, 采用大跨径钢-UHPC 组合梁方案, 本文首先介绍了其设计要点、技术先进性和经济性, 再利用 Midas 软件建立了钢-UHPC 组合梁的全桥有限元模型, 分析了其受力特性。

1 工程背景

1.1 工程概况

嘉兴市市区快速路环线工程采用高架桥梁形式, 双向 6 车道, 在中环西路跨越老京杭大运河地面老桥龙凤桥, 河道规划为 VI 级航道, 河口宽度约 80 m, 通航净宽不小于 22 m。为减小阻水率, 水利部门要求新建高架桥尽可能不设水中墩。另外, 京杭大运河是世界文化遗产, 文保部门要求尽可能一跨过河。

本桥设计采用钢-UHPC 连续组合梁桥方案, 跨径布置为 65 m+95 m+65 m, 荷载等级为城-A 级,

设计基准期为 100 a, 横断面布置为: 0.5 m(防撞墙)+11.75 m(机动车道)+0.5 m(分隔墩)+11.75 m(机动车道)+0.5 m(防撞墙)=25.0 m, 见图 1、图 2。

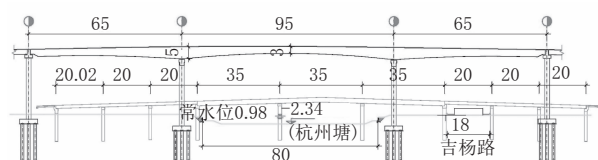


图1 龙凤桥主桥总体布置图(单位:m)

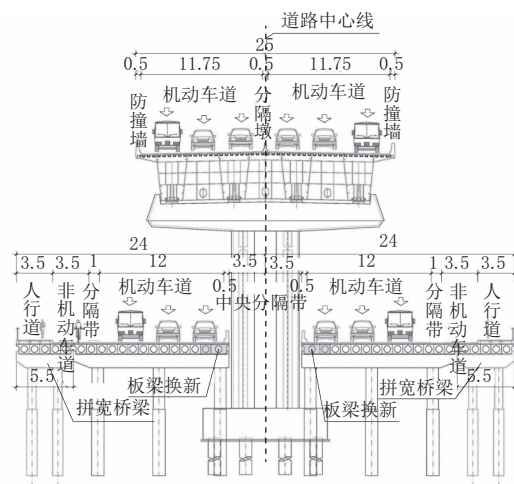


图2 龙凤桥主桥横断面图(单位:m)

1.2 上部结构设计

上部结构桥宽 25 m, 横向由 4 片箱梁组成, 梁距 6.0 m, 中间采用横梁连接, 横梁间距 10.5 m。钢梁顶板满铺, 宽 24.7 m, 板厚 12~16 mm, 采用 U 形加劲肋。底板标准宽度 2 150 mm, 板厚 20~30 mm, 采用一字加劲肋。UHPC 桥面板厚 60 mm, 桥面铺装采用 40 mm 沥青混凝土, UHPC 桥面板与钢梁采用剪力钉连接, 剪力钉型号 $\phi 10 \times 40$ 。UHPC 桥面板内布置纵横向钢

收稿日期: 2023-03-30

作者简介: 王继全(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

通信作者: 刘晓奎(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。电子信箱: liuxiaoluan@smedi.com

筋,直径 16 mm,间距 100 mm。

1.3 上部结构施工要点

钢-UHPC 组合梁的钢梁通过工厂预制,运到现场吊装架设,上部结构预制及安装流程如下。

(1)钢梁节段在钢厂内由顶板、底板和腹板焊接完成,全桥共分为 36 个节段,运至施工现场。

(2)采用架桥机完成钢梁节段的拼接,焊接钢梁之间的横梁和横梁顶面的剪力钉;受施工现场场地狭小、老桥承载力有限及古运河非物质文化遗产保护等影响,龙凤桥钢箱梁架设采用架桥机施工,并在施工过程中聘请第三方监测单位对地面桥、临时支墩及钢箱梁进行全程实时监测,确保施工安全。

(2)利用钢箱梁顶板作为桥面板的模板,浇筑桥面板 UHPC。

(3)待 UHPC 强度达到设计要求,对 UHPC 桥面板刻槽糙化,施工防撞护栏和附属工程。

钢-UHPC 组合梁现场安装见图 3。



图 3 钢-UHPC 组合梁现场安装

1.4 技术先进性和经济性

(1)技术先进性

本桥主跨跨径较大(95 m),预应力混凝土连续梁和波形钢腹板连续梁方案均需要悬臂节段浇筑,施工周期长;大跨径预应力混凝土连续桥在运营期易出现箱梁裂缝和梁体下挠等病害,影响结构使用性能和使用寿命^[6]。经对比分析,上述两种方案结构自重均是钢-UHPC 组合梁方案的 3 倍左右,需要较大的基础体积,地面桥拆除改建工程量和造价同步增加。

UHPC 是一种材料组合达到最佳颗粒级配的水泥基复合材料,材料内部致密,其氯离子扩散性能、碳化深度、渗水性和耐磨性等耐久性指标都优于普通混凝土,具有良好的耐久性^[1]。UHPC 抗拉强度可以达到 7~12 MPa,能明显提高组合梁负弯矩区的抗拉能力,无需采用普通钢混组合梁张拉预应力、支座顶升等施工方法,简化现场施工工序,实现快速化施工。

(2)经济性

分别对相同跨径和技术标准的预应力混凝土连

续梁、波形钢腹板连续梁和钢-UHPC 组合梁方案进行经济性分析。预应力混凝土连续梁方案综合单价为 6 750 元/m²,其中上部结构 4 000 元/m²,下部结构 2 750 元/m²;波形钢腹板连续梁方案综合单价为 7 400 元/m²,其中上部结构 4 750 元/m²,下部结构 2 650 元/m²;钢-UHPC 连续梁方案综合单价为 7 650 元/m²,其中上部结构单价 5 500 元/m²,下部结构单价 2 150 元/m²。

由此可见,钢-UHPC 组合梁方案自重较轻,在对基础形式进行优化后,下部结构单价比预应力混凝土连续梁和波形钢腹板连续梁方案减小约 20%,综合单价仅比预应力混凝土连续梁方案增加约 12%,比波形钢腹板连续梁方案增加约 3%,同时该方案对地面桥拆除改建工程量最小,综合经济优势明显。

2 钢-UHPC 组合梁有限元模型

2.1 模型建立

采用 Midas Civil 2021 建立钢-UHPC 组合梁桥的空间有限元模型,钢主梁、横梁、UHPC 桥面板均采用梁单元模拟,钢主梁与 UHPC 桥面板采用弹性连接模拟,有限元模型见图 4。

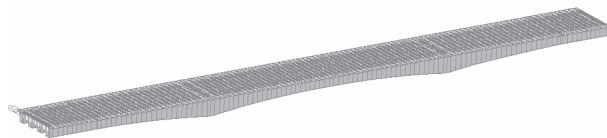


图 4 钢-UHPC 组合梁空间有限元模型

2.2 主要施工阶段划分

计算模型中施工阶段划分如下:

- (1)CS1:架设钢梁,加载钢梁及横梁自重;
- (2)CS2:现浇 UHPC 桥面板,施加桥面板自重;
- (3)CS3:激活桥面板单元,形成组合截面;
- (4)CS4:附属设施施工;
- (5)CS5:收缩徐变 10 a。

3 计算结果分析

3.1 钢梁应力分析

在施工阶段,施加二期恒载后钢梁应力最大,最大拉应力出现在中跨跨中下缘,为 77.2 MPa,最大压应力出现在中支点下缘,为 -104.7 MPa,满足设计要求,见图 5。

在荷载作用基本组合^[7]下,钢梁主梁最大拉应力为 216 MPa,最大压应力为 -205 MPa,不大于 270 MPa,满足规范要求。基本组合下,钢梁主梁最大剪应力为

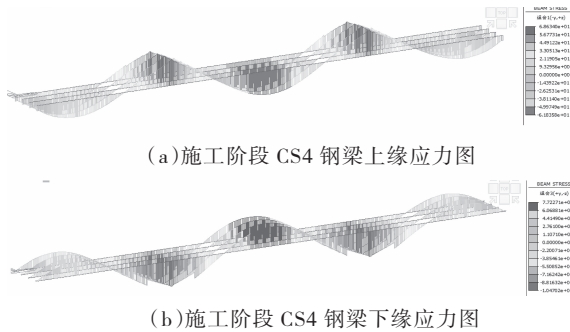


图5 二期恒载后钢梁应力图

53 MPa,不大于 160 MPa,满足规范要求。折算应力,满足规范要求。基本组合钢梁应力包络图见图 6。

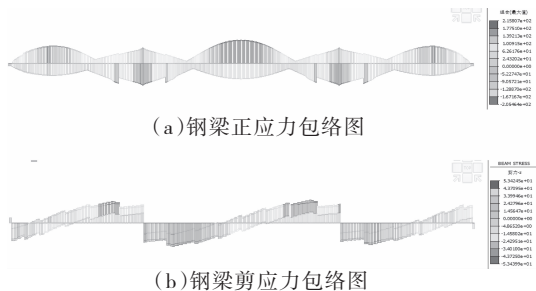


图6 基本组合钢梁应力包络图

3.2 UHPC 桥面板应力分析

在荷载作用基本组合下,UHPC 桥面板纵向应力见图 7。其中,中支点桥面板最大拉应力 12.2 MPa,超过了 UHPC 弹性抗拉强度 7 MPa,小于 UHPC 极限抗拉强度 15 MPa,此时 UHPC 桥面板屈服,须验算 UHPC 开裂后负弯矩区组合截面的抗弯承载力。

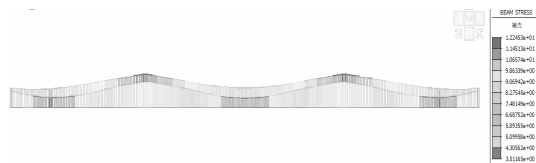


图7 基本组合 UHPC 桥面板正应力图(MPa)

3.3 稳定性分析

根据文献[8]第 7.3.1 条,连续组合梁负弯矩区钢梁为箱形截面且腹板有加劲措施时,可不必进行负弯矩区侧扭稳定性验算。根据文献[9]第 5.3.3 条,腹板高厚比满足局部稳定要求。

3.4 承载力极限状态分析

由图 8 可知,基本组合下,组合梁跨中最大正弯矩为 41 760.1 kN·m,支点最大负弯矩为 -94 713.5 kN·m。在承载力基本组合下,UHPC 进入屈服阶段,截面抗弯承载力由钢筋和钢梁形成的组合截面共同承担,计算该组合截面的抗弯承载力为 2.22×10^5 kN·m,大于组合梁最大负弯矩 $1.1 \times 94713.5 = 1.04 \times 10^5$ kN·m,抗弯承载力满足规范要求。组合梁最大竖向抗剪承载力为 3.22×10^4 kN,大于基本

组合下最大剪力 $1.1 \times 11\ 683.7 = 12\ 852.1$ kN,抗剪承载力满足规范要求。



图8 基本组合下组合梁弯矩包络图

3.5 正常使用极限状态分析

频遇组合下,UHPC 桥面板纵桥向应力分布见图 9,最大拉应力约为 8.9 MPa,偏安全地按轴心受拉构件计算裂缝宽度,墩顶截面裂缝宽度为 0.149 mm,小于 0.20 mm,满足规范要求。

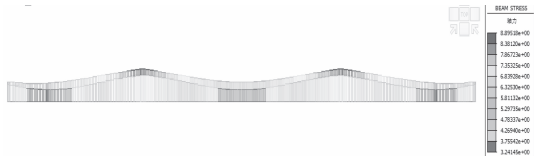


图9 频遇组合 UHPC 桥面板应力包络图

在汽车荷载作用下,组合梁最大挠度为 85.0 mm,小于规范规定的挠度限值 1/500 即 190 mm,挠度验算满足规范要求。

4 结 论

嘉兴市市区快速路环线工程跨越京杭大运河地面老桥龙凤桥,采用大跨径钢-UHPC 组合梁方案,建立了全桥有限元模型并进行了计算分析,主要结论如下。

(1)钢-UHPC 组合梁在百米跨径桥梁工程中,在设计、施工、技术和经济性方面均具有良好的比选优势。

(2)钢-UHPC 组合梁在正常使用极限状态和承载力极限状态的各项指标均满足规范要求。

参考文献:

- [1] 邵旭东. 钢-超高性能混凝土轻型组合桥梁结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [2] 刘新华, 周聪, 张建仁, 等. 钢-UHPC 组合梁负弯矩区受力性能试验[J]. 中国公路学报, 2020, 33(5): 110-121.
- [3] 赵明, 何湘峰, 邱明红, 等. 全预制钢-UHPC 轻型组合梁在中小跨径桥梁中的设计与应用研究[J]. 公路工程, 2019, 44(5): 63-66.
- [4] 李志锋, 何湘峰, 赵旭东, 等. 装配式钢-UHPC 轻型组合梁设计与整体受力分析[J]. 公路工程, 2021, 46(1): 98-102.
- [5] 邓舒文. 全预制钢-UHPC 轻型组合桥梁设计方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- [6] 王磊. 大跨度预应力混凝土连续刚构桥的病害成因分析及处理[J]. 工程与建设, 2022, 36(3): 718-720.
- [7] JTG D60—2015, 公路桥涵设计通用规范[S].
- [8] JTG/T D64—01—2015, 公路钢混组合桥梁设计与施工规范[S].
- [9] JTG D64—2015, 公路钢结构桥梁设计规范[S].