

城市快速路双层钢桁拱桥结构设计与施工分析

朱贵东¹, 胡超²

(1. 江苏交通设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223001; 2. 中铁八局集团有限公司, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 随着城市路网的不断完善, 跨越既有江河的桥梁工程建设是不可避免的。双层钢桁架系杆拱桥具有造型美观, 跨越能力强, 节省城市发展空间等特点, 其应用越来越广泛, 因此研究城市快速路双层钢桁架系杆拱桥结构具有很高的现实意义。淮安市快速路高架采用双层钢桁架系杆拱桥结构体系跨越京杭大运河, 计算跨径为 $(59+150+59)$ m, 采用支架+浮吊吊装的施工方案。本文利用有限元分析软件对该类结构进行了数值分析和验算, 从桥梁结构设计、钢结构焊接以及施工方案等方面开展分析和研究, 为类似桥梁结构设计工程提供了参考和依据。

关键词: 双层钢桁架系杆拱桥; 结构体系; 钢结构焊接; 浮吊吊装

中图分类号: U448.22+4

文献标识码: A

文章编号: 1006—7973 (2025) 05—0141—04

随着我国城市路网的不断完善, 跨越既有江河的桥梁工程建设不可避免。为了尽可能减小占地红线, 为城市发展节省空间, 同时兼顾景观要求, 双层钢桁架系杆拱桥被广泛采用。

双层钢桁架系杆拱桥具有造型美观, 跨越能力强, 节省城市发展空间的特点^[1]。除此以外, 双层钢桁架系杆拱桥结构整体刚度较大, 抗风抗震动力性能较强的优点。

钢桁架拱梁组合体系桥梁的总体设计 (概念设计) 中很重要的一个环节就是设计参数的拟定和关键构造的处理^[2]。本文以淮安市西安路跨京杭运河大桥为例, 针对拱肋桁架和主桁梁的结构形式、吊杆的布置形式、构件截面形式、桁架节点连接构造的选取以及吊装施工等方面进行介绍。

1 工程概况

淮安市快速路高架采用双层钢桁架系杆拱桥结构体系跨越京杭大运河, 计算跨径为 $(59+150+59)$ m, 横桥向设置两片拱圈和主桁梁, 拱圈间布置 11 道一字型风撑, 主桁梁间布置有端横梁、主横梁和副横梁, 全桥钢结构采用全焊接拼装工艺。桥跨效果图见图 1。



图 1 桥梁效果图

该桥上层桥面功能为城市快速路, 布置有双向八车道+两侧检修道, 下层桥面功能为城市主干道, 布置有双向六车道+两条非机动车道+两侧人行道。桥梁横断面布置情况见图 2。

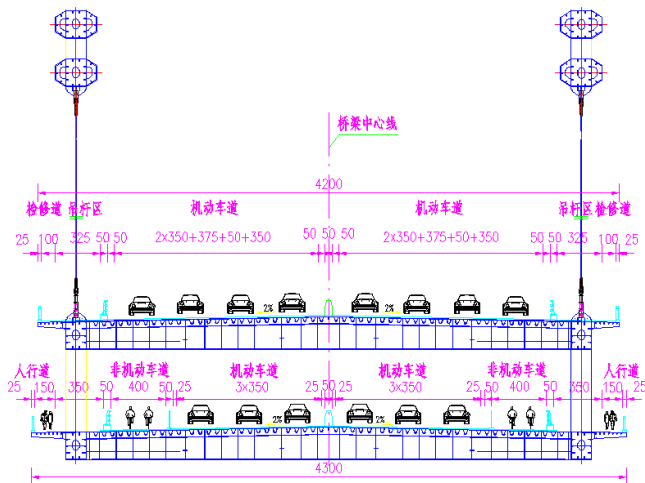


图 2 桥梁横断面布置图

桥梁结构体系为双侧钢桁架系杆拱，桥面荷载通过正交异形板传递至主桁加劲梁，加劲梁将荷载通过竖向吊杆传至主拱肋，最终将荷载通过支座系统传递至下部基础结构。

2 结构设计

2.1 拱圈

主拱肋沿横桥向设置为2片，横向间距为36.5 m，每片拱肋采用变截面桁架结构，拱顶处结构高度为5.5 m，拱脚处梁拱组合高度为18 m，两片拱肋之间采用风撑连接，组成形式见图3。

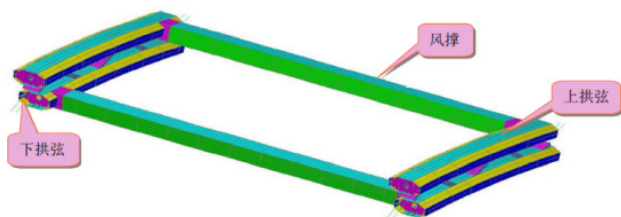


图3 拱肋组成示意图

下侧拱肋计算跨径为150 m，矢跨比为1/4.4，拱轴线考虑恒载下结构受力特点采用2次抛物线，上侧拱肋计算跨径为218 m，拱轴线主要考虑景观造型因素而采用平顺的样条曲线^[3,4]。上侧和下侧拱肋之间通过工字型和箱型腹杆连接成整体，腹杆形式为受力稳定的三角形，经计算，主拱圈不设置预拱度。

根据实际吊装能力和运输条件，每片拱肋分别由15个节段组成，从拱顶到拱脚处依次为A0~A7，其中A0为合龙段，具体节段划分情况见图4。



图4 拱肋节段划分示意图

拱肋上下弦杆采用八边形钢箱截面，截面内每隔2.5~4 m，设置一道横隔板，该类截面抗扭刚度较大，纵向抗压强度较高，同时八边形构造对抗风有利。根据计算结果，截面横向宽度为3 m，竖向高度为2 m，板厚为12~40 mm，钢箱型截面由八边形变化为四边形。

拱肋各节段连接形式采用焊接，所有杆件的对齐方式采用外表面对齐。各杆件交叉部分采用整体式节点板连接，整体式节点板由拱内腹板、梁的内腹板/侧腹板及其延伸部分组成，且整体式节点板必须由整块钢板切割而成。

2.2 横撑

全桥在拱肋弦杆中部共设置11道一字型风撑，跨度36.5 m，风撑采用钢箱截面，截面宽1.5 m，高2.0 m，截面顶、底板和腹板厚度均为16 mm，截面内设置横隔板，横隔板间距为8 cm。全桥横撑共设置11道，其中上侧拱肋设置5道，下侧拱肋设置6道，水平投影距离分别为18.7 m和18 m。经计算，横撑需设置10 mm的预拱度。

2.3 吊杆

全桥拱肋共13对吊杆，吊点纵桥向中心间距为9 m，横桥向为36.5 m。吊杆采用镀锌高强度平行钢丝索，每根拉索采用高密度聚乙烯护套进行双层防护，平行钢丝的标准强度不小于 $R_{yb}=1670$ MPa。上下端通过拱梁处吊耳形式连接，其中张拉端设置在梁上，以方便张拉操作和控制。

2.4 加劲梁

加劲梁主要承受桥面板传递的竖向荷载，并将荷载通过吊杆系统传递至主拱肋，为重要的受力构件，加劲梁采用桁架形式，有上、下弦杆和腹杆组成，腹杆结构形式为三角形，加劲梁具体组成形式见图5。

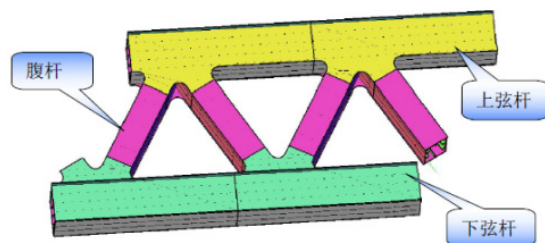


图5 加劲梁组成示意图

加劲梁沿横桥向分两片布置，中心间距为36.5 m，根据吊装能力和运输条件，加劲梁共划分为15个节段，其中主跨最大节段达到500 t，节段划分情况见图6。



图6 主桁节段划分示意图

主桁上下弦杆采用四边形钢箱截面，截面高度为2 m，截面宽度为1.5~3 m，箱室数量为1~3个，弦杆壁板厚度为20~50 mm；腹杆采用四边形钢箱截面，顺桥向截面尺寸为1.5~2 m，横桥向尺寸为2~3 m，壁板厚度为20~50 mm。

加劲梁制造和安装采用整体焊接形式，杆件交叉处节点板加工时采用了整块板形式，更利于应力的扩散，防止局部板件由于受力过大发生变形破损。同时为提高

加劲梁支点处的刚度，在轴力较大处钢箱灌注 C25 自密实补偿收缩混凝土。经计算，加劲梁需在跨中设置为 10 cm 的预拱度。

2.5 桥面系

桥面系直接承受车辆荷载，并将荷载传递至加劲梁，结构采用了正交异性钢桥面板，其组成形式见图 7。

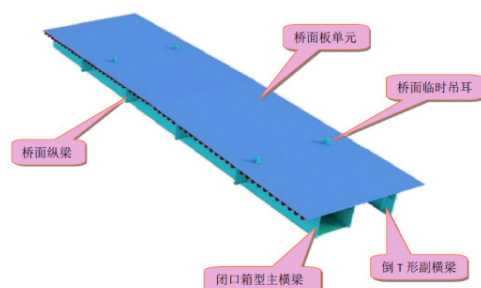


图 7 桥面系组成示意图

正交异性板纵桥向节段长度为 5~9 m，横桥向具体划分段数可根据实际需要进行相应的优化修改。

桥面盖板厚度为 16 mm；纵向加劲肋包含 U 肋和板肋，U 肋布置在行车道范围内，横向间距为 600 mm，高度 280 mm，厚度 8 mm，板肋主要布置在人行道范围内，横向间距为 300 mm，高度 120 mm，厚度 10 mm；小纵梁和上、下层桥面组成“工”形，每层桥面分布有 4 道，横向间距为 6.9 m 左右，高度 1500 mm，腹板厚度 12 mm，底板宽度 280 mm，厚度 12 mm。

吊杆处主横梁纵桥向水平间距为 9 m，截面形式为钢箱，截面高度由 2 m 过渡至 2.365 m，截面宽度为 2.55 m，计算跨径为 36.5 m。横梁为提高截面横向刚度设置横隔板和横向加劲肋，其中横隔板设置在与小纵梁交叉处，横向加劲肋布置在横隔板之间，最大间距为 1.95 m，最小间距为 1.2 m；次横梁布置在吊杆主横梁之间，纵桥向水平间距为 9 m，截面形式为 T 型，截面高度由 2 m 过渡至 2.365 m，底板宽度为 0.5 m，计算跨径为 36.5 m；端横梁共设置 4 道，截面形式为钢箱，截面高度由 2 m 过渡至 2.365 m，截面宽度为 2.55 m，计算跨径为 36.5 m。

桥面系于桥面中心线处上拱 15 mm，制作时，需结合不同的桥面系特点、各构件（横梁等）制定合适的上拱值，另外，还需考虑与其相连的主桁梁的特点进行放样制作，以确保整个桥面系协调一致。

工厂制造主桁梁时，需在主桁梁侧伸出一定长度的连接段，以便现场对接定位及焊接。

3 有限元模型的建立

利用 Midas/Civil 2022 对上部结构建立有限元分析

模型，针对全桥施工过程进行仿真分析。主拱和主梁均采用梁单元进行分析，竖向吊杆采用桁架单元分析，拱梁交接处的连接板采用板单元分析。各部位边界条件，在纵桥向，对其中的一个主墩进行纵向限位，其余纵向均可自由变位；横桥向各排墩处设置一个横向限位；所有支座处均设置竖向支撑。对于部分关键节点及细部构件采用三维空间板单元进行模拟分析。桥梁计算模型见图 8。

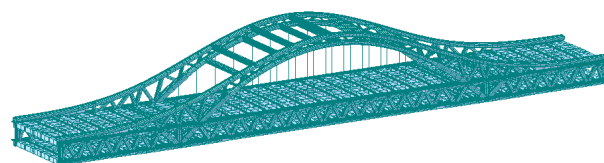


图 8 桥梁整体有限元模型

4 钢结构焊接要点

4.1 桥面系焊接

4.1.1 U 肋、板肋焊缝的焊接

U 肋坡口焊缝采用焊接专机在反变形胎架上施焊，施焊前给予反变形量，可有效控制顶板单元的焊接变形，保证焊后平面度，避免热矫正。焊接时 6 条焊臂可同时进行焊接 3 根 U 肋，每根 U 肋焊缝均同时一次焊接完成。

4.1.2 横梁腹板与顶板焊缝的焊接

横梁与 U 肋、横梁与桥面板之间以及在横梁弧形缺口处需不间断焊接施工，且在交叉处不得出现起熄弧现象，以获得良好的焊接质量。此类焊缝采用药芯焊丝 CO₂ 气体保护焊进行仰位操作。焊接结构后，焊缝均应打磨，不得出现毛刺尖角。

4.1.3 箱式横梁腹板与底板熔透焊缝

箱式横梁腹板与底板熔透焊缝、副横梁腹板与底板角焊缝、纵向加劲肋角焊缝的焊接均采用半自动小车焊接。半自动小车焊接时能够匀速的、直线的焊接横位焊缝，并且在焊接过程中不易熄弧，既能保证焊缝的质量又可以改善焊缝外观成型。

4.1.4 顶板纵向对接焊缝的焊接

在顶板与顶板间焊缝焊接时，梁段焊接时端部预留 300 mm 左右仅焊一层薄底，其余填充盖面在桥位焊接，焊缝之间设置过桥引板，后续焊接在特配引板部位不停弧，焊缝焊接完成后立即断开，采用 CO₂ 气体保护焊打底，埋弧焊丝，配 SJ101q 焊剂填充盖面。

4.2 加劲梁及主拱焊接

4.2.1 全断面对接焊缝的焊接

弦杆、主拱、弦杆与腹杆全断面对接焊缝均采用焊接连接,为避免仰位焊接,顶底板对接焊缝均采用单面焊双面成型工艺。焊接均采用药芯焊丝 CO_2 气体保护焊。

4.2.2 纵向加劲肋及 T 型坡口角焊缝或角焊缝的焊接

施焊前,应将起弧板安装在焊缝两端,起弧板应为同一材质和厚度。焊接形式采用对称坡口或角焊缝,施焊后,均应打磨匀顺,不得出现毛刺尖角,以保证焊接质量。

4.2.3 横隔板焊缝的焊接

加劲梁内横隔板与周围壁板焊接采用坡口角焊缝或角焊缝形式,焊接工艺采用 CO_2 气体保护焊。其中,横隔板与盖板为保证焊接质量,在角焊缝端部过焊孔的位置应设置包头板。

4.2.4 箱型棱角焊缝的焊接

弦杆及腹杆箱型棱角焊缝采用 T 型非对称 K 型坡口熔透焊缝或 T 型对称坡口焊缝连接,杆件根据不同结构形式,采用双丝埋弧自动焊的形式,同时焊接过程中应保持焊接方向一致,降低杆件扭转变形。

4.2.5 拱肋顶底对接焊缝

拱肋顶板对接焊缝采用熔透焊接形式,焊接坡口为自然坡口,外侧坡口位置通过药芯焊丝气体保护焊填满,在箱内侧清根并焊接。

5 施工方案

本桥采用分节段工厂制造,运输至现场后进行架设焊接拼装的方式,各个划分的节段由工厂分节段制造完成后,需在工厂完成预拼装后,方可运输到现场在支架上组焊成整体。其中 67.5 m 长的 Z0 节段在工厂制作完成后由甲板船整体运输至桥位处吊装。

由于京杭运河大桥为二级航道,施工期间不能断航,故本桥施工需考虑施工通航的需求,设置临时墩预留 63 m 左右的临时通航孔,通航孔主桁梁节段 Z0 采用浮吊整体吊装的施工方案。主要过程如下:

①在边跨段设置支架,主梁与相应位置的桥面系在支架上架设拼装,并预留与吊装段的合龙段,同时,在临时通航孔两端设置临时墩;②采用浮吊吊装中间节段,放置于临时墩上,为保证主桁节段的稳定,采取必要的稳定措施;③采用吊机和浮吊拼装中间段的桥面系;④在已施工完的主梁上搭设支架进行拱节段的拼装;⑤安装和张拉吊杆,吊杆力满足设计要求后拆除支架及临时

墩;⑥施工栏杆、铺装等二期。现场大节段吊装施工见图 9。



图 9 主桁梁节段吊装施工

6 结论

淮安西安路跨京杭运河大桥已建成通车,运营状况良好,已成为京杭运河上的一道靓丽的风景线,该桥在设计和施工上主要有以下特点:

(1) 西安路(老 G205)京杭运河大桥主辅道共计 16 车道,采用的三跨下承式双层钢桁架系杆拱桥,节省了大量的占地空间,减少了拆迁规模。

(2) 沿横桥向两侧设置主桁梁,间距为 36.5 m,导致横梁较长,设计难度较大,同时对施工安装精度要求也较高。

(3) 桥面铺装采用 7 cm 厚热拌环氧沥青混凝土等新材料工艺,增加了桥面铺装的动稳定度、强度、耐腐蚀性及协调变形能力,同时减轻了二期重量,巧妙解决钢结构桥梁结构受力及病害难题。

(4) 桥跨中间预留 60 m 通航孔,采用超大型浮吊成功实现在京杭运河上进行 500 t 钢结构的吊装,实现了京杭运河上最大重量的成功吊装。

参考文献:

- [1] 田唯,由瑞凯,周仁忠.大跨钢桁架桥斜拉扣挂悬臂施工技术[J].中国港湾建设,2016,36(08):62-68.
- [2] 孙海涛.钢桁架拱梁组合体系桥梁的总体设计研究[J].交通科技,2009,(03):334-345.
- [3] 邵长宇.索承式组合结构桥梁[M].北京:人民交通出版社,2007:220-227.
- [4] 姚玲森.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2008:283-293.