

景观桥飞翼式钢拱肋施工支架设计与关键技术

付立宏, 邓 雷, 朱 硕

(中铁四局集团工程技术研究院, 安徽 合肥 230022)

摘要: 雄安白沟引河留通桥的飞翼式钢拱肋为装饰性构件, 力学特征与常规梁拱组合桥的拱肋存在较大差异, 且与主梁分离的布置方式对选择施工方案造成较大限制。通过全面论证、对比五种常用拱肋安装施工方法在结构受力影响、临时设施工程量、工期、施工难易程度、安全风险控制等方面的优缺点, 选择对施工环境适应性最强的悬挑式支架法进行拱肋安装。在对各施工阶段支架受力与变形、主梁承载力对施工顺序影响分析的基础上, 给出支架布置、施工通道预留、总体施工顺序、拱肋节段安装顺序、关键构造处理等完整解决方案, 实施效果良好, 可供类似景观桥梁施工参考。

关键词: 钢结构; 拱肋; 支架; 有限元分析

中图分类号: U448.22; U445.46

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)06-0274-05

Bracket Design and Key Technology for Construction of Flying-wing Steel Arch Rib of Landscape Bridge

FU Lihong, DENG Lei, ZHU Shuo

(Engineering Technology Institute of China Railway No.4 Engineering Group, Hefei 230022, China)

Abstract: The flying-wing steel arch ribs of Baigou Yin River Liutong Bridge in Xiongan are the decorative components. The mechanical characteristics are quite different from those of the conventional beam-arch composite bridge. The layout separated from the main beam imposes significant restrictions on the selection of construction schemes. By comprehensively demonstrating and comparing the advantages and disadvantages of five commonly used arch rib installation construction methods in terms of structural stress impact, temporary facility engineering quantity, construction period, construction difficulty, safety risk control, etc., the cantilever bracket method with the strongest adaptability to the construction environment is selected for arch rib installation. Based on the influences of bracket stress and deformation, and the bearing capacity of the main girder on the construction sequence during the different construction stages, the integral solution of bracket layout, reserved construction passageway, overall construction sequence, arch rib segment installation sequence and key structure treatment is given, and the implementation effect is good, which can be referred for the construction of similar landscape bridges.

Keywords: steel structure; arch rib; bracket; finite element analysis

0 引言

异形拱桥、连续梁拱组合桥以其既能有效满足交通功能需求、又方便利用造型优美的曲线型钢结构拱肋实现艺术效果的特点, 在城市景观桥梁中得到了广泛应用^[1-2]。在这些景观桥梁当中, 钢结构拱肋既可以是受力的主体结构, 也可以是受力为辅的装饰性结构, 设计上的差异导致在施工方法选择上也存在较大不同。广西南宁大桥为外倾式钢箱拱, 采用先拱后梁、拱肋斜拉扣挂法施工^[3]; 浏阳捞刀河

景观桥为有推力钢箱中承式蝴蝶拱桥, 其主拱肋外倾、副拱肋内倾, 采用先梁后拱、副拱肋梁上支架、主拱肋水中落地支架拼装施工^[4]; 重庆竹溪河大桥为斜跨钢箱梁拱桥, 斜跨钢拱肋采用“支架法低位组拼+提升塔整体提升”法施工^[5]。可见对于景观桥梁的拱肋安装, 需根据桥梁结构力学特征、施工环境等因素综合论证, 才能保证施工方法安全合理、经济可行。

1 工程概况

雄安白沟引河留通桥位于大清河上游, 为(50+75+75+50)m四跨单箱三室预应力混凝土现浇连续梁桥, 桥面宽28m; 桥下为通行100t级游船的内河

收稿日期: 2024-11-13

作者简介: 付立宏(1982—), 男, 学士, 高级工程师, 从事大跨桥梁施工技术研究。

VI级航道,最高通航水位+8.0 m,通航净空 40 m×5 m,常水位+7.0 m时水深约 7.1 m。主梁外侧设置飞翼形景观装饰钢拱肋(以下简称“飞翼”),飞翼结构中心线在竖直平面上为半径 217 m 的圆弧线、在水平面上为直线,纵向两根飞翼共用,固结于中墩墩帽的拱脚,前端通过一根固结于边墩墩帽的钢管斜撑支撑,跨径布置为(24+71+71+24) m,与主梁之间设置 22 根不传力的装饰性钢吊杆。单根飞翼弧长 100.68 m、最高点距离桥面约 29 m。

飞翼为变截面钢箱结构,根部尺寸 4 m×4 m、呈现为带圆端的矩形截面;斜撑支撑位置处为 7.227 m×1.4 m,距端部 2.5 m 处为 8 m×0.7 m,距端部 2.5 m 范围内保持高度 0.7 m 不变,呈现为扁平月牙形截面。飞翼的外缘板厚在不同位置做相应变化,从根部的 25 mm 逐渐变化至翼尖的 14 mm;外缘板内壁,间隔 50 cm 设置一道 T 形加劲肋,沿弧长方向间隔 2.5 m 或 3 m 设置一道隔板。不含根部混凝土填芯拱脚时,单根飞翼重约 320 t。斜撑采用直径为 1.4 m 钢管,斜高约 29 m,顶部与飞翼采用相贯线焊接。飞翼、斜撑均采用 Q345qD 材质。

2 施工难点分析

图 1 所示为桥式布置图,设计方案为在枯水期筑岛,搭设满堂支架浇筑混凝土主梁,主梁成型后再拆除筑岛度汛;然后搭设落地临时支架,分 4 个节段安装飞翼(见图 2),飞翼焊接成整体且与斜撑焊联后再拆除临时支架。然而支架设计时存在如下困难。

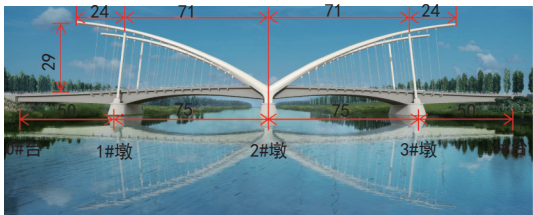


图 1 桥式布置图(单位:m)

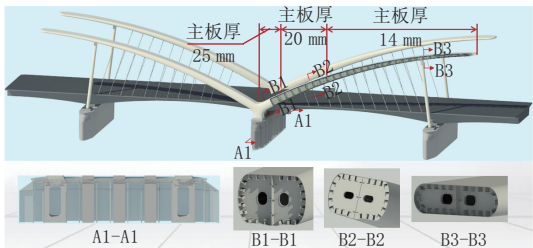


图 2 飞翼总体设计图

(1)飞翼施工时间段为 8~10 月汛期,河道管理部门不允许有妨碍度汛的水中支架,落地支架方案不可行。

(2)河段仅能通行游船,水上运输、吊装等施工所需工程船舶无法进入桥址,物料运输、飞翼吊装仅能以已施工完成的混凝土主梁为通道和施工平台。

(3)飞翼与主梁分离,横向挑出翼缘板外缘 2.65 m,距离外腹板 7.35 m。采取非支架法施工时,不论何种方法均需考虑横移问题,在梁面设置支架则只能采用类挂篮的横向悬挑构型(以下简称“悬挑支架”)。

(4)飞翼节段之间采用焊接连接,外缘板板厚 14~25 mm,展开尺寸为 3.4~7.8 m,对接定位精度要求高,熔透焊接工作量大,高空焊接作业时间长。

(5)墩帽为空腔结构,仅飞翼拱脚、斜撑根部处有传力隔板;主梁翼缘板为悬臂板,无法承受较大的集中荷载。可见墩帽顶、主梁翼缘板均无法作为临时设施的受力支撑点。

(6)单根飞翼重 320 t,相当于 6 辆重车的重量,在梁面组拼后起吊脱离时需保持上下游同步,以保证主梁抗扭承载力不超限。

可知,钢结构飞翼与主梁分离的结构特点及施工条件的限制,导致在施工方案选择上存在较大困难。

3 安装方案比选

除前述方法外,连续梁拱组合桥的拱肋较为常见的施工方法尚有卧拼+扣索牵引竖转法^[6-7]、卧拼+提升竖转法^[8-9]、桥外拼装后整体纵向滑移就位法^[10-11]等。综合项目桥梁结构特征、施工条件,对可能采取的施工方法可行性进行定性比选^[12],具体如下表 1 所列。

由表 1 可知,方法 4、5 在技术上均可行,进一步开展详细比对计算研究,以比较其适应性的优劣。为保证主梁顶板在施工时的承载力在安全范围内,飞翼节段划分时控制最大吊重不超过 85 t、汽车吊机规格不超过 350 t,且卧拼支架、悬臂支架均以外侧 2 道腹板为支撑点,梁面正中 9.25 m 为施工通道,据此拟定比选方案。方法 4 在梁面设置 4 组三角悬挑架、拱脚设置外置式旋转铰座作为卧拼支撑结构,竖转提升塔设置在落地钢管桩不妨碍度汛的 1#、3#墩处,竖转提升角度为 17.1°;方法 5 在梁面设置 4 组悬臂支架、拱脚设置三角托架作为原位拼装支撑结构,详如图 3 所示。

计算表明,方法 4 单个飞翼卧拼支架、提升塔共计钢材约 140 t,130 t 汽车吊机可以完成吊装;方法 5 单个飞翼悬臂支架钢材约 332 t,需采用 350 t 汽车吊

表1 施工方法比选

序号	方法名称	可行性定性论证		结论
		优点	缺点	
1	缆索吊装法	采用可带载横移缆索吊时可方便进行构件吊装、纵横移动	1.上下游飞翼与主梁分离,为保证横向覆盖范围吊索塔架基础需布置于河中,缆索吊横移范围大; 2.纵向吊装范围须达190 m,吊索塔架、缆索吊等设施投入大; 3.需斜拉扣挂法配合悬拼飞翼,投入进一步增加	×
2	纵横移就位法	飞翼桥位拼装、与主梁施工同步进行,工期节约	1.飞翼与主梁分离,纵移就位后需通过横向悬挑滑道实现横移,横向悬挑滑道承受飞翼自重、拼装支架双重荷载,刚度要求高、投入大; 2.横移后需精调与柱脚对接,措施、工艺较复杂	×
3	卧拼+扣索牵引竖转法	1.在主梁桥面设置横向悬挑卧拼支架,拼装支架工程量少、高空作业转换为低位作业安全风险小; 2.扣索牵引竖转速度快,可快速完成安装	1.大小里程飞翼分离、纵向对称同步牵引竖转控制精度要求高,扣索塔架需布置于墩帽顶,而墩帽为空腔结构、无法设置支撑点; 2.上下游飞翼分离,若增设临时横梁将上下游飞翼连接成整体且转换牵引点,则可将扣索塔架布置于中墩处主梁横隔墙顶面,但转化为四根飞翼同步牵引,控制难度大	×
4	卧拼+提升竖转法	同方法3,提升塔的高度相对扣索塔架进一步降低、措施投入少	1.竖转提升塔传递给主梁的为集中荷载,需根据飞翼承载力、主梁局部承载力影响提升塔布置位置; 2.为避免主梁横向抗扭承载力超限,卧拼、竖转时上下游侧需保持同步提升,工艺要求较高	√
5	悬挑支架拼装法	施工工艺简单,支架可根据起重吊装能力、主梁承载力在梁面灵活布置	1.支架受力变形影响飞翼节段定位精度,需在焊接前进行二次精调; 2.支架占据梁面一定空间,对运输通道、吊机站位与起重回转存在干扰; 3.支架工程量大于方法4; 4.高空作业多、安全管理压力较大	√

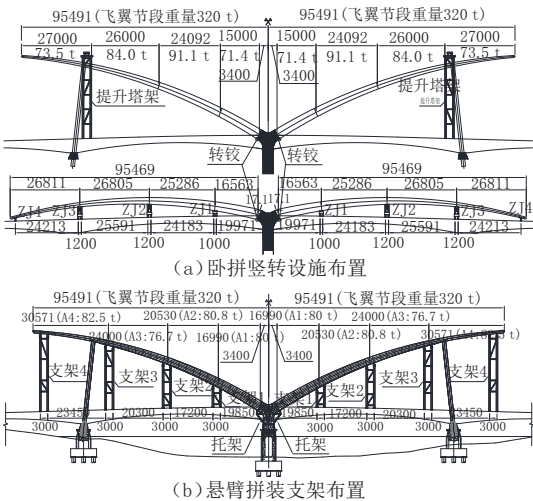


图3 两种对比施工方法总体布置图(单位:mm)

机吊装。两种方法均报河道部门审批,最终批复采用方法5即悬臂支架法实施。

4 拼装支架设计

4.1 总体设计方案^[13]

飞翼分4段吊装,水平投影分段长度及重量分别为16.99 m(80 t)、20.53 m(80.8 t)、24 m(76.7 t)、30.571 m(82.5 t)。拼装支架共分为5组(见图4),第一组为焊接在拱脚上在2樁三角托架+分配梁,采用2HN400(2HN500分配梁)×200 mm型钢加工;其余4组悬臂拼装支架采取架高菱形挂篮布局,立柱采用φ630 mm×10 mm钢管,斜向撑杆采用φ351 mm×8 mm钢管,顶部分配梁采用2HN500 mm×200 mm型钢,分

配梁顶面对应飞翼支撑位置设置三向调节千斤顶、高度可调楔块,其余联结系采用φ194 mm×6 mm、φ273 mm×6.5 mm和φ351 mm×8 mm钢管。支架材质均为Q235B。



图4 飞翼安装悬臂支架计算有限元模型

4.2 计算工况划分与结果

考虑焊缝等因素飞翼、支架自重系数取1.05,施工人群及小型机具荷载标准值取2.5 kN/m²,加载至顶部纵梁;在吊装焊接等工作工况风荷载取6级风,查询桥址历年统计数据后对非工作工况取8级风。根据施工流程,共划分为6个施工步骤、每个步骤又分为工作与非工作工况进行设计计算(见表2)。

计算表明:施工期间工作(非工作)工况支架立柱最大组合应力-163.5 MPa(156.3 MPa),顶部分配梁最大组合应力与剪应力为-133.0 MPa(131.3 MPa)、40.7 MPa(39.4 MPa),斜向撑杆最大组合应力为-155.9 MPa(145.9 MPa);悬挑支架顶部最大下挠1.25 mm、相当于悬臂跨度的1/3 674;飞翼最大组合应力(见图5)出现在节段四安装后、焊连前的非工作工况,为15.6 MPa。步骤四,节段三、四已经安装但尚未

表2 飞翼安装计算工况划分表		
步骤序号	施工描述	基本(标准)组合
1	节段一与节段二吊装、精调	
2	节段一、节段二、拱脚焊连	工作工况:1.2(1.0)×结构自重+0.75×1.1(1.0)×6级风荷载+1.0×1.4(1.0)×施工荷载
3	节段三与节段四吊装、精调	
4	节段三、节段四、节段二焊连	非工作工况:1.2(1.0)×结构自重+0.75×1.1(1.0)×8级风荷载
5	斜撑安装	
6	支架拆除	

与节段二、斜撑焊接时,结构处于稳定最不利状态,屈曲模态特征值最小为10.3>4.0,悬挑支架设计满足规范要求。

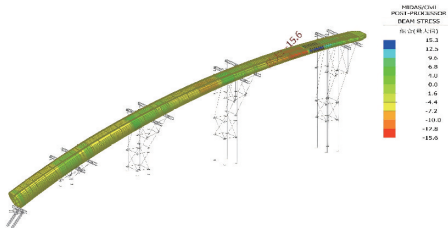


图5 施工阶段飞翼最大应力(单位:MPa)

4.3 细部构造分析与处理

顶部分配梁与内侧立柱连接部位为受拉节点,在柱头内设置隔板并与分配梁加劲板对齐以保证传力;斜向撑杆用于支撑顶部分配梁的前悬部分,设置联结系钢管以保证稳定,主、支管形成TK节点。通过建立实体精细化模型指导构造优化、保证局部应力均小于215 MPa。支架关键节点应力云图见图6。

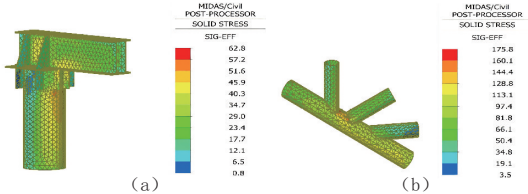


图6 支架关键节点应力云图(单位:MPa)

邻近主梁中心线的内侧立柱柱脚受拉,为避免锚筋与顶板密集负弯矩束冲突,采用预留锚栓孔张拉精轧螺纹钢的方式锚固于顶板上倒角处(见图7)。

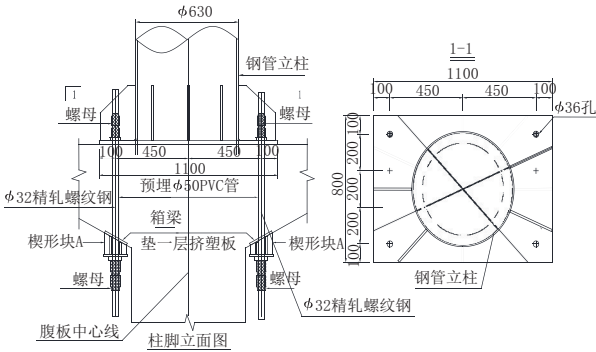


图7 受拉柱脚锚固布置图

4.4 主梁承载力对施工影响分析

同时投入4套支架进行施工是不经济的。经计算,投入2套支架、采用先上游后下游的横向周转方式超过了主梁横向抗扭转能力,故采取支架纵向周转方式进行施工。将单跨内上下游两根飞翼同时安装时的支架反力、2辆350 t汽车吊荷载、工作区域1.0 kN/m²人群荷载加载到桥面对主梁进行验算,顶板上缘最大压应力6.8 MPa、底板下缘最大压应力8.3 MPa,弯、剪承载力也均满足要求^[14](见图8)。

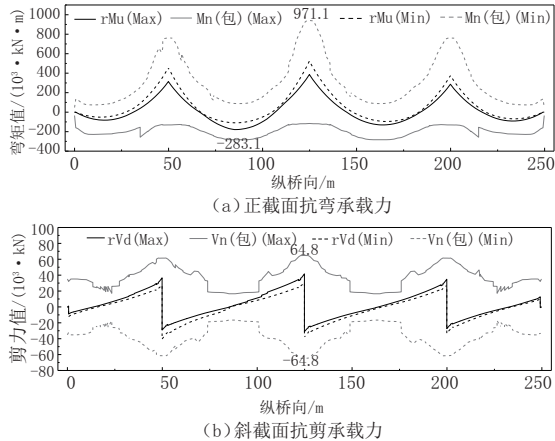


图8 施工阶段主梁受力与承载力包络图

5 施工关键技术

根据设计计算拟定的总体原则,共投入2套支架,进行跨内横向对称施工。在主梁现浇时预埋柱脚预埋件,预应力张拉完毕后汽车吊机上桥安装支架。为保证主梁横向扭转受力安全,同跨内飞翼节段安装时保持上下游保持对称。为消除支架悬臂端变形对飞翼定位精度的不利影响,每次先吊装两个节段,节段之间通过匹配件精确对接,待利用三向调节千斤顶精调后再与已经安装就位的节段焊接^[15]。由于飞翼自身刚度较小,拆除时后拆支架因飞翼下挠,受力会增大,为降低支架卸载时的操作难度,按支架1及托架→支架3→支架2→支架4的顺序进行落架、拆除。支架拆除后,利用桥面吊机自拱肋根部往翼尖对称安装装饰性吊杆。

6 结 语

雄安白沟引河留通桥装饰性飞翼与主梁分离,且施工期不允许有水中支架影响度汛,决定了只能采用悬臂支架进行原位拼装施工。支架总体布置与总体施工顺序、柱脚锚固处理则必须考虑主梁整体及局部承载力的影响;悬挑支架悬臂端变形控制相对直立支架而言难度较大,故采取先吊装、后精调、

再焊接的工艺措施消除变形对飞翼定位精度的影响。可见景观桥梁往往具备独特的力学特征,对施工方案存在较大影响,临时设施设计时必须考虑充分、全面,才能确保方案合理、施工安全。

参考文献:

- [1] 戴建国.城市景观桥梁设计中的彰显与融合[J].城市建筑,2021,18(35):192-195.
- [2] 周建.连续梁拱组合景观桥结构设计与分析[J].城市道桥与防洪,2016(5):106-109.
- [3] 周翰斌.外倾式非对称拱桥安装方案综述[J].中外公路,2011,31(1):169-173.
- [4] 邓海,闵岚,孙一,等.捞刀河景观桥施工技术[J].钢结构,2017,32(3):109-112.
- [5] 蔡栋林,程琳刚,仵彦波.竹溪河大桥斜跨钢箱主拱安装施工方案研讨[J].公路交通技术,2021,37(3):84-90.
- [6] 李红英.客运专线(76+160+76)m连续梁拱拱肋架设施工技术[J].铁道建筑,2011(4):13-15.
- [7] 李惠民.郑万铁路跨南水北调干渠钢管拱全自动竖转技术[J].铁道建筑技术,2019(3):86-89.
- [8] 孙九春.赵家沟大桥竖转提升系统关键设计技术研究[J].上海公路,2014(3):36-38.
- [9] 孙九春.竖转提升体系索力计算方法与优化设计[J].施工技术,2015(11):60-65.
- [10] 唐剑,喻明灯,汪泉庆.大跨度钢管拱异位拼装,纵移和提升施工方法研究[J].施工技术,2020,49(2):49-54.
- [11] 刘军华.大跨径梁拱组合桥拱肋顶推力学性能研究[J].公路,2021(4):176-181.
- [12] 周伟明.高速铁路连续梁-拱组合桥拱肋施工方案比选[J].中国铁路,2023(6):41-47.
- [13] 周艇.下承式钢箱提篮拱桥拱肋拼装支架方案研究[J].建筑技术,2024,55(14):1672-1675.
- [14] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [15] 李潭,赵斌,段钊,等.深圳空港新城展览大道景观钢桥施工方法研究[J].城市道桥与防洪,2021(12):99-102.
- 分析与控制[J].西部交通科技,2023(1):112-113;179.
- [4] 陈金义,廖伟华,李扬,等.腹板钢束偏位对连续刚构箱梁的影响[J].公路,2022,67(12):169-173.
- [5] Wei X, Zhao, et al. Detection and Analysis of Web Cracks in Construction of Continuous Rigid Frame Bridge(Article)[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(7): 38-43;86.
- [6] Yuyang Zeng. Analysis of the Temperature Effect and Influence of Large Span Continuous Rigid Bridge in Mountainous Area[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023(2519): 012017.
- [7] 王子进,邵庆双,任腾飞,等.预应力损失对预应力连续刚构桥裂缝影响分析[J].建筑工程技术与设计,2021(35):1834-1835.
- [8] CEB-FIP MODEL CODE 1990, DESIGN CODE[S].
- [9] 赵志缙,李继业,刘俊岩.高层建筑施工[M].上海:同济大学出版社,2012.
- [10] 肖建庄,宋志文,张枫.混凝土导热系数试验与分析[J].建筑材料学报,2010,13(1):17-21.
- [11] 卢玉林,梁永朵,于改花等.混凝土内置冷却水管对流系数的数值分析[J].混凝土,2010(12):118-120.
- [12] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

(上接第252页)