

大跨度空间斜对称纽带拱桥设计与分析

滕小竹

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要:大运路潇河大桥为世界首座大跨度空间斜对称纽带拱桥,桥梁跨径布置为65 m+110 m+110 m+65 m=350 m。大桥通过横梁连接主、副拱与主梁形成拱梁固结,将空间斜对称纽带拱桥力学特性转化为拱梁组合体系,结构自平衡,无水平推力;桥梁拱肋采用抛物线拱轴线、箱形断面,斜跨主拱跨径国内最大为229 m;主梁采用半封闭双边钢箱梁;对桥梁进行了空间静力、疲劳、稳定、抗震性能整体分析及拱脚局部分析,结果满足规范要求。

关键词:拱桥;斜对称纽带拱;斜跨主拱;外倾副拱;拱梁组合;桥梁设计

中图分类号:U448.22

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2024)08-0038-05

1 工程概况

大运路潇河大桥位于山西省综改示范区大运路上,跨越潇河,与潇河南北路形成半互通立交,主线全长1 164 m,其中桥梁长968 m。大桥位于潇河景观核心区域,不仅承载着南北向的交通功能,也是重要的景观节点。

桥址位于太原盆地南部次稳定工程地质亚区,场地有一定厚度的粉细砂及细砂层,对抗震及桩基施工有不利影响。桥梁主要技术标准如下。

(1)道路等级为城市主干路,红线宽度66 m,设计车速为60 km/h。

(2)设计荷载为城-A级。

(3)设计安全等级为一级,设计基准期及设计使用年限均为100 a。

(4)地震设防标准:地震基本烈度8度,重现期为475 a和2 475 a的地震动峰值加速度分别为0.221g和0.426g,设计特征周期0.55 s,主桥抗震设防类别为乙类。

(5)抗风设计标准:设计基准风速为32.6 m/s。

(6)水文及通航标准:100 a一遇设计洪水位776.4 m,常水位773.5 m,无通航要求。

2 桥梁造型及总体设计

2.1 桥梁造型设计

大运路潇河大桥吸收“山、水、人、文”等设计元

素,提取当地山水文化曲线要素,结合周边环境景观需求,独创螺旋形空间斜对称纽带景观拱桥,桥梁造型为世界首创。桥梁突破传统拱桥造型,主拱斜跨两个主跨,副拱分别位于主跨两侧向外倾斜伸展,中间通过横梁连接,演绎成闭合螺旋形空间斜对称纽带景观拱桥,景观上形成拱中有拱、景中有景的穿越感^[2]和跃动感。螺旋形空间斜对称纽带拱结构空间丰富,采用黄金分割比例匀称美观,全角度视角均造型变化独特,游走在舒展、飘逸的拱肋之间,宛如置身三晋大地的山水变化之中(见图1)。拱、梁、索均采用纯白色(金属色),体现纯净、自然、生态、科技的设计理念。



图1 潇河大桥景观效果

2.2 结构体系

桥梁拱肋由一片斜跨主拱,两侧外倾副拱组成,成反对称形态,在拉索的作用下,存在顺时针扭转的趋势(见图2)。

针对场地8度高烈度区,设计比选了拱墩梁固结、拱墩固结以及拱梁固结三种体系,前两种体系纵向水平推力过大,基础规模大造价太高,第二种体系还存在较大横向水平推力;第三种体系,通过横梁连

收稿日期:2023-06-28

作者简介:滕小竹(1982—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁结构设计工作。

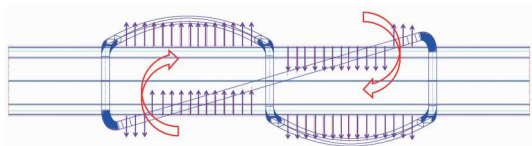


图 2 主梁变形趋势

接主梁与主、副拱空间弯扭曲面拱脚,拱梁固结后在横梁下设置抗震支座,将受力复杂的空间纽带拱桥转化为受力明确的系杆拱桥。对于斜对称拱无法平衡的平面扭转问题,联合主梁平面刚度共同平衡,由箱梁承担拱肋纵向及斜向的水平推力,复杂的受力体系在拱梁体系内部基本平衡,水平向固定支座产生的最大水平力在边拱脚和中拱脚处分别为竖向力的 6.5%和 10.6%,减小了支座规格和基础规模。

2.3 总体设计

桥位处潇河规划宽度约 500 m,考虑到防洪及景观要求,跨径布置为 65 m+110 m+110 m+65 m=350 m(见图 3)。主拱跨径 229 m,斜跨两个主跨后与外倾副拱通过横梁连接;外倾副拱外倾角度 25°,分别位于桥梁主跨东西两侧于中支点处通过横梁相互连接,于主跨边支点处通过横梁与主拱连接,形成拱梁固结的拱梁组合体系,结构自平衡,无水平推力。

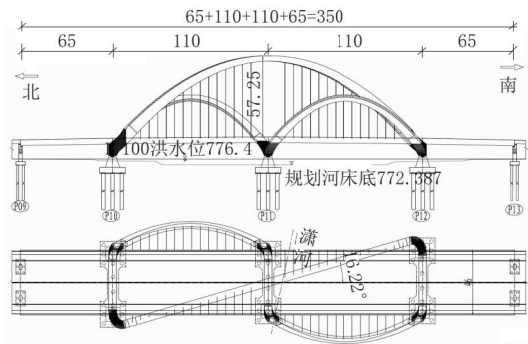


图 3 潇河大桥主桥总体布置(单位:m)

大运路潇河大桥主、引桥平面位于路线直线段,桥梁立面位于半径 6 000 m 的竖曲线上,主桥最大纵坡为 1.5%,南、北引桥最大纵坡为 3.49%;主桥宽 46.0 m,功能宽度 44.5 m,双向 8 车道,桥面布置为:2.5 m(人行道)+4 m(非机动车道)+0.5 m(防撞护栏)+15 m(机动车道)+0.5 m(中央防撞护栏)+15 m(机动车道)+0.5 m(防撞护栏)+4 m(非机动车道)+2.5 m(人行道)=44.5 m(见图 4)。桥梁拱肋采用矩形钢箱断面,主梁采用双边钢箱梁断面,下部结构采用承台+群桩基础。

3 桥梁结构设计

3.1 拱肋^[1]

主桥斜对称纽带拱肋由一片斜跨两个主跨的大

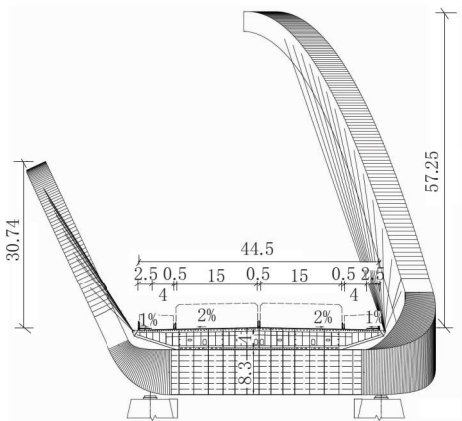


图 4 边支点位置主梁横断面(单位:m)

主拱,两片分布于主跨外侧的外倾副拱及其连接横梁组成,拱肋采用抛物线拱。

(1)主拱

主拱由主桥东南侧斜向跨越至西北侧;主拱在边拱脚处由主梁下的拱肋端横梁与副拱连接。主拱拱肋平面竖直,拱平面与纵桥向夹角为 16.22°,跨度为 229.12 m,拱顶与桥面标高差 57.25 m。拱轴线主体段为抛物线,在拱平面内矢高为 56.5 m,跨度 225 m,矢跨比 1/4;主拱拱脚与横梁采用 $R=10.5$ m 圆弧线连接;抛物线和圆弧线之间采用直线段过渡段顺接。主拱拱肋断面为矩形;拱肋抛物线段为变截面,与拱肋直线过渡段连接处尺寸为 $B \times H=5.5 \text{ m} \times 8.1 \text{ m}$ (见图 5),在抛物线顶点处尺寸为 $B \times H=5.5 \text{ m} \times 3.6 \text{ m}$,线性变化。

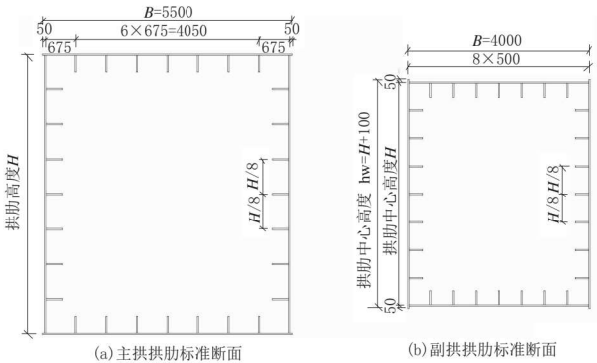


图 5 拱肋标准断面(单位:mm)

(2)副拱

主桥两个主跨分别布置有一片副拱,南侧主跨副拱位于桥面西侧,北侧主跨副拱位于桥面东侧,两片副拱在中拱脚处由主梁下的拱肋中横梁连接,在边拱脚处由主梁下的拱肋端横梁与主拱连接。两片副拱构造一致,关于主桥中心点呈 180°斜对称。

副拱拱肋平面横向外倾,外倾角度 25°,跨径 110 m,拱顶与桥面标高差约 30.0 m。拱轴线主体段在拱平面内为抛物线,矢高为 30 m,跨度 94 m,矢跨

比 1/3.1;拱脚与横梁采用半径 $R=10\text{ m}$ 圆弧线连接;抛物线和圆弧线之间采用直线段过渡段顺接。副拱拱肋断面为矩形,拱肋抛物线段为变截面,与拱肋直线过渡段连接处尺寸为 $B\times H=5.5\text{ m}\times 4.0\text{ m}$ 如图 6 所示,在抛物线顶点处尺寸为 $B\times H=3.0\text{ m}\times 4.0\text{ m}$,线性变化。

(3)空间弯扭曲面拱脚

主拱、副拱与横梁连接过渡段结构(即拱脚扭转段)既是实现大桥景观特色的关键,亦是主拱、副拱结构传力的关键部位。主、副拱脚均为弯扭曲面构件,由于受力复杂,设计采用 Q370qd 钢材,板厚 40 mm。

采用棱线为基准确定拱脚段外形,对于主拱,经拱脚段过渡后拱肋顶底板转换为横梁顶底板;对于副拱,拱脚过渡后顶底板转换为横梁腹板,最少化弯扭面数量,使得传力更加顺畅(见图 6);优化隔板布置,根据棱线长度确定隔板与棱线交点,采用 BIM 放样空间隔板(见图 7),确保加工操作空间与焊接质量;最终实现拱脚外在造型平滑美观、加工制造便利可行,结构受力连贯合理的目标。

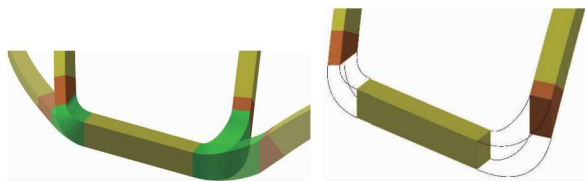


图 6 拱脚段与横梁对接示意图

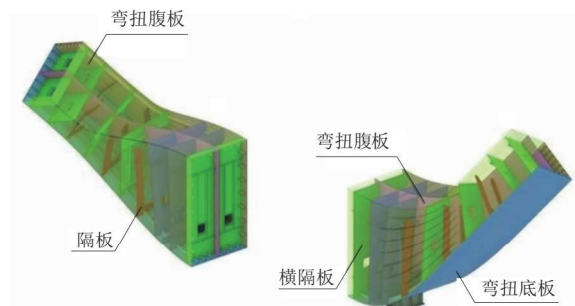


图 7 拱脚隔板布置示意图

(4)拱上锚固构造

主、副拱采用吊耳形式与吊杆连接,吊耳与吊杆处隔板一体,由隔板伸出底板形成(见图 8);拱上理论锚点设置于拱肋底板下方 420 mm 处。

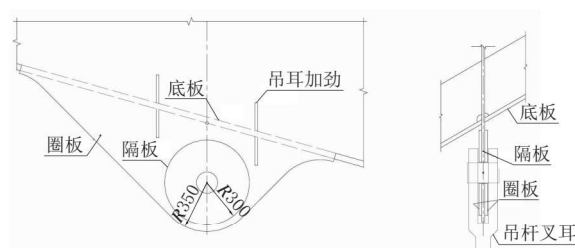


图 8 拱上锚固构造

3.2 主梁

主梁采用半封闭双边钢箱梁断面,中心线处标准节段顶底板外缘间高度 4.0 m,标准断面宽度 44.5 m(见图 9),单边箱宽 8.7 m,悬臂长度 7.55 m,两箱室间净距 12 m。主梁在横梁处通过大横梁与拱肋固结,在大横梁下设置两个支座,支座中心线距离桥梁中心线分别为 22.5 m(主拱侧)、20 m(副拱侧)主梁在过渡墩处设置两个支座,支座间距为 22.9 m。

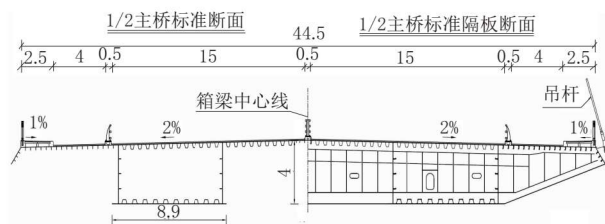


图 9 主梁标准断面(单位:m)

主梁共划分 33 个梁段,梁段标准长度 12 m。主梁标准段顶、底、腹板厚度均为 16 mm;中墩负弯矩区顶板局部加厚至 24 mm、底板加厚至 40 mm、腹板加厚至 24 mm。横隔板由两侧悬臂腹板、两个箱内隔板及箱间隔板组成实腹式隔板,标准间距 3 m。一般横隔板厚度采用 12 mm,吊杆位置横隔板厚度采用 16 mm,支点位置横隔板采用 40 mm。

主梁采用吊耳形式与吊杆连接,吊耳与箱梁悬臂腹板一体(见图 10),由悬臂腹板外伸形成,悬臂腹板与主梁腹板焊接,焊接位置有箱内及箱间隔板,以方便主梁恒活载顺畅的从主梁经过吊杆传递到拱肋上。

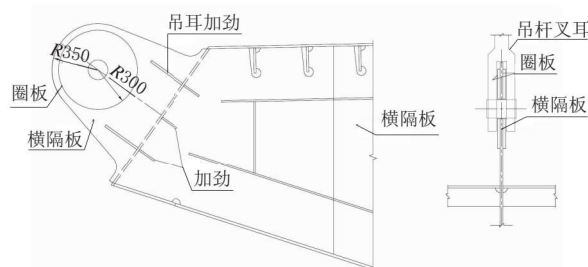


图 10 梁上锚固构造

3.3 吊杆

主桥全桥共 $4\times 14=56$ 根吊杆,长度最长 56 m,采用标准强度 1 670 MPa 镀锌平行钢丝拉索,规格为 PES7-73 和 PES7-121。吊杆梁上间距 6 m,拱上顺桥向间距 6 m,由于主拱斜跨、副拱外倾,全桥吊杆为空间扭曲面布置形式。吊杆在梁上和拱上均采用叉耳锚固形式。为使桥梁结构拱梁受力协同,纵横桥向对应的吊杆同步对称张拉。

3.4 桥面铺装

主桥桥面铺装采用浇筑式沥青混凝土,上层采

用 45 mm 厚改性沥青玛蹄脂碎石(SMA-13),黏层采用改性乳化沥青,下层采用 35 mm 厚浇筑式沥青混凝土(GA-10)^[3],表面撒布粒径 10~15 mm 的沥青预拌碎石,防水黏结层采用 MMA(甲基丙烯酸树脂)。

3.5 支座及其曲面调平结构

(1)支座

经过详细的抗震分析和专项研究比选后,确定主桥采用减隔震体系。采用双曲面球型减隔震支座,以解决主桥在 8 度强震作用下桥梁纵横向地震力过大问题,减隔震支座设置在主墩墩顶和引桥盖梁顶。主桥主拱拱脚支座吨位为 6 000 t,副拱拱中墩处拱脚支座吨位为 4 000 t,近边跨位置拱脚支座吨位为 3 500 t。

(2)钢-UHPC 组合大吨位支座曲面调平结构

为解决扭曲面拱脚结构下支座调平问题,采用钢-UHPC 组合大吨位支座曲面调平结构,实现拱脚处曲面支座调平功能,调平结构采用 6 块钢板进行十字交叉(见图 11),解决空间曲面产生的坡度问题,在保证调平结构钢板承压满足需求的前提下,考虑到构造的耐久性及可靠性,在调平构件内灌入 UHPC,形成钢-UHPC 组合结构,将线性转载转换为面转载,增强了结构的一体性,同时将结构内空气排出,避免了钢材发生锈蚀的风险。

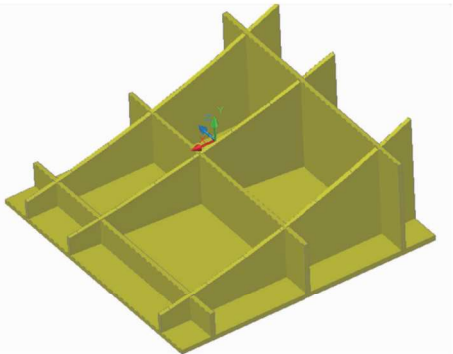


图 11 调平结构示意图

3.6 下部结构

主桥桥墩为四棱台型,上部尺寸为 7 m×5.4 m,下部尺寸为 10 m×10 m,墩高 6.9 m。承台尺寸 18 m×18 m,厚度 4 m,采用 3×3 根 $\phi 2.5$ m 钻孔灌注桩,承台之间采用系梁相连,系梁与承台等厚,宽度 8 m,系梁下设置 2 根 $\phi 2.5$ m 钻孔灌注桩(见图 12)。

4 桥梁结构分析

4.1 主桥整体分析

采用 MIDAS Civil 有限元程序建立主桥空间分析模型(见图 13),考虑主梁、拱肋施工阶段,进行全

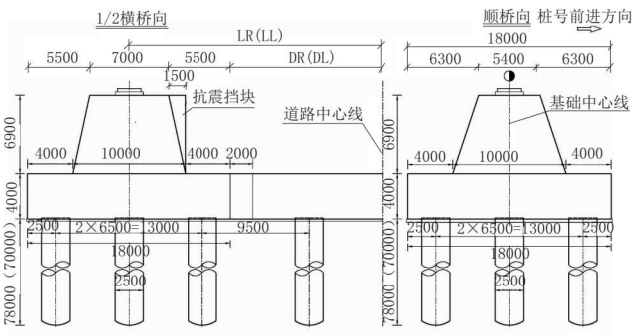


图 12 主墩构造(单位:mm)

桥空间静力、疲劳、稳定、抗震性能分析。

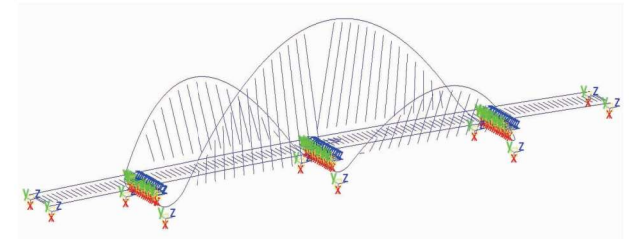


图 13 主桥空间有限元模型

(1)静力强度,主梁基本组合上缘最大拉、压应力分别为 205、89 MPa(见图 14),下缘最大拉、压应力分别为 178、178 MPa,均小于计算控制应力;最大正、负号剪应力分别为 102、103 MPa,小于 155 MPa;拱肋基本组合最大拉、压应力分别为 178、175 MPa(见图 15),小于 270 MPa;最大剪应力 51 MPa,小于 150 MPa;均满足规范要求。

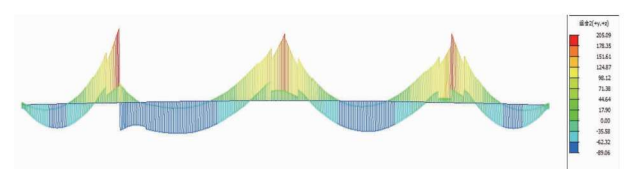


图 14 基本组合主梁上缘应力包络(单位:MPa)

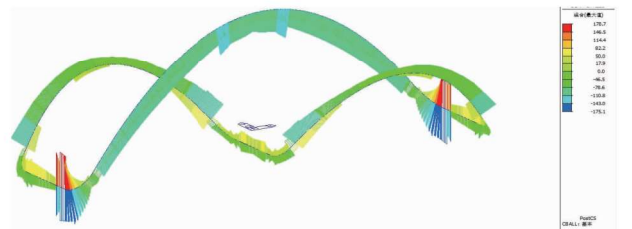


图 15 基本组合拱肋应力包络(单位:MPa)

(2)静力刚度,主梁活载挠度为 40+16=56 mm<110/500×1 000=220 mm,主拱活载挠度为 28+19=46 mm<220/1 000×1 000=220 mm,副拱活载挠度为 9+6=15 mm<110/1 000×1 000=110 mm,均满足规范要求。

(3)疲劳强度,根据构造细节确定主梁、拱肋基材和主要焊缝的疲劳应力幅限值分别为 76 MPa 和 68 MPa、吊杆的疲劳应力幅限值为 102 MPa,均大于

参照疲劳荷载计算模型 I 计算得到的主梁、拱肋及吊杆疲劳应力幅,满足规范要求。

(4)整体稳定,拱肋整体弹性稳定系数为 24.01,失稳模态为面外失稳。

(5)动力特性,全桥前 5 阶阵型自振频率和模态分别为一阶 0.662 Hz 斜跨主拱横弯,二阶 0.807 Hz 主梁反对称竖弯,三阶 1.143 Hz 斜跨主拱竖弯,四阶 1.261 Hz 斜跨主拱反对称横弯,五阶 1.393 Hz 外倾副拱横弯。

(6)抗震性能,采用非线性动力时程分析方法,考虑相邻引桥对主桥地震响应的影响,计算减隔震体系下全桥地震响应并进行基础验算,桩基单桩容许承载力和截面强度验算均由地震力控制,现有桩基长度及配筋满足规范要求。

4.2 拱脚局部分析

主拱拱脚、副拱端拱脚和副拱中拱脚由于存在三维扭曲的情况,需要分析相应部位的屈曲情况。其中主拱拱脚的受力最不利,故本文仅简述主拱拱脚局部分析结果。

采用 ANSYS 有限元程序对大桥主拱拱脚进行局部三维实体分析。建模部分从主拱轴线面外的起始弯折点开始,到拱箱与横梁相接处为止。模型较为准确地还原了实际拱脚内的横隔板、加劲肋以及开孔位置,并真实地反映的各个板件的实际板厚。主拱拱脚实体模型外轮廓见图 16。

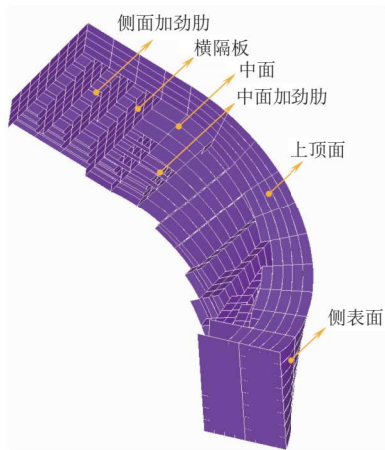


图 16 主拱脚实体有限元模型

计算结果显示,主拱拱脚内侧面受拉、外侧面受压;拱脚内部横隔板和加劲肋等构造的 Von Mises 应力绝大部分可以控制在 100 MPa 以下;拱脚外四个外表面的 Von Mises 应力大部分可以控制在 150 MPa 以下,见图 17。

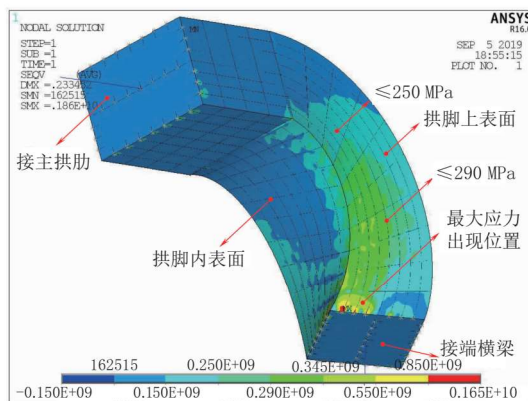


图 17 拱脚应力分布图

5 总体施工方案

由于潇河现状河道较窄,规划河道水面尚未形成,从施工速度和经济效益综合考虑,大桥采用少支架节段吊装施工方式,总体施工次序为先梁后拱:首先支架施工拱梁结合段,然后支架施工钢结构主梁至合拢,再支架施工至拱肋合拢后安装张拉吊杆,最后拆除支架施工桥面系,并将吊杆力调整至设计要求。其中,拱梁结合段、钢主梁、拱肋支架施工时,采用支座多向预偏技术,在体系转换时,有效将斜跨钢拱不平衡推力产生的偏移值中和,减少支座位移下水平力。

6 结 语

大运路潇河大桥在国内创新性地首次采用空间斜对称螺旋形纽带拱桥,该桥结构形式新颖,造型美观。主桥由一片斜跨大主拱,两片外倾副拱及其连接横梁组成螺旋形纽带拱肋,与半封闭双边钢箱梁形成拱梁组合体系,结构自平衡,无外部推力,主拱、副拱采用钢箱形断面,拱轴线为抛物线,拱脚为空间扭曲面超厚板拱脚,支座位置采用钢-UHPC 组合大吨位支座曲面调平结构。桥梁采用双曲面球形减隔震支座,基础采用钻孔灌注桩基础。大桥的整体和局部计算分析结果表明:大桥结构力学性能良好,结构安全可靠,均满足规范要求,其设计和分析经验均为世界首创,可为今后类似工程提供参考。大桥于 2019 年 6 月开始建设,2022 年 1 月竣工验收。

参考文献:

- [1] 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司.大运路潇河大桥施工图[Z].上海:同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,2019.
- [2] 赵佳男,万杰龙,文杰.山西省综改区大运路桥美学构思与力学研究[J].世界桥梁,2022,50(1):7-12.
- [3] 胡会勇,赵健,任延龙,等.广州明珠湾大桥主桥总体设计[J].桥梁建设,2021(3):93-99.