

三堡景观步行桥关键施工技术要点

华国红¹, 陈龙银²

(1. 杭州兴耀建设集团有限公司, 浙江 杭州 310052; 2. 浙江钜实桥梁钢构有限公司, 浙江 湖州 313220)

摘要: 杭州三堡景观步行桥位于两大世界级水体——钱塘江北岸与京杭运河的交汇处, 桥梁采用Z形三跨连续系杆拱桥, 主桥西拱跨145 m、中拱跨79.6 m、东拱跨156 m, 最大矢高47.8 m。主桥结构空间异型, 受力和拉索体系非常复杂, 施工难度极大, 通过对桥梁结构的设计特点和钢结构制造工艺、测量放样、临时支架搭设与拆除、钢箱梁和拱肋吊装、体系转换等关键施工技术进行分析阐述, 以期同类异型钢结构桥梁施工提供借鉴。

关键词: 步行桥; 钢结构; 空间异型; 三跨连续; 关键施工技术

中图分类号: U445.4

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)01-0198-06

Key Construction Technology Points of Sanbao Landscape Footbridge

HUA Guohong¹, CHEN Longyin²

(1. Hangzhou Xingyao Construction Group Co., Ltd., Hangzhou 310052, China; 2. Zhejiang Jushi Bridge Steel Structure Co., Ltd., Huzhou 313220, China)

Abstract: Hangzhou Sanbao Landscape Footbridge is located at the confluence of two world-class water bodies - the north bank of the Qiantang River and the Beijing-Hangzhou Canal. The bridge is a Z-shaped three-span continuous bowstring arch bridge. The west arch span of the bridge is 145 m, the middle arch span is 79.6 m and the east arch span is 156 m. The maximum vector height is 47.8 m. The main bridge structure is spatial-shaped, and the force and cable system is very complicated. The construction difficulty is great. The design characteristics of bridge structure, and the key construction technologies in the manufacturing process of steel structure, the measurement and lofting, the erection and dismantling of temporary support, the hoisting of steel box girder and arch rib, and the system conversion are analyzed and set forth in order to provide the reference for the construction of similar special-shaped steel structure bridges.

Keywords: footbridge; steel structure; spatial-shaped; three-span continuous; key construction technology

0 引言

杭州三堡景观步行桥位于两大世界级水体——钱塘江北岸与京杭运河的交汇处, 与钱江世纪城及亚运村隔江相望。本桥为可实现360°纵览钱塘江、观察大运河汇流特点的三堡景观步行桥, 又名“飞梭虹桥”, 采用“无缝步行桥”的设计理念, 因地制宜, 以“合理的结构体系、优雅的结构形态、巧妙的结构细节、绿色的结构材料”为特点, 所打造的一个标志性建筑。“飞梭虹桥”作为三堡单元江河汇城市综合体的汇中地块构筑物, 造型新颖、富有创意, 作为地区的标志性构筑物, 实现了“宜行、宜停、宜赏”; 作为慢行系统的组成部分, 能够达成钱塘江北岸绿道贯通,

满足不同行为目的的人群需求。步行桥全景如图1所示。

1 桥梁结构

桥梁为简洁的具有现代感的Z形三跨连续系杆拱桥, 标准桥面宽度为8 m, 桥面中央广场加宽至约21~27 m; 工程桥梁总长约605 m, 其中主桥西拱跨145 m, 主桥中拱跨79.6 m, 主桥东拱跨156 m, 最大矢高47.8 m; 主桥的中拱跨桥段在中隔堤向南、北各延伸39.7 m后, 与中隔堤的景观平台南、北桥相接, 景观平台南、北桥各长74.7 m。

1.1 主拱构造设计

桥梁主要承重结构为3个六边形钢箱拱构成的主拱, 最大跨度单拱约为156 m, 最大矢高约47.8 m。拱肋的轴线为多条高次样条曲线, 东、西拱为平面倾斜拱, 向外倾斜18°; 中拱为空间扭曲拱, 拱肋外壁板

收稿日期: 2024-07-15

作者简介: 华国红(1970—), 男, 本科, 高级工程师, 从事道桥施工工作。

均为空间扭曲板件。



图 1 三堡景观步行桥全景

主拱为六边形断面,拱脚的断面尺寸约为 $4.0\text{ m}\times 4.3\text{ m}$,拱顶断面尺寸为 $2.8\text{ m}\times 2.6\text{ m}$;拱内横隔板间距约为 3 m ,纵向加劲肋间距约为 500 mm ;在拱内设置有通长检修通道。主拱横截面如图 2 所示。

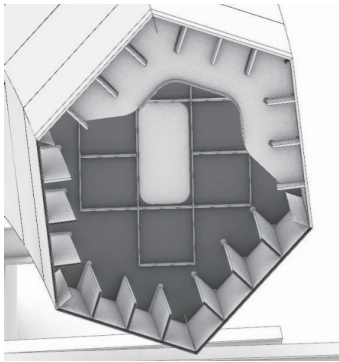


图 2 主拱横截面

1.2 主梁构造设计

主桥东、西拱跨部分的钢主梁截面为标准宽度 6 m 的等宽截面,在中央广场部分为宽度约 20 m 的变宽截面。

2 桥梁设计特点

主桥的造型独特,总体结构简约贯通,立面图如图 3 所示。桥梁在设计上主要有以下所述特点。

(1)各关键节点的受力及构造复杂:三跨拱肋为整体空间连贯性结构,中拱与东、西拱在拱墩处固结,以约 90° 正交垂直转接,部分结构为扭曲面,定位较为复杂。

(2)三跨拱肋的受力及空间形态各不相同:西拱与东拱为 18° 倾斜的平面结构,一侧拱脚为拱墩固结,一侧为拱梁固结,水平力主要由锚固在两端拱脚的系杆索平衡;中拱为空间扭曲拱,两端拱脚处均为固结,水平力主要由锚固在承台上的地下系杆索承担。

(3)单侧悬吊受力的曲线与主梁的受力及变形复杂:西、东侧主拱为单边倾斜拱,吊杆布置在单侧,桥面主梁不仅要承受面内面外弯矩、剪力及轴力,还

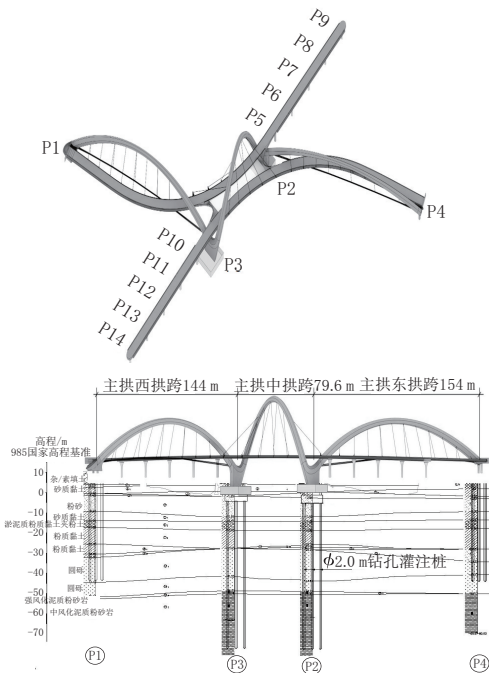


图 3 主桥立面图

承受着较大扭矩。

(4)拉索体系复杂:本桥的拉索及吊杆包括水平系杆索、吊索杆、主梁吊杆与拱脚地系杆等,拉索的锚固结构构造和受力均较为复杂,且空间吊杆角度各异,吊耳处构造也形态各异。

3 桥梁关键施工技术

本桥为大跨异型空间连续钢箱系杆拱桥,结构受力十分复杂。主桥采用“少支架+大节段浮吊节段吊装”的方案施工,需进行多次结构体系转换,经历“工厂下料节段预制→主梁、拱肋节段吊拼→安装并逐步张拉吊杆索、系杆及地系杆→拆除支架、体系转换→索力调整→施工桥面系及附属设施→成桥”等施工过程。由于本桥的结构空间异型,受力及拉索体系均非常复杂,导致施工难度极大。

3.1 钢结构制造工艺

本桥的主梁、钢主拱均为曲线构件,在工厂采用数控万能卷板机加工板材,钢曲线构件在制作加工的过程中,构造不以折代曲。制造时需要充分理解建筑设计与结构设计的思路、结构受力传递路径及安装时可调整的难易程度,以综合考虑节段的划分,特别是对于弯弧曲率大的部分,如中拱、拱脚处;中拱划分时需避开隔板 500 mm 以上的位置分段;拱脚处根据结构布置,在底座横向分 1 段、在结合段(顺竖向隔板的位置)分 3~4 段,拱脚根据曲率分段。

在制造过程中,实行首件工程认可制管理。

3.1.1 放样

(1)采用计算机放样技术,对钢结构各构件进行准确放样,且需绘制各构配件详图,作为绘制下料图及数控编程的依据。

(2)放样时按工艺要求预留制作、安装时的焊接收缩补偿量和加工余量。

3.1.2 下料

(1)下料前核对钢板的牌号与规格,检查表面质量。

(2)下料应严格按工艺套下料图进行,确保钢材轧制方向与构件受力方向一致;钢板及大型零配件的起吊转运采用磁力吊具,确保钢板及下料后零件的平整度。

(3)钢板采用等离子或火焰切割下料。

(4)大型矩形板在专用下料切割平台上采用数控火焰等离子切割机一次性下料成形,同时将焊接坡口开出。

3.1.3 弯扭板单元制作工艺

(1)壁板加工成形

先将按实体放样并切割好的壁板进行弯扭加工成形,加工时采用在大型卷板机上斜向滚压成型的方式,其中滚压成形的过程需反复、多次进行,并在加工过程中采用样板进行检测;由于壁板二端卷板机无法加工,需采用大型油压机进行压制。

(2)实体样箱制作

先在样台上划出弯扭构件四块壁板的1:1展开投影图及横隔板位置线,由木工按样台上的线形用木材制作壁板的实际展开样板,并按样台线形组装。样箱组装好后,将横隔板位置线驳到样箱壁板外侧,并作好记号,同时在壁板外侧弹出壁板二端的企口位置线。

(3)壁板加工成形后的检测

壁板在加工成形后,采用专用样板箱进行检测,主要检测加工后壁板的形状是否正确。将加工好的壁板吊入实体样板箱上,定对相对位置,检查壁板和样板箱之间是否密贴,其间隙不得大于1 mm,否则需再次用卷板机或油压机进行校正。壁板成形检测如图4所示。

(4)弯扭板单元组装中的胎架制作

考虑到板单元件的流水作业,为减少焊接胎架的重复制作及焊接时的二次定位,弯扭板单元组装中胎架的制作采用可移动式平台,即胎架底面设为一块独立的钢平台,胎架在钢平台上设置,壁板单元

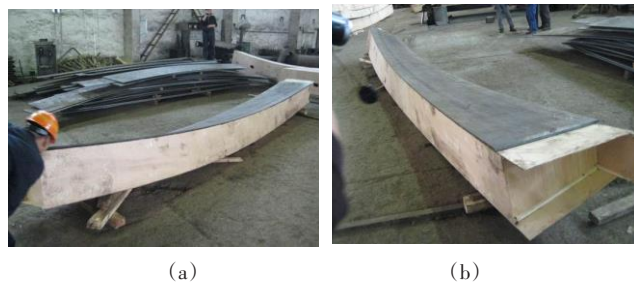


图4 弯扭壁板成形检测示意图

组装后连同平台胎架一起吊入焊接工位进行焊接,焊接后胎架再重复转入组装工位进行胎架组装,以保证流水作业。弯扭板单元组装在胎架设置前,应先在平台上根据棱线空间坐标划出壁板,作为胎架组装基准面的投影位置线以及横隔板位置线、胎架模板位置线,然后再设立胎架模板;模板上口需根据标高尺寸进行精密控制。

(5)壁板定位划线

将加工成形的壁板吊入胎架进行定位,当壁板单元较宽时,定位后需先进行壁板拼接纵缝的焊接。壁板在定位时必须与胎架密贴,定对端面企口位置线,满足平台上相关定位线形要求,并与胎架定位固定,然后在壁板上划出纵向加劲肋的组装位置线,并再次检查。

(6)壁板纵向加劲肋组装

根据壁板上划出的安装位置线,组装纵向加劲肋,组装时严格按划出的安装位置线定位组装;组装采用无码装配,并注意与壁板间的组装间隙以及与壁板间的相对位置,然后定位焊接,并提交检查。

(7)壁板与纵向加劲肋焊接

在壁板单元组装好后,将板单元连同组装平台一起吊入焊接工位,进行纵向加劲肋的焊接,焊接时采用CO₂气体保护自动焊接。

(8)壁板单元校正检测

壁板焊接后,需进行对焊接变形的校正,将固定壁板的限位全部拆除,在自由状态下进行测量并用火焰进行局部校正。板单元校正后,直接在胎架上进行检测,主要检查壁板与胎架是否密贴以及壁板的局部不平度和壁板扭曲度。

3.1.4 匹配总成施工

(1)钢梁(拱)匹配总成施工

钢梁(拱)的总成根据需要进行连续匹配胎架制造^[1]。考虑梁(拱)段的重量、结构形式、设计线形、外形轮廓、制作预变形、成桥预拱值及钢梁(拱)转运等因素进行胎架的设计和制作,胎架结构需有足够

的刚度,能满足承载钢梁(拱)及施工荷载的要求,并确保不随梁(拱)段拼装重量的增加而变形。在胎架底板的角点处设有角点位置控制模板,以便角点处的单元件进行准确定位。

(2)拱墩结合段的施工

拱墩结合段的结构复杂,依照焊接模型由若干构件在现场组焊而成。其中P2拱墩(见图3)结合段的组焊如图5所示。



图5 P2拱墩结合段组焊

3.2 测量放样

应用BIM技术,建立精准的BIM深化设计模型。由于该工程项目复杂,2D平面图纸不能完整和精确地反映设计全貌,需采用精准的BIM深化设计模型作为施工定位的最终依据。

采用GLT-1000拓普康全站式扫描仪与索佳高精度测量机器人共同测量复核。利用GLT-1000拓普康全站式扫描仪对其空间坐标及线形进行三维扫描,同时辅以索佳测量机器人对关键位置的坐标或变形进行测量校核^[2]。

3.3 临时支架搭设与拆除

3.3.1 涉航方案

临时支撑架的搭设应满足临时通航净宽、净高要求,报航道主管部门批准后实施;施工期间,一侧运河航道封闭施工,另一侧运河航道船只允许通行。

3.3.2 临时支架搭设方案

主桥施工采用“少支架+大节段浮吊吊装”施工方案。航道内支架采用水下打钢管桩作为基础,当水下临时支撑架钢管桩施工至水面上2.5 m后再接长至设计标高,岸上采用混凝土扩大基础的形式。桩基采用D630 mm×10 mm钢管桩,桩基钢管和立柱钢管间设置2H700 mm×300型钢作为转换支承平台;主拱支架立柱采用6根φ500 mm×10 mm钢管,横桥向布置3排立柱,间距2.3 m,顺桥向布置2排立柱,间距3.0 m;除跨通航河道处的支架与主拱支架一致外,其余主梁支架立柱均采用4根φ500 mm×10 mm

钢管。斜撑为14#槽钢,分配梁为双拼HM488×300工字钢,钢管与分配梁中间使用柱顶板连接;调节短柱使用20#槽钢对扣双拼成方管,材质为Q235B。

水上支架采用100 t浮吊船施工,按照“航道审批时间”进行。支架搭设形式如图6所示。

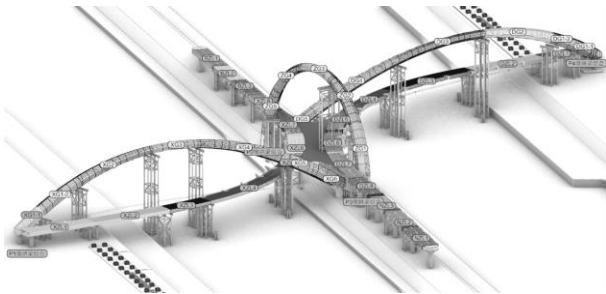


图6 梁、拱肋节段及支架布置图

3.3.3 工况验算

(1)利用MIDAS Civil2021(V1.1)软件建模,三拱的拼装过程计算模型如图7~图9所示。



图7 东拱拼装过程计算模型示意图

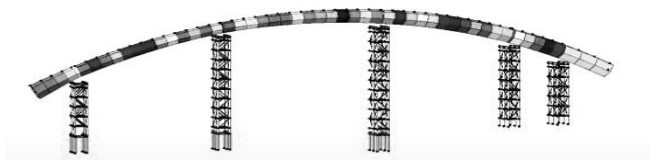


图8 中拱拼装过程计算模型示意图

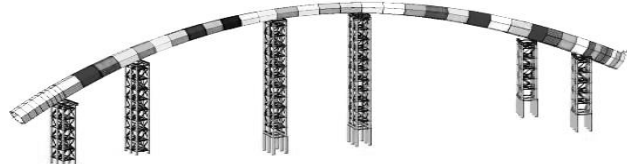


图9 西拱拼装过程计算模型示意图

(2)计算工况

- a. 裸架工况:支架自重+台风风荷载工况。
- b. 拱肋安装工况:拱肋自重荷载+支点水平力+施工时风荷载(支架分单侧受力和双侧受力两种工况)。
- c. 拱肋安装到位工况:拱肋自重荷载+横向最大台风荷载。

(3)荷载组合

- a. 基础验算标准组合:1.0×结构自重+1.0×风

载结构验算基本组合。

b. 安装组合: $1.1 \times$ 临时结构重量+ $1.2 \times 1.1 \times$ 主体重量+ $1.4 \times 20\%$ 主拱重量的水平推力(吊装搁置时由于支承面未完全找平,存在一定不确定性,计算时暂按 20% 考虑)+ $1.0 \times$ 安装风载。

c. 抗风组合: $1.1 \times$ 临时结构重量+ $1.1 \times$ 主体重量+ $1.0 \times$ 台风风载。

对于钢梁与三拱在安装各阶段的荷载,经模拟验算可知:桩长支架的应力、支架的稳定性与桩基的承载力均满足要求。

(4) 支架拆除

临时支撑架的拆除从上往下依次进行,按“上部调节结构工装→分配梁→斜撑→钢管格构柱→斜撑→钢管格构柱”的顺序交替拆除。

全桥体系转换完成后,进行钢梁拱的整体落架,支架拆除用浮吊进行拆除,拆除顺序:先拆中间的高支架、后拆两边的矮支架,对称拆除。

拆除支撑架时,使用 1 台 100 t 浮吊配合作业。用火焰切割机,对一组调节短柱底部竖向切割抽条,或

环口切割(长度至少大于 20 mm),通过控制切割缝隙及箱梁压重,箱梁节段逐步下落(每次切割约使调节短柱下降 5 mm),从而完成有序落梁工作。

拆除过程:先隔除调节支墩,再拆除分配梁,最后拆除顶端立柱。

3.4 钢箱梁、拱肋吊装

3.4.1 安装及吊装顺序

安装顺序:拱脚→钢梁→拱肋(跨中合龙)。

吊装顺序:吊装前准备工作→临时支墩搭设→箱梁、拱吊装→箱梁、拱调整→箱梁、拱焊接→整体卸载→封闭部位涂装→临时支撑拆除→整桥涂装。

3.4.2 吊装方法

吊装方法根据上部结构空间的结构位置、形状大小、单件重量和有关标准规范以及施工现场条件确定。经过计算和论证后,水面上钢梁、拱节段采用 300、500 t 浮吊单机作业,岸上钢梁、钢拱采用 2 台 300 t 汽车吊和 2 台 400 t 汽车吊抬吊作业的施工方法。对钢梁、拱吊装时吊机作业最不利工况的分析如表 1 所列。

表 1 吊机作业最不利工况分析

吊装分段	西侧主拱 XG1-1 节段	东侧主拱 DG1-1 节段	西侧主梁 XZL4 节段	P2JH4
分段最大重量/t	111.2	136	195.3	109
吊装高度/m	9.3~12.5	8.4~13.7	32.8~22.8	30.5~18.5
加固+吊耳+索具重量/t	0+0.29+2.2	0+0.29+2.2	0+0.5+3	0+0.5+3
起重机械类型	2 台 300 t 汽车吊	2 台 400 t 汽车吊	1 台 500 t 浮吊	1 台 300 t 浮吊
最大工作半径/m	10	12	35	35
最大臂长/m	30.8	31.2	70	70
额定起重量/t	75	93	220	130
双机吊折减系数/ 0.8(单机不折减)	75 t>0.5×(111.2+0+0.29+ 2.2)/0.8=71 t	93 t>0.5×(136+0+0.29+ 2.2)/0.8=86.5 t	220 t>195.3+0+0.5+3= 198.8 t	130 t>109+0+0.5+3= 112.5 t

3.4.3 吊点位置、吊装时姿态调整和精确就位调整措施

(1) 在施工前精确计算出钢构件的预拱度,以此作为下料、拼装的依据。

(2) 梁及拱的吊点位置由建模确定。

(3) 吊装时姿态调整:在桥址梁场制造拱肋吊装竖转支架,确保拱肋起吊后的姿态与桥位高空就位时的姿态一致。

(4) 精确就位调整措施:一是按梁或拱的线形,测量支架顶部标高,切割超出部分的支承板,使支架顶部标高与理论线形一致;二是在拱肋或钢梁接头处安装匹配件(在工厂进行 n+1 总装时安装),确保梁或拱在高空能够快速精确定位。

(5) 由于主梁和主拱的平面位置关系存在多次

交叉,在河道中打支撑管桩的精度无法保证,故为了保证梁、拱的安装精度,在支撑管桩施工及支撑架的安装过程中设置可调整措施。

(6) 安装中的工装设计与使用:在拱节段的安装中,在拱段设计调平支腿,配合分配梁,可把拱段的倾覆荷载竖向传递到临时支撑架上。

(7) 应用 MIDAS Civil 软件技术在异形钢拱桥的施工监控技术及预警体系中^[3],确保精确就位,不在结构施工过程中累计初始附加内力,使结构的成桥内力符合设计预期。

3.4.4 支撑点加固

当梁或拱肋安装就位后,在梁或拱的接头处装上匹配件、焊上马板;在梁或拱周边分别同支架打上马板,以防扭转、防倾覆和防台风。如支架未能支承

在腹板或隔板下面,对支承点处进行加强。

3.5 体系转换

采用 MIDAS Civil 软件对本桥体系转换施工进行模拟分析,由于主梁结构跨度大,且主梁刚度较小,采用单根吊杆按顺序张拉的方法难以完成桥梁的体系转换。根据结构计算,应统一提高主梁高程,然后安装主桥吊杆并张紧,再依据一定的顺序进行主梁及拱肋落架,中间穿插平衡索及吊挂索的张拉,进而完成桥梁的整体体系转换。

3.5.1 吊杆及平衡索施工工艺流程图^[4]

落实好主桥箱梁及拱肋节段的安装,并完成所有焊缝焊接工作;主梁支架顶采用千斤顶进行主梁抬升,使主梁高程满足体系转换要求;主梁顶升按照自中间向两边进行的顺序,吊杆张拉顺序根据监控指令进行。吊杆及平衡索的施工工艺流程如图 10 所示。

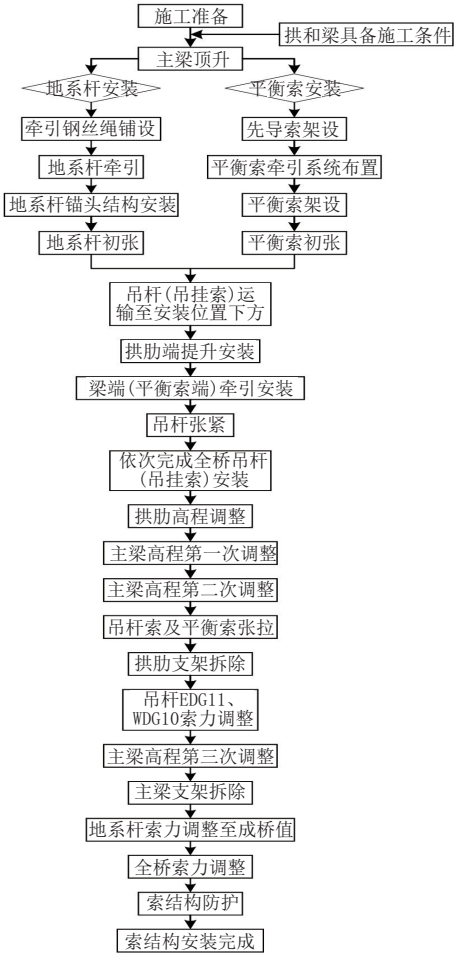


图 10 吊杆及平衡索施工工艺流程图

3.5.2 无应力下料长度

本工程主桥的拉索体系复杂,包括水平系杆索、吊挂索、主梁吊杆与拱脚地系杆等,拉索锚固结构的构造和受力均较为复杂,且空间吊杆的角度各异,吊耳处构造也形态各异。故应在工厂下料前确定吊杆

(索)的无应力索长,尤其是东、西拱跨的水平柔性长系杆,长度达 156 m,并通过 4 根吊挂索连接系杆索,以保持系杆索的平衡与稳定。在张拉过程中,吊挂索与水平长系杆相互影响,会引起索力及系杆线形的变化。故在计算无应力下料长度时,应综合考虑后续张拉索力等的影响。

3.5.3 支座水平力调整

由于本项目桥梁结构形式特殊,结构受力情况复杂,在正常情况下完成落梁时本桥桥墩 P1、P4、P6、P11 处(见图 3)仍会存在较大的水平力作用,对桥墩受力较为不利。为改善桥墩及支座承受的水平作用力,设计要求 P6、P11 墩上的水平向分力不超过 300 kN。针对以上情况,通过计算分析,对 P6、P11 主梁采用了“预偏安装、强制归位”的方式进行支座反力控制。

3.6 施工监控

本研究采用有限元软件 MIDAS Civil 软件对桥梁建立三维板壳有限元模型,并进行仿真分析。施工监控过程中的控制计算内容包括:设计符合性计算、施工过程仿真分析和成桥运营计算。

桥梁施工控制采用自适应控制法,监控单位在施工过程中按“预测、施工、实测、参数修正”的循环控制过程进行施工阶段的计算、模拟;施工单位根据监控单位提供的指令进行桥梁施工控制。

4 结 语

桥梁成桥桥面及拱肋线形顺畅,分段接口平滑,满足整桥线条流畅的美观要求,成桥荷载试验满足规范和设计要求^[5]。故本研究采用的关键技术施工工艺能有效满足三跨连续异型钢结构桥梁的需要,对同类异型结构桥梁施工具有重要参考意义和实用价值。

参考文献:

[1] 岳莹,张述明,何林,等.太原市机场路火炬大桥钢箱梁制作技术[J].钢结构,2011,26(2):49-54.
[2] 马娟娟,张鑫,郭若成,等.地铁监测测量机器人在线计量方法研究[J].计量学报,2024,45(3):447-454.
[3] 卢吉,高畅,陈飞,等.基于 BIM 的复杂空间异形钢拱桥拱肋施工校核研究[J].土木建筑工程信息技术,2021,13(3):8-14.
[4] 杭州萧宏建设环境集团有限公司.景观步行桥拉索及系杆安装施工方案[M].杭州:杭州萧宏建设环境集团有限公司,2023.
[5] 浙江大学土木工程测试中心.杭州江河汇城市综合体汇中区块景观步行桥成桥荷载试验[R].杭州:浙江大学土木工程测试中心,2024.
[6] 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司.景芳三堡单元江河汇城市综合体汇中区块设计-景观步行桥工程(建筑装修)[M].上海:同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,2021.