

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.12.013

主跨 245 m 组合钢箱梁桥总体设计

姜 洋

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要:考虑到桥梁景观和通行重载交通, 济南凤凰黄河大桥跨堤引桥采用主跨 245 m 的 3 跨变梁高连续组合钢箱梁桥, 这是目前世界上跨径最大的组合钢箱梁桥。该桥主要设计特点包括: 采用公路、轨道交通、人行和非机动车同层布置, 最大桥宽达到 61.7 m, 实现了桥位资源和土地的集约化利用理念; 主梁采用变高中心箱室与超大挑臂相结合的创新结构形式, 车行道区域采用新型 UHPC- 钢组合桥面板结构, 避免了钢桥面板易出现的疲劳问题, 减轻了结构自重; 中墩墩顶处混凝土桥面板采用不配置桥面板预应力而允许开裂、但控制裂缝宽度的设计理念。对钢主梁、UHPC 桥面板和底板结合混凝土进行计算分析的结果表明, 主桥结构安全性满足规范要求。

关键词: 组合钢箱梁; 组合桥面板; 公轨合建桥; UHPC; 底板混凝土

中图分类号: U448.21

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)12-0060-05

0 引 言

济南凤凰黄河大桥跨黄河大堤引桥在堤身和淤背区范围内不允许设墩, 且桥位轴线与大堤斜交, 因此跨黄河北侧大堤桥梁跨径需求为 245 m。

可采用的桥型为梁式桥、斜拉桥、拱桥或自锚式悬索桥。由于凤凰黄河大桥为多塔自锚式悬索桥, 从桥梁美学角度出发, 引桥桥型确定为梁桥体系, 以重点突出主桥造型, 并与周边环境相协调, 如图 1 所示。



图 1 济南凤凰黄河大桥及其引桥

受堤顶净空限制, 桥墩高度相对较小, 如采用连续刚构体系, 温度应力将导致中墩受力过大; 而中支点处主梁高度受限, 也无法采用混凝土连续箱梁桥。由于本工程通行重载交通, 钢桥面板可能出现疲劳破坏, 桥面铺装也易破损, 从而降低桥梁的耐久性, 增加运营期间的养护难度^[1-3], 因此最终采用连续组合钢箱梁桥结构体系。

组合结构桥梁能充分发挥钢和混凝土 2 种材料的性能优势且便于施工, 因此在欧美日等国桥梁建设中占有重要地位, 取得了世人瞩目的成就^[4-7]。在

法国, 组合结构桥梁最有竞争力的跨径范围可达 30~110 m; 跨度 40~100 m 范围的公路桥, 85% 是组合结构桥梁; 近年的 TGV 高速铁路桥梁中, 组合结构桥梁占比 45%。英国大多数 20~160 m 及以上跨径的公路桥, 组合结构桥梁 also 具有很强的竞争力。

20 世纪 80 年代以来, 欧美日等国在组合钢箱梁的设计和施工等方面进行了大量研究工作。随着基础理论的深入研究和设计理论、方法的进步, 先后建造了大量公路、铁路大跨径组合钢箱梁桥。本桥建成前, 世界上最大跨径的连续组合钢箱梁桥为委内瑞拉的 Caroni 桥, 其主跨跨径达 213.75 m, 主梁采用单箱双室结构, 桥面宽度 30.4 m。这些桥梁的建设, 在经济性、耐久性和桥梁美学等方面, 充分体现了组合结构桥梁的竞争能力。

1 总体布置方案

1.1 桥式布置

济南凤凰黄河大桥跨北侧大堤桥梁采用跨径组合为 154 m+245 m+154 m=553 m 的 3 跨变梁高连续组合钢箱梁桥, 边中跨比为 0.63。堤顶净空 4.5 m, 支点处梁高 10.0 m, 高跨比 1/24.5; 中跨跨中处梁高 4.8 m, 高跨比 1/51。跨黄河北侧大堤桥梁桥跨布置见图 2。

为保持两岸大堤之间主梁结构外形一致, 跨北侧大堤桥梁采用整幅断面。由于主桥桥塔位于主梁中央, 因此桥塔和吊索区域的宽度在主桥范围外并不需

收稿日期: 2024-01-14

作者简介: 姜洋(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 从事桥梁结构设计和研究工作。

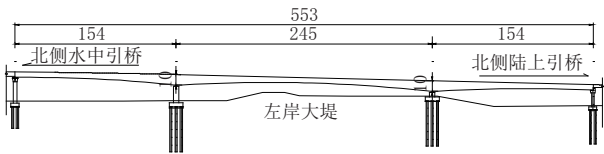


图 2 跨黄河北侧大堤桥梁立面布置图(单位:m)

要。水中引桥采用顶推施工,不宜采用变宽断面,需要在跨堤引桥范围内进行桥宽渐变。跨堤桥通过中心箱室梁高和桥宽的变化来适应主梁变高和变宽的要求,两侧超大挑臂结构形式全桥保持不变。

主梁采用整幅布置,双向 8 车道,车行道两侧设置人行道和非机动车道,中央预留轨道交通。主梁标准横断面布置为:1.75 m(人行道)+3 m(非机动车道)+0.5 m(防撞护栏)+15.5 m(机动车道)+(1.15~5)m(公轨隔离带)+10.2 m(预留轨道交通)+(1.15~5)m(公轨隔离带)+15.5 m(机动车道)+0.5 m(防撞护栏)+3 m(非机动车道)+1.75 m(人行道)=54.0~61.7 m,见图 3。

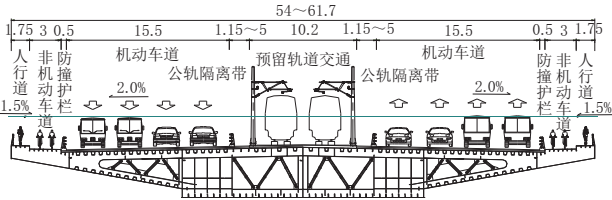


图 3 主梁标准横断面(单位:m)

1.2 结构体系

中支点和边支点处设置摩擦摆式减隔震支座,运营状态下采用常规 3 跨连续梁支承体系。

北侧跨堤桥若采用常规球钢支座将难以满足抗震设计要求,且桥梁跨径较大,因此在地震作用下纵、横桥向固定支座均需剪断,通过摩擦摆式减隔震支座来减震耗能。

2 结构设计

2.1 主梁

2.1.1 钢梁

钢结构主梁由闭口箱梁、横隔板和人非挑臂组成。其中主梁标准节段长度为 12 m,横隔板间距为 4 m,除两侧端横梁采用实腹式横隔板外,其余均采用空腹式横隔板。

2.1.1.1 闭口钢箱梁

闭口钢箱梁标准横断面见图 4。

闭口钢箱梁采用单箱 4 室箱形变宽断面,由中心箱室和挑臂箱室组成,其中挑臂箱室尺寸全桥保持不变,轻轨轨道下方设置小纵梁,梁高 4.8~10 m,全宽 54.0~61.7 m。支点处梁高虽然高达 10 m,但由

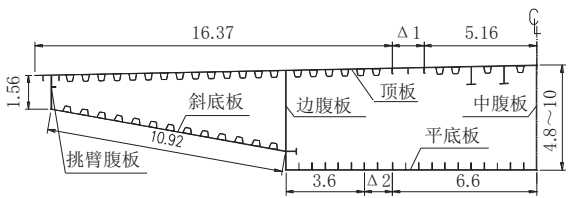


图 4 闭口钢箱梁标准横断面(单位:m)

于采用了大挑臂结构,使得主梁从侧面看非常轻薄。

钢梁顶板宽 44.5~52.2 m,板厚 16~50 mm,车行道和轨道交通范围内采用 U 形肋,其余区域采用板肋;U 形肋高 300 mm,开口宽 360 mm,标准间距 720 mm,当顶板厚度大于 20 mm 时,U 形肋厚 10 mm,其余厚 8 mm。

钢梁平底板宽 21.56~29.30 m,板厚 20~40 mm,加劲采用板肋,板厚 20~40 mm,标准间距 600 mm。钢梁斜底板宽 10.92 m,板厚 12 mm,加劲采用 U 形肋,U 形肋板厚 6 mm,高 260 mm,开口宽 400 mm,标准间距 800 mm。

钢梁腹板厚 20~40 mm,腹板纵向加劲除边腹板与斜底板相交处采用 T 形肋外,其余均采用板肋,板厚为 20~40 mm;横向加劲采用 T 形肋,根据腹板板厚不同,高度分为 300 mm 和 450 mm 两种。

由于挑臂箱室悬臂长度大,斜底板与边腹板相交处存在应力集中现象,边腹板可能产生面外失稳,因此在挑臂箱室和主箱室交接处沿腹板纵向设置 T 形加劲肋。

2.1.1.2 横隔板

本桥除支点位置采用实腹式横隔板外,其余位置均采用实腹式和空腹式相结合的横隔板设置方式,以减少横隔板用钢量。横隔板标准间距 4 m,由隔板、等边双角钢斜撑和节点板组成。中心箱室空腹式部分宽度为 6.75 m,利用实腹式部分适应闭口钢箱梁高度和宽度的变化。根据梁高不同,分为 V 形和 X 形 2 种形式,见图 5。

双角钢具有良好的面内和面外刚度,能够满足挑臂根部在压弯荷载作用下的强度和稳定,因此采用双角钢作为斜撑。同时为了避免斜撑与节点板焊接产生的疲劳破坏,节点板和斜撑通过高强螺栓连接。

2.1.1.3 人非挑臂

人非挑臂设置在横隔板处,分为 2 种类型,分别为普通人非挑臂和实腹式端横梁横隔板处挑梁,均为工字形断面。普通人非挑臂截面高度由 1.232 m 渐变至根部 1.573 m,挑臂外缘沿纵桥向布置 1 道 L 形小纵梁;实腹式端横梁横隔板处挑梁的腹板即为实腹式

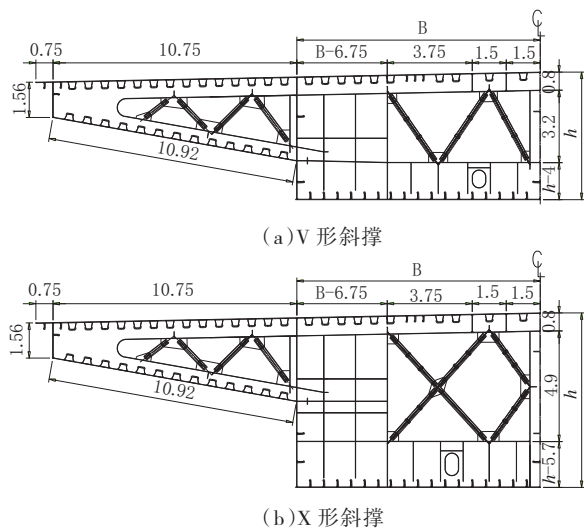


图 5 空腹式横隔板标准横断面(单位:m)

端横梁横隔板,挑梁其他构造与普通非挑臂相同。

2.1.2 底板结合混凝土

由于本桥中跨跨径达到 245 m,中支点梁高仅为 10 m,主梁的高跨比相对较小,因此中支点处底板压应力很大。为了避免底板失稳,减小钢底板板厚和用钢量,本桥在支点处设置底板结合混凝土。

支点处采用底板结合混凝土后,由于支点附近主梁刚度增加,结构将产生内力重分配,支点处负弯矩会有所增加^[4]。综合考虑结构内力和刚度的影响,本桥在中支点边跨侧 40.5 m、中跨侧 32.5 m 范围内设置钢梁底板结合混凝土,与底板共同承担荷载作用。底板结合混凝土采用 C50 低收缩混凝土,厚度为 0.35 ~ 1.20 m。

为确保中支点底板与结合混凝土协同受力,钢梁底板和腹板设置 $\phi 22 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 焊钉,横隔板设置 $\phi 16 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ 焊钉,焊钉标准间距均为 150 mm;底板结合混凝土范围内采用底板纵向开孔板加劲肋,开孔直径 60 mm,孔距 150 mm,孔内设置 1 根直径 20 mm 钢筋。底板结合混凝土顶、底面纵向钢筋直径 22 mm,横向钢筋直径 16 mm,标准间距均为 150 mm。

2.1.3 桥面板

由于本工程通行重载交通,为了避免钢桥面板易出现的疲劳问题,并减轻恒载自重,仅在机动车道内设置 8 cm 等厚度现浇 UHPC 桥面板,形成正交异性组合桥面板。此举还可有效减小中跨跨中主梁钢顶板压应力。

上部结构的减轻不仅能减少下部基础的成本,还能减少施工中临时墩的支反力,因此对大跨径桥梁有很大的经济效益。

钢顶板采用 $\phi 13 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 焊钉。在横桥向,标准焊钉间距 360 mm,腹板两侧各 2.7 m 范围内焊钉间距 240 mm;在纵桥向,标准焊钉间距 360 mm,横梁和横隔板附近焊钉间距 240 mm。

跨中断面 UHPC 桥面板钢筋布置见图 6。UHPC 桥面板布置纵横向钢筋各一层,横向钢筋直径均为 16 mm,中支点两侧 83 m 范围内纵向钢筋直径为 20 mm,其余范围纵向钢筋直径为 16 mm,纵横向钢筋间距均为 120 mm。腹板处横向增加 1 根直径 12 mm、间距 120 mm 的钢筋。

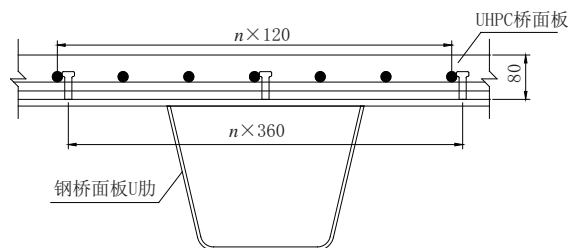


图 6 跨中断面 UHPC 桥面板钢筋布置(单位:mm)

2.2 下部结构

中墩和边墩均采用设尖端六边形的分离式双柱薄壁墩,以减小流水压力和冬季流冰压力,同时也能保护墩柱,避免碰撞损坏。标准段壁厚 0.6 m,墩顶实心段高 3.0 m,墩底空心段填充 C20 素混凝土至最高冰凌水位。

中墩基础立面图和平面图见图 7、8。

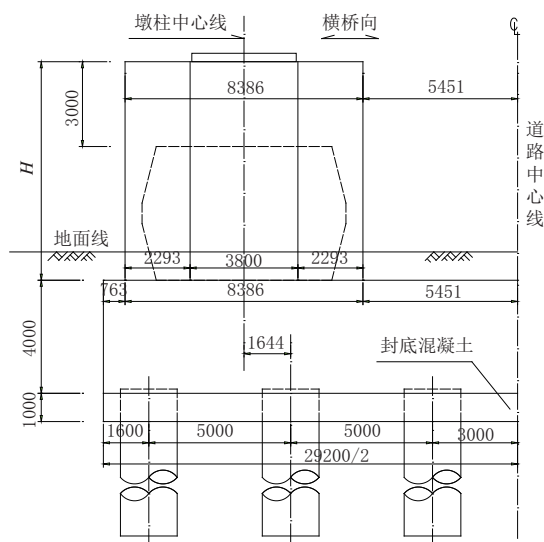


图 7 中墩基础立面图(单位:mm)

中墩采用整体式矩形承台,厚 4.0 m,平面尺寸为 $29.2 \text{ m} \times 13.2 \text{ m}$,采用直径 2.0 m 钻孔灌注桩基础。边墩采用分离式矩形承台,厚 3.2 m,单个承台平面尺寸为 $12.5 \text{ m} \times 8.0 \text{ m}$,采用直径 1.8~2.1 m 钻孔灌注桩基础。

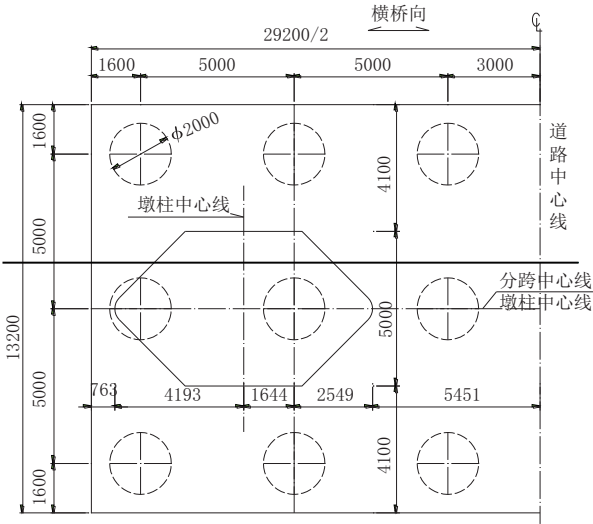


图 8 中墩基础平面图(单位:mm)

3 结构受力分析

采用 TDV 程序建立空间有限元计算模型,见图 9。将中墩顶左右约 15%中跨长度范围作为桥面板开裂区,模拟实际施工过程并进行全桥静力分析,按照刚成桥和成桥 10 a 这 2 种运营工况进行受力验算。



图 9 空间有限元计算模型

计算结果表明:在基本组合最不利工况下,钢主梁最大拉应力 232.7 MPa,最大压应力 179.9 MPa;UHPC 桥面板最大压应力标准值 30.0 MPa,开裂区桥面板最大裂缝宽度 0.149 mm,钢筋基本组合最大拉应力 172.7 MPa;底板结合混凝土不出现拉应力,最大压应力标准值 22.5 MPa;结构受力满足《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)要求。由活载引起的主跨跨中竖向挠度 0.375 m,小于《公路钢结构桥梁设计规范》容许挠度值 $L/500=0.49$ m;活载引起的端梁最大转角 2.97‰,小于《城市道路与轨道交通合建桥梁设计规范》(CJJ 242—2016)允许值 3‰,主梁刚度满足《公路钢结构桥梁设计规范》和《城市道路与轨道交通合建桥梁设计规范》要求。

4 施工方案

本桥总体施工步骤示意图见图 10。
具体施工步骤如下。

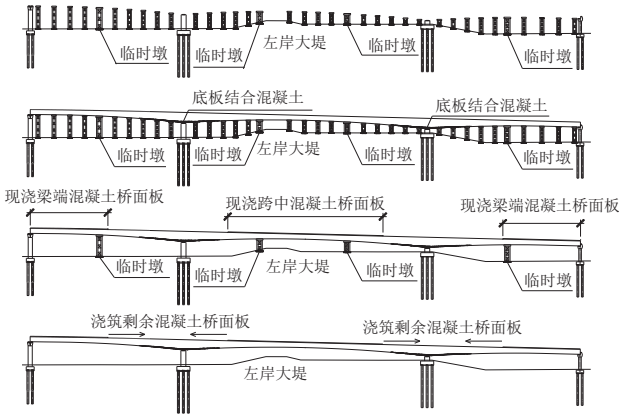


图 10 总体施工步骤示意图

- (1)根据现场实际运输和吊装条件,本桥采用少支架施工法。
- (2)根据本桥钢箱梁的结构特点,为降低整体焊接变形,有效缩短桥位施工周期,采用分段建造工艺,即中间箱体采用桥位支架原位拼装工艺(见图 11),两侧挑臂采用工厂化节段预拼工艺(见图 12)。



图 11 中间箱体胎架上散拼现场照片



图12 挑臂单元吊装现场照片

- (3)边跨施工完成后,在合适的温度条件下,采用 4 台 50 t 千斤顶调整合龙段空间姿态,温度配切合龙。
- (4)浇筑中墩支点处底板结合混凝土,除保留临时墩外,拆除其余支架。
- (5)先浇筑主跨跨中和边跨梁端处混凝土桥面板,待桥面板与钢梁结合后拆除临时墩,从主跨跨中和边跨分别向中墩浇筑剩余混凝土桥面板。
- (6)最后进行全桥附属结构施工。

5 结 语

(1)济南凤凰黄河大桥北侧跨黄河大堤桥采用主跨 245 m 的 3 跨连续组合钢箱梁,为目前世界同类型桥梁的最大跨径,该桥于 2022 年 1 月建成通车。

(2)全面贯彻落实新发展理念,深入实施可持续发展战略,创新推进公路、轨道交通、人行和非机动车道共建,实现了桥位资源和土地的集约化利用,减少了对河道和环境的干扰,降低了工程成本。

(3)主梁采用变高中心箱室与超大挑臂相结合,横隔板采用实腹式和空腹式相结合的创新结构形式,实腹式横隔板的宽度和高度随桥梁的变宽变高同步变化,空腹式桁架全桥保持统一,便于工厂化批量生产。

(4)主梁车行道区域采用新型的 UHPC- 钢组合桥面板结构,在提高钢桥面板疲劳性能的同时,减轻了结构自重,同时减少了下部结构材料用量和施工中临时墩的支反力,提高了大跨径组合钢箱梁桥的

经济性。

(5)中墩墩顶处混凝土桥面板采用不配置桥面板预应力而允许开裂、但控制裂缝宽度的设计理念,简化了桥面板构造,方便施工。

参考文献:

[1] 祝志文,黄炎,向泽,等.货运繁重公路正交异性板钢桥弧形切口的疲劳性能[J].中国公路学报,2017,30(3):104-112.

[2] 王春生,付炳宁,张芹,等.正交异性钢桥面板足尺疲劳试验[J].中国公路学报,2013,26(2):69-76.

[3] 林上顺.正交异性钢桥面板典型细节的疲劳损伤分析[J].桥梁建设,2020,50(4):54-60.

[4] 邵长宇.大跨度钢-混凝土连续组合箱梁桥关键技术研究[D].上海:同济大学,2006.

[5] 卢彭真.钢-混凝土组合箱梁空间分析理论与应用研究[D].成都:西南交通大学,2009.

[6] 聂建国,刘明,叶列平.钢-混凝土组合梁结构[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.

[7] 黄侨,周志祥.桥梁钢-混凝土组合结构设计原理[M].北京:人民交通出版社,2004.

(上接第 49 页)

境相融合的材质,以形成闭合游线。同时视景区景点情况设置盲文地图、无障碍指示标识、紧急呼叫装置等信息交互设施。

无障碍旅游服务内容见表 4。

表 4 无障碍旅游服务圈内容

类型	无障碍环境场景
出行交通	火车站、港口码头、旅游大巴、停车场
旅游景区	导示导览、无障碍游览路线、紧急呼叫设施、游憩设施
旅游景点	无障碍出入口、低位服务台、公共厕所
旅游服务	游客服务中心、无障碍辅助设施租用、信息服务
数字应用	信息平台、旅游服务 APP、信息交互与辅助系统

4 结 语

无障碍环境的建设是一个长期、持续的过程,需要可持续发展的运行机制来保障各项具体工作稳步推进。无障碍环境建设体系从宏观角度梳理区域各类无障碍设施之间的联系,有利于形成全局观念,统筹和协调推进区域无障碍建设工程,使各类无障碍设施更高效地发挥作用,促进无障碍事业的高质量发展。

参考文献:

[1] GB 55019—2021,建筑与市政工程无障碍通用规范[S].