

DOI: 10.7672/sgjs2024210058

邻近运营线超宽幅钢结构系杆拱桥施工技术*

陈立斌

(中铁十五局集团第二工程有限公司, 上海 201714)

[摘要] 金汇港大桥北侧邻近既有运营铁路线, 南侧埋有天然气管道, 且上跨通航金汇港航道, 建造环境复杂, 施工风险控制难度高。结合施工环境及桥梁结构特点, 将传统整幅“先梁后拱”施工流程优化为分幅“先梁后拱”, 通过合理布置水下支架墩及拱下支架、引入钢构件虚拟拼装技术、基于重心计算进行吊点优化、采用预制构件快速拼装技术等, 实现金汇港大桥主桥钢结构、混凝土桥面板快速安装施工, 提升桥梁拼装效率及建造品质。工程实践表明, 金汇港大桥构件预制及拼装可满足桥梁结构设计要求, 且施工期间可保证邻近运营线安全。

[关键词] 桥梁; 拱桥; 系杆; 钢结构; 拼装; 施工技术

[中图分类号] U445.4

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)21-0058-06

Construction Technology of Super-wide Steel Structure Tied Arch Bridge Adjacent To Operating Line

CHEN Libin

(China Railway 15th Bureau Group 2nd Engineering Co., Ltd., Shanghai 201714, China)

Abstract: The north side of the Jinhuigang Bridge is adjacent to the existing operating railway line, and the south side is buried with natural gas pipelines, and it crosses the navigable Jinhuigang Channel, the construction environment is complex and the construction risk control is difficult. Combined with the construction environment and the characteristics of the bridge structure, the traditional construction process of the whole beam first and arch later is optimized into separated beam first and arch later. By reasonably arranging the underwater support piers and the arch supports, introducing the virtual assembly technology of steel members, optimizing the lifting point based on the calculation of the center of gravity, and adopting the rapid assembly technology of prefabricated components, the rapid installation and construction of the steel structure and concrete bridge deck of the main bridge of Jinhuigang Bridge is realized, and the assembly efficiency and construction quality of the bridge are improved. The engineering practice shows that the prefabricated and assembled components of Jinhuigang Bridge can meet the requirements of bridge structure design, and the safety of adjacent operating railway line can be guaranteed during construction.

Keywords: bridges; arch bridges; ties; steel structures; assembling; construction

0 引言

为有效节约优质的耕地资源, 新建线路常采用与既有铁路、管线等平行设置的设计理念, 但易造成新建结构在一定程度上侵入既有线路的红线范围内^[1-2]。邻近既有线路的新建桥梁在建设过程中会受到既有结构的影响, 使其可利用的施工空间受

到一定限制, 进而直接影响施工方法的选择, 并导致施工效率和工程质量的降低^[3-4]。

已有学者对邻近既有线路的钢结构拱桥施工关键技术进行了研究, 如王琪^[5]对邻近京沪高铁主跨为 112.5m 的黄固特大桥施工关键技术进行了分析, 提出了跨多车道的钢箱拱桥顶推施工方案; 王礼武等^[6]以主跨为 128m 的马庄特大桥施工为背景, 提出了下承式钢管混凝土提篮拱桥上跨在建地下结构施工方法; 张博^[7]针对合安铁路某下承式钢管混凝土系杆拱桥跨既有高速公路施工技术展开

* 中铁十五局集团有限公司科技项目: 大跨度下承式平行三拱肋钢箱拱桥施工关键技术研究(2020B1)

[作者简介] 陈立斌, 高级工程师, E-mail: 826218393@qq.com

[收稿日期] 2024-04-28

了研究,阐述了系梁支架设计、吊杆张拉等关键技术。

本文以 G228 公路金汇港大桥为研究背景,首先,对桥梁结构构造及周边复杂环境特点进行介绍;然后,对桥梁总体施工流程及钢构件划分方案进行研究;最后,根据邻近运营线的情况,从支架布设、预制构件虚拟拼装、梁板构件快速化拼装等方面提出了邻近运营线的超宽幅钢结构系杆拱桥关键施工技术。

1 工程概况

金汇港大桥位于 G228 公路,上跨金汇港航道(Ⅳ级通航航道),主桥为 125m 下承式钢箱梁系杆拱桥,主桥全宽 44.6m,采用双幅桥面布置形式,如图 1 所示。该桥共设置 3 道矩形钢箱拱肋,中拱肋宽 2.1m,边拱肋宽 1.9m,拱肋间设置 5 道一字形风撑。拱轴线为二次抛物线,矢高 25m,矢跨比为 1/5。每片拱肋各设置 19 根平行钢丝拉索吊杆,全桥共 57 根。吊杆顶部为锚固端,底部为张拉端。系梁采用矩形钢箱截面,高 2.6m,其中中系梁宽 2.1m,边系梁宽 1.9m。端横梁为单箱双室钢箱梁,梁宽 3.1m,高 1.86~2.25m。中横梁为高 1.86~2.25m 的工字钢梁,布置间距 3m。小纵梁为工字钢梁,每幅设 2 道。桥面板由 252 块厚度 25cm 的钢筋混凝土预制板组成,通过抗剪栓钉与钢横梁、小纵梁连接后形成钢-混凝土组合结构桥面系。

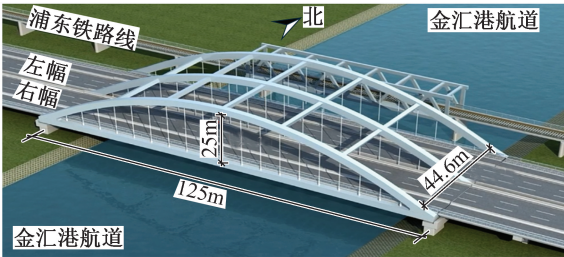


图 1 桥梁概况
Fig. 1 Bridge structure

金汇港大桥建设环境复杂,主要涉及运营铁路、通航航道等重要基础设施。主桥与其北侧浦东铁路平行,并侵入浦东铁路控制线 7.5m,故主桥北侧 10m 范围内均属于涉铁施工区域,且由于既有浦东铁路桥结构限制,金汇港大桥北侧无吊装施工空间。金汇港航道等级为Ⅳ级,净宽 68m,净高要求≥7m,无法在主桥建设全周期内采取封航措施,主桥钢结构施工期间风险较高。此外,金汇港大桥南侧红线外 7.5m 埋设高压燃气管线,埋深 16m,主桥基础可施工范围受到一定限制。

2 施工重难点与解决措施

2.1 钢结构制作

进行端部拱脚结合段工厂制作时,结构部件具有较小的操作空间,但高度较大,使钢结构制作困难,且钢结构内部零件布局错综复杂,较难控制各接口间零件安装精度。同时,焊接质量控制也是钢结构制作难点,由于焊接条件有限且工作量较大,对焊接人员技术和经验要求相对较高。此外,钢结构拱肋和钢系梁在设计 and 制作过程中均有独立的预拱度,这对制作精度要求高,增加了制作难度。为此,拱脚结合段制作流程启动前,在精密的三维建模空间进行模拟组装,确定各零件间的组装和焊接顺序,进而保证制作精度和焊接质量,提高生产效率和产品质量。正式制作时借助高精度测量工具和技术,严格按照设计要求进行安装,确保每个零件均可准确放置在预定位置上,且施工人员利用特殊的焊接设备和工艺保证焊接质量。钢结构制作过程中引入自动化设备进行放样,提高钢梁制作精度和效率,减小人为操作误差,使制作过程更加标准化和可控。同时,为进一步优化定制钢梁制作过程,根据钢梁尺寸和形状制作胎架,确保钢梁在制作过程中能够保持稳定的形态和精确的尺寸。

2.2 钢结构运输

由于工厂预制钢结构,导致钢结构运输成为施工重难点,且钢结构构件外形尺寸较大、分段较多,装卸过程中可能因占用航道过久对通航造成影响。为此,选择水路运输作为最优的运输形式,与航道部门进行沟通,确保整个运输过程满足通航要求。根据钢结构节段尺寸和形状,通过合理摆放和角度调整,最大化利用船舱空间,有效减少了运输次数,提高了运输效率。通过在船舱内设置支架凳与橡胶垫,防止构件磕碰。

2.3 钢结构吊装

由于金汇港大桥主跨钢箱梁吊装涉及水上水下施工、钢箱梁运输、打桩增设水下支架等,同时为了保证既有铁路线的安全运营,增加了钢箱梁吊装难度。钢结构构件、零件数量多,吊装过程中涉及不同的状态,增大了吊装难度。钢结构吊装过程中涉及多个构件之间的连接、支撑结构调整及吊装设备重新配置等,可能会带来额外的应力和变形,对吊装作业安全造成影响。为此,通过对施工区域进行详细的勘察和测量,确定最佳的打桩位置和深度,并使用专业的打桩设备。采用浮式起重机吊装,最大限度地降低对通航的影响。涉铁作业过程中密切关注浮式起重机运行状态及其与铁路线路

的相对位置关系,确保铁路线路安全畅通。进行分段吊装时,提前进行施工模拟。

2.4 桥面板安装

桥面板与钢结构搭接宽度仅为 3cm,这对结构稳固性和安全性的要求高。桥面板环形钢筋直径较大,需精确嵌入桥面板,且相邻桥面板之间的钢筋交错分布,使桥面板吊装时易因受力不均发生变形或损坏,从而增加了施工的复杂性和风险。为此,基于桥面板尺寸、配筋及与其他构件的接口设计进行分类,分为 A、B 型桥面板,并定制标准化钢台座模板及钢筋梳齿板,提高了桥面板制作效率,减少了因钢筋冲突导致的吊装延误和质量问题。

3 邻近运营线情况下拼装关键技术

3.1 总体施工流程

综合考虑金汇港大桥邻近运营线、航道等周边环境,并结合钢结构运输、吊装限制条件,主跨钢结构遵循“先梁后拱”的施工原则,并合理划分节段,如图 2 所示。桥梁纵向构件按水下支架设置位置分为 3 个节段,纵梁及拱肋均分为 2 个近岸段和 1 个合龙段,桥梁横向构件按左、右幅分为 2 个节段,两侧端横梁及风撑均分为左幅段、右幅段,而横梁、小纵梁独立成为单独构件。划分后的钢构件最大质量为 149t,尺寸及质量均满足运输要求。

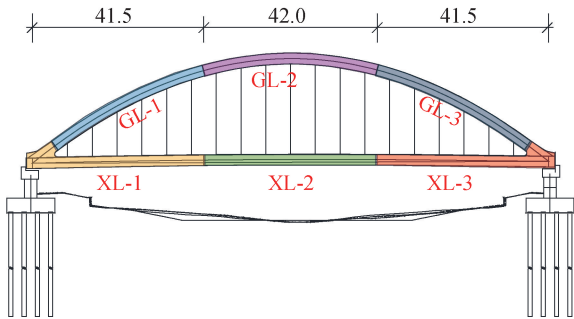


图 2 节段划分(单位:m)

Fig. 2 Division of segments(unit:m)

基于主桥钢构件划分方案,制定钢构件拼装施工流程如下。

- 1)在金汇港航道内搭设左幅水下支架,用于承载系梁、拱肋等结构自重。
- 2)首先吊装左幅边系梁及拱座,然后吊装西岸侧中系梁并安装对应桥面板,再吊装东岸侧中系梁并安装对应联系结构,最后吊装中系梁合龙段并安装对应联系结构。
- 3)架设左幅拱肋下方支架,吊装左幅边拱、中拱,并安装左幅风撑。
- 4)在金汇港航道内搭设右幅水下支架,用于承载系梁、拱肋等结构自重。

5)首先吊装西岸侧右幅边系梁并安装对应联系结构,然后吊装东岸侧右幅边系梁并安装对应联系结构,最后吊装右幅边系梁合龙段并安装对应联系结构。

6)架设右幅拱肋下方支架,吊装右幅边拱、中拱,并安装右幅风撑。

相较于传统系杆拱桥建造时采用的整幅桥梁“先梁后拱”的施工方法,金汇港大桥由于北侧作业空间受限等原因,采用分左、右幅先后采用“先梁后拱”的拼装施工方法。

3.2 复杂环境下支架布设

金汇港大桥临时支架布设主要包含水下临时支架墩和系梁上拱肋支架部分。

1)水下临时支架墩

单个水下临时支架墩由 4 根 $\phi 800\text{mm} \times 12\text{mm}$ 钢管桩及其支架平台组成,设计桩长为 36.57, 40.07m,布置情况如图 3 所示。水下钢管桩施工需分 3 批完成,依次为左侧系梁、中系梁、右侧系梁。其中,右侧系梁下的临时支架墩钢管桩施工需待左幅拱肋架设完成后进行,且由于靠近燃气管线,施工前需对钢管桩位置进行多次定位校准。采用 80t 浮式起重机振动锤击钢管桩至持力层,由于金汇港河道狭窄,浮式起重机施工过程中仅采取限航措施。水下钢管桩施工完成后,按标准化施工指南搭设标准作业安全平台。

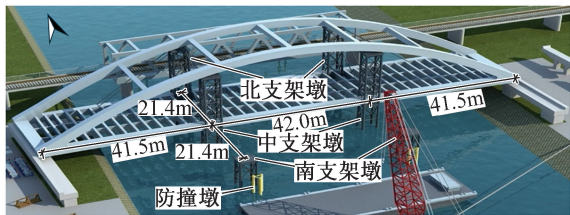


图 3 水下临时支架墩布置

Fig. 3 Arrangement of underwater temporary support piers

2)系梁上拱肋支架

单个系梁上拱肋支架由 4 根 $\phi 426\text{mm} \times 8\text{mm}$ 钢管组成,各钢管平面间距为 4m,如图 4 所示。为保证邻近运营线的安全,采用缆风绳固定拱肋支架,防止拱肋拼装期间支架倾覆失稳。

3.3 钢构件预制及虚拟拼装

以拱脚结合段为例,建立零构件三维模型(见图 5),通过三维虚拟拼装技术模拟优化各零构件组装及焊接顺序,保证了端部拱脚结合段构件制作精度和焊接质量^[8]。

此外,由于钢拱肋、钢系梁均有独立预拱度,构

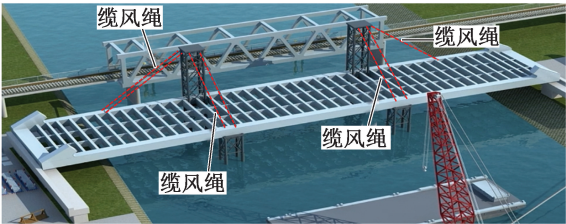


图 4 系梁上拱肋支架布置

Fig. 4 Arrangement of arch rib supports on the tie beam

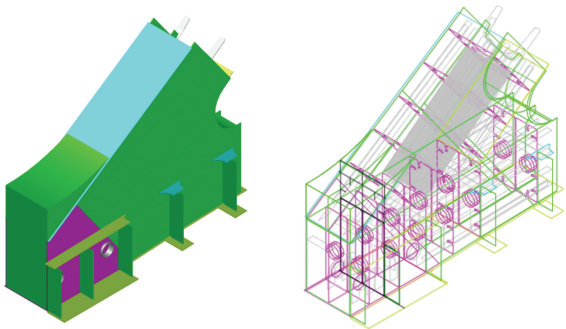


图 5 钢构件虚拟拼装

Fig. 5 Virtual assembly of steel components

件预制过程中需在原竖曲线基础上考虑预拱度的影响。通过自动化设备放样,定制钢梁胎架,精确定位钢结构预拱位置。

3.4 构件快速化拼装

由于金汇港大桥为本线路控制性工程,为减小桥梁施工对桥下航道的影响,缩短对邻近运营线的影响周期,通过桥梁构件快速化拼装技术的应用进一步提高施工效率。

1) 主桥钢构件安装

主桥钢构件共 288 件,种类多,且构件在运输、存放过程中存在平卧现象,导致构件重心位置、吊点位置均存在差异。运用三维建模软件,确定单个构件实际重心位置,并通过模拟构件翻转、正式起吊等吊装工况,确定合理的钢构件吊装方案。采用 350t 浮式起重机吊装钢构件,吊装前根据浮式起重机所在位置差异对部分河道区域的淤泥进行清理,吊装作业期间采取封航措施。吊装过程中通过吊点位置优化、索具配置调整等方式,使钢构件起吊姿态与就位姿态基本保持一致,有效缩短了钢构件吊装就位时间。

2) 混凝土桥面板安装

标准化钢台座模板及钢筋梳齿板如图 6 所示。为防止桥面板拼装过程对主桥钢结构产生附加应力等,通过仿真分析确定桥面板合理吊装顺序(见图 7),采用单台 55t 履带式起重机按照吊装顺序分幅、分节段吊装桥面板,依次安装右幅桥面板至西

岸侧支架墩位置处(约 1/3 跨度)、左幅桥面板至跨中位置处、右幅桥面板至东岸侧支架墩位置处(约 2/3 跨度)、左幅剩余桥面板、右幅剩余桥面板。



图 6 桥面板标准化模具

Fig. 6 Standardized mold of the bridge deck

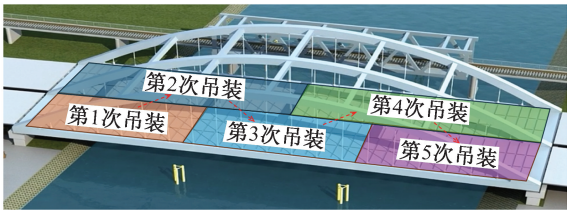


图 7 桥面板吊装顺序

Fig. 7 Hoisting sequence of the bridge deck

4 施工过程受力分析

非对称分幅施工会导致施工阶段拱桥结构受力不对称,施工阶段受力不确定性对施工质量的影响较大。因此,基于 MIDAS 软件建立施工阶段结构模型,分析各施工阶段受力情况。

4.1 结构模型建立

建立全桥结构模型(见图 8),其中主梁、拱肋、横梁、端横梁、小纵梁、风撑及钢管支架均采用梁单元模拟,桥面板采用板单元模拟,吊杆采用桁架单元模拟,全桥共划分 2 913 个单元,共计算 27 个施工阶段。各构件材料特性如表 1 所示。

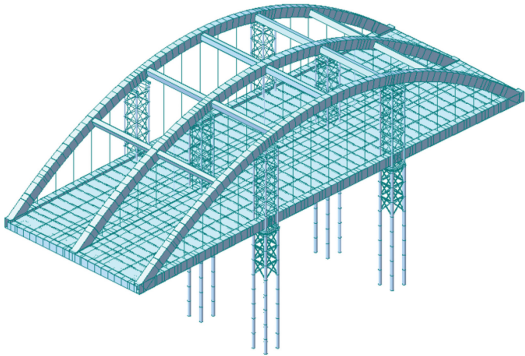


图 8 全桥结构模型

Fig. 8 Analysis model of the whole bridge

4.2 计算结果与分析

1) 拱桥弯矩

根据施工顺序对主要施工阶段拱桥弯矩进行分析。左侧系梁架设完成时,3 跨跨中弯矩较接近,

表 1 构件材料特性

Table 1 Material parameters of components

结构构件	材料	弹性模量/ MPa	泊松比	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
主梁	Q345qD 钢	206 000	0.3	78.5
拱肋	Q345qD 钢	206 000	0.3	78.5
横梁	Q345qD 钢	206 000	0.3	78.5
端横梁	Q345qD 钢	206 000	0.3	78.5
小纵梁	Q345qD 钢	206 000	0.3	78.5
风撑	Q345qD 钢	206 000	0.3	78.5
钢管支架	Q345qD 钢	206 000	0.3	78.5
吊杆	钢绞线	195 000	0.3	78.5
桥面板	C50 钢筋 混凝土	34 500	0.2	混凝土按 25, 钢筋另算

最大弯矩为 $5\,494.97\text{kN} \cdot \text{m}$,如图 9a 所示。第 1 跨中系梁架设时,中系梁跨中弯矩大于左侧系梁跨中弯矩,最大弯矩达 $8\,633.11\text{kN} \cdot \text{m}$,如图 9b 所示。左侧横梁纵梁架设时,左侧系梁和中系梁跨中弯矩均有所增大,如图 9c 所示。第 3 跨中系梁架设时,施工完成的结构跨中弯矩最大值与左侧横梁纵梁架设时相差较小,如图 9d 所示。横梁纵梁架设完成后,系梁中跨弯矩略小于边跨弯矩,如图 9e 所示。左侧、中拱肋和左侧风撑架设增加了系梁跨中弯矩,如图 9f,9g 所示。桥梁钢结构架设完成后,中系梁跨中弯矩达 $15\,838.79\text{kN} \cdot \text{m}$,如图 9h 所示。初

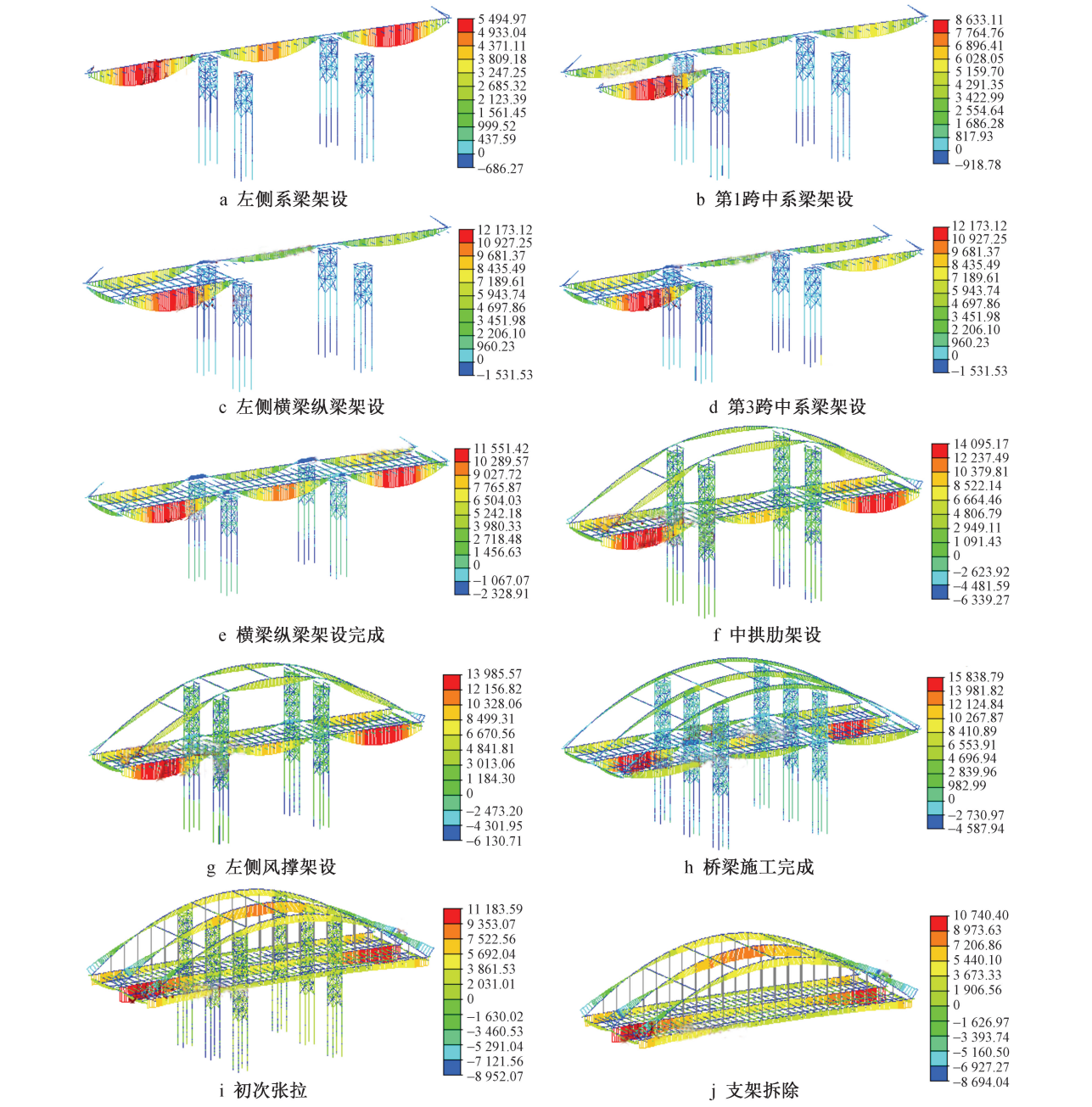


图 9 主要施工阶段拱桥弯矩(单位: $\text{kN} \cdot \text{m}$)

Fig. 9 Flexural moment of the arch bridge in the main construction stages (unit: $\text{kN} \cdot \text{m}$)

次张拉后,系梁跨中弯矩出现了明显降低,由 15 838.79kN·m 降至 11 183.59kN·m,而拱肋弯矩明显增加,其中中拱肋拱顶处弯矩达 8 000kN·m,如图 9i 所示。初次张拉结束后拆除支架,此时结构弯矩略微降低,边跨跨中弯矩降低约 450kN·m,如图 9j 所示。桥面铺装的不对称施工对拱桥结构受力影响较大,二次张拉对拱桥结构受力影响较小,张拉完成后,系梁跨中最大弯矩降低,拱肋最大弯矩增大。

2) 拱桥变形

成桥状态下,左、中、右侧拱肋跨中最大竖向位移分别为 0.099,0.137,0.103m(下挠),左、中、右侧主梁跨中最大竖向位移分别为 0.088,0.101,0.086m(下挠)。

3) 拱桥应力

成桥状态下拱桥应力如图 10 所示,由图 10 可知,成桥状态下,左、中、右侧拱肋上、下缘应力均为压应力,其中最大压应力为 122MPa,出现在中侧拱肋跨中位置;左、中、右侧主梁上、下缘应力均为拉应力,其中最大拉应力为 106.1MPa,出现在中侧主梁靠近小里程拱脚处。

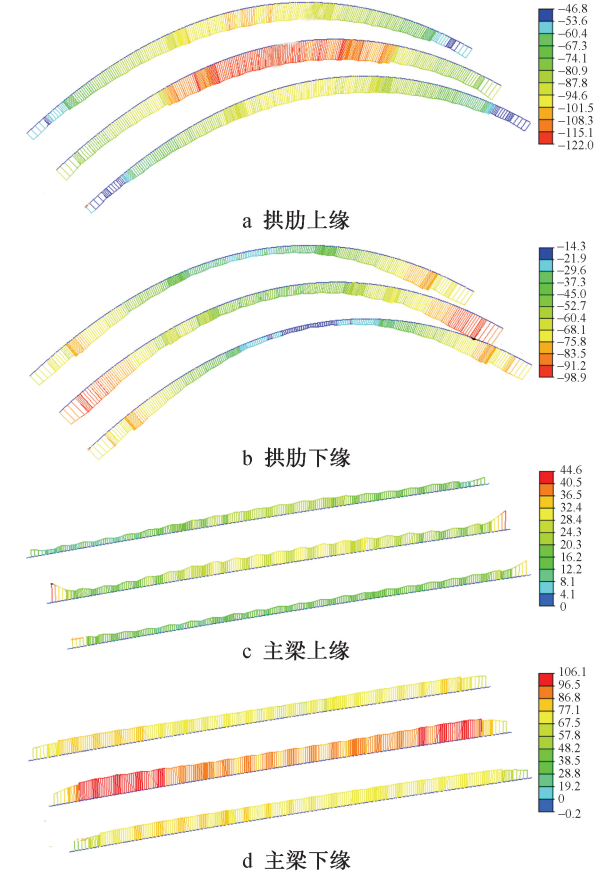


图 10 成桥状态下拱桥应力(单位:MPa)

Fig. 10 Stress of the arch bridge in the completion state (unit: MPa)

4) 吊杆受力

成桥状态下,吊杆最大拉应力为 395.5MPa,满足允许应力要求,且全桥吊杆应力分布均匀,留有足够的安全储备。

5 结语

针对金汇港大桥邻近运营铁路线、跨越通航航道等复杂施工环境特征,结合其超宽幅、双幅三拱的结构特点,制定了钢构件分幅“先梁后拱”拼装的合理施工流程。通过分段布设水下临时支架墩、拱肋支架,保证了钢构件在拼装过程中的稳定性。应用零构件虚拟拼装技术,提高了钢构件制作精度与预制品质。基于三维仿真计算构件重心优化吊点、定制桥面板标准化钢模具,实现了钢构件、混凝土构件的快速化拼装施工。通过多种技术的综合应用,有效提高了邻近运营线钢拱桥建造效率及质量,保障了既有运营线及新建桥梁的结构安全,取得良好的施工效果。

参考文献:

[1] 杜杭飞. 邻近既有线多跨钢桁梁桥基础扰动性与顶推施工技术研究[D]. 长沙:中南大学, 2022.

DU H F. Research on foundation disturbance and jacking construction technology of adjacent existing multi-span steel truss bridge[D]. Changsha: Central South University, 2022.

[2] 罗冰. 新建桥梁对邻近既有桥梁的影响分析[J]. 北方交通, 2023(10):5-9.

LUO B. Analysis of impact for newly-built bridges on adjacent existing bridges[J]. Northern communications, 2023(10):5-9.

[3] 余光远,陈志阔,刘克兢,等. 系杆钢拱桥张拉变形机理及施工技术研究[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(18): 67-73,83.

YU G Y, CHEN Z K, LIU K J, et al. Tensile deformation mechanism and construction technology of steel tied arch bridge[J]. Construction technology, 2023, 52(18): 67-73,83.

[4] 王晨阳. 跨越营业线钢结构天桥顶推施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(8): 85-89.

WANG C Y. Jacking construction technology of steel structure platform bridge crossing business line[J]. Construction technology, 2023, 52(8): 85-89.

[5] 王琪. 寒冷气候下邻高铁跨高速的钢箱拱桥施工技术与创新[J]. 铁道建筑技术, 2024(3): 82-86.

WANG Q. Construction technology and innovation of steel box arch bridges adjacent to high-speed railways and crossing highways in cold climate[J]. Railway construction technology, 2024(3): 82-86.

[6] 王礼武,钱栋栋,韩君,等. 大跨度提篮拱桥上跨在建地下结构物交叉施工技术[C]//2022 年全国土木工程施工技术交流会论文集,2022.

(下转第 102 页)

rock breaking mechanism and efficiency of insert hob[J]. China Journal of highway and transport,2018,31(10):150-159.

[8] 方诗圣,曾志远,孟益平,等. 镶齿滚刀破碎岩渣粒径分布规律研究[J]. 建井技术,2017,38(5):28-31.
FANG S S,ZENG Z Y,MENG Y P,et al. Study on the particle size distribution of broken rock slag with toothed hob[J]. Mine construction technology,2017,38(5):28-31.

[9] 侯义辉,王薇,张心源. 球型镶齿滚刀参数对破岩比能影响性研究[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(5):1286-1294.
HOU Y H,WANG W,ZHANG X Y. Study on the influence of spherical gear hob parameters on the specific energy of rock breaking[J]. Journal of railway science and engineering,2020,17(5):1286-1294.

[10] 苏利军,孙金山,卢文波. 基于颗粒流模型的 TBM 滚刀破岩过程数值模拟研究[J]. 岩土力学,2009,30(9):2823-2829.
SU L J, SUN J S, LU W B. Numerical simulation study on rock breaking process of TBM hob based on particle flow model[J]. Rock and soil mechanics,2009,30(9):2823-2829.

[11] GONG Q M,ZHAO J. Influence of rock brittleness on TBM penetration rate in Singapore granite [J]. Tunnelling and underground space technology,2007,22(3):317-324.

[12] 梁正召,于跃,唐世斌,等. 刀具破岩机理的细观数值模拟及刀间距优化研究[J]. 采矿与安全工程学报,2012,29(1):84-89.
LIANG Z Z, YU Y, TANG S B, et al. Meso-level numerical simulation of rock breaking mechanism of cutters and optimization of cutter spacing[J]. Journal of mining & safety engineering,2012,29(1):84-89.

[13] 张春瑜. TBM 岩渣几何特征与滚刀破岩效率相关性分析[J]. 施工技术(中英文),2024,53(7):85-91.
ZHANG C Y. Correlation analysis between geometric characteristics of TBM rock debris and rock breaking efficiency of rolling cutters [J]. Construction technology,2024,53(7):85-91.

[14] 徐小荷,余静. 岩石破碎学[M]. 北京:煤炭工业出版社,1984.

XU X H, YU J. Rock breakage [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House,1984.

[15] 石崇,张强,王盛年. 颗粒流数值模拟技术及应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2018. SHI C, ZHANG Q, WANG S N. Numerical simulation technology and application of particle flow [M]. Beijing:China Architecture & Building Press,2018.

[16] LEE H,JEON S. An experimental and numerical study of fracture coalescence in pre-cracked specimens under uniaxial compression [J]. International journal of solids and structures,2011,48(6):979-999.

[17] 刘志强. 大直径反井钻机关键技术研究[D]. 北京:北京科技大学,2015.
LIU Z Q. Research on key technologies of large-diameter raise drilling rigs[D]. Beijing:University of Science and Technology Beijing,2015.

[18] 魏晓华. 悬臂式掘进机截割过程动态特性分析与性能预测[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2013.
WEI X H. Analysis of dynamic characteristics and performance prediction of cantilever roadheader cutting process[D]. Fuxin: Liaoning Technical University,2013.

[19] JIANG M J, LIAO Y B, WANG H N, et al. Distinct element method analysis of jointed rock fragmentation induced by TBM cutting [J]. European journal of environmental and civil engineering,2018,22(1):79-98.

[20] 杨开新,蒋明镜,陈有亮,等. 不同岩性下 TBM 滚刀破岩过程离散元分析[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(2):198-204,211.
YANG K X, JIANG M J, CHEN Y L, et al. Discrete element analysis of the rock breaking process of TBM hobs under different lithologies[J]. Journal of water resources & water engineering,2019,30(2):198-204,211.

[21] SNOWDON R A, RYLEY M D, TEMPORAL J, et al. The effect of hydraulic stiffness on tunnel boring machine performance [J]. International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts,1983,20(5):203-214.

(上接第 63 页)

WANG L W, QIAN D D, HAN J, et al. Cross construction technology of long-span basket handle arch bridge over underground structures under construction [C]//2022 National Civil Engineering Construction Technology Exchange Conference,2022.

[7] 张博. 跨既有高速公路下承式铁路系杆拱桥施工关键技术研究[J]. 工程与建设,2022,36(5):1491-1494.
ZHANG B. Research on key technology for construction of under-supported railroad tied arch bridges across existing highways[J]. Engineering and construction,2022,36(5):1491-1494.

[8] 罗博仁,刘德强,吴游宇,等. 基于激光扫描的公路钢梁桥模拟预拼装方法[J]. 施工技术(中英文),2023,52(18):104-108.
LUO B R, LIU D Q, WU Y Y, et al. Simulation pre-assembling method of steel girder bridge based on laser scanning [J]. Construction technology,2023,52(18):104-108.