

三拱肋钢箱系杆拱桥非对称施工与监控技术

陈立斌, 丁向兵, 张俊鹏

(中铁十五局集团第二工程有限公司, 上海市 201418)

摘要: 金汇港桥主桥为跨径 125 m 的下承式三拱肋钢箱梁系杆拱桥, 由于桥梁北侧侵入既有铁路红线范围内、桥下航道有通航需求等复杂施工环境, 拟采用先梁后拱、分幅拼装钢构件的非对称施工方案。根据钢结构非对称施工方案拟定了 3 种吊杆张拉顺序方案; 利用有限元模型仿真分析, 基于桥梁结构内力最优的控制原则比选了吊杆合理张拉方案: 主桥钢结构非对称施工完成后, 移除临时支架并对称分段张拉各吊杆的方案。在金汇港主桥非对称施工期间开展位移、应力、索力等的施工监控, 有效保障了主桥施工的安全及建造品质。工程实践表明: 吊杆初张拉后、调整张拉后各位移测点结果基本能满足金汇港桥主桥的几何控制目标, 调整张拉后的吊杆力实测值与理论值误差不大于 8.7%, 满足规范控制要求。金汇港桥主桥采用“钢结构非对称拼装, 吊杆分批对称张拉”施工方案, 可供其他钢箱梁系杆拱桥在复杂环境下非对称施工参考借鉴。

关键词: 系杆拱桥; 非对称施工; 吊杆张拉顺序; 方案比选; 施工监控

中图分类号: U445

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)04-0185-05

Asymmetric Construction and Monitoring Technology of Three-arch-rib Steel Box Girder Bowstring Arch Bridge

CHEN Libin, DING Xiangbing, ZHANG Junpeng

(China Railway 15th Bureau Group Second Engineering Co., Ltd., Shanghai 201418, China)

Abstract: The main bridge of Jinhuigang Bridge is a 125 m-span through three-arch-rib steel box girder bowstring arch bridge with steel box girder. Due to the complex construction environment that the north side of the bridge invades the red line of the existing railway and the channel under the bridge has the navigation requirements, it is proposed to adopt the asymmetric construction scheme of assembling steel members with beam first and arch later. According to the asymmetric construction scheme of steel structure, three kinds of suspender tensioning sequence schemes are proposed. Based on the optimal control principle of the internal force of the bridge structure, the tensioning schemes of the suspender are compared by the simulation analysis of finite element model. The reasonable scheme is that after the asymmetric construction of the steel structure of the main bridge, the temporary supports are removed, and the suspenders are symmetrically tensioned in batches. During the asymmetric construction of the main bridge of Jinhuigang Bridge, the construction monitoring of displacement, stress and cable force is carried out to effectively guarantee the safety and construction quality of the main bridge. The engineering practice shows that the test results of each displacement measuring point can basically meet the geometric control objectives of the main bridge of Jinhuigang Bridge after the initial tension and the adjustment tension of the suspenders. The error between the measured value and the theoretical value of the suspender force after adjusting the tension is not more than 8.7%, which can meet the control requirements of the specification. The construction scheme of asymmetric assembly of steel structure and symmetrical tensioning of suspenders in batches is adopted for the main bridge of Jinhuigang Bridge, which can be used as a reference for asymmetric construction of other steel box girder bowstring arch bridges in complex environments.

Keywords: bowstring arch bridge; asymmetric construction; sequence of suspender tension; scheme comparison; construction monitoring

0 引言

下承式系杆拱桥因其综合了拱桥、梁桥的优越受力特性, 可较大程度上保证桥下航道的通行净空要求^[1-3]。

收稿日期: 2024-04-08

作者简介: 陈立斌(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事工程建设项目施工和管理工作。

目前,在钢结构系杆拱桥的建造过程中,先梁后拱的上部结构建造方法得到了一定的应用,如上海金玉路油墩港桥^[4]、泰州市泰东河大桥工程^[5]、上海浦星公路大治河桥主桥^[6]等工程中均采用了该种施工方法;但当新建桥梁周边相对复杂时,该类建造方法的适用性对新建桥梁结构受力的影响还有待进一步研究。

此外,由于各类因素限制,系杆拱桥在采用非对称施工方法时,需要引入一定的施工监测与控制技术以保证施工过程安全、桥梁结构受力合理等^[7]。在绕成都市南延线跨府河大跨度系杆拱桥施工过程中,由于其外倾非对称式结构形式而采用支架法施工,通过引入对线形、应力及索力的实时监控,保证了非对称结构的施工安全^[8]。云南西双版纳澜沧江黎明大桥为中承式系杆拱桥,在其采用缆索吊装的建造过程中,通过施工监控实测数据与理论模型计算结果的对比可知,系杆拱桥满足了合理受力的设计要求^[9]。对系杆拱桥的施工监控研究大多集中于采用复杂施工方法或采用非对称结构形式的结构上,而对于复杂施工环境下非对称施工的系杆拱桥的研究及应用相对较少。

基于金汇港桥钢箱梁系杆拱桥需涉铁施工等复杂施工背景环境,提出了采用先梁后拱且分幅非对称施工方案,基于内力控制比选了吊杆的张拉顺序方案,并针对复杂施工环境开展了系杆拱桥非对称施工监控,保障了该桥的施工安全及建造品质。

1 工程概况

金汇港桥为主跨125 m下承式钢拱桥,全桥共设置三片拱肋,中拱肋位于中央分隔带内,边拱肋与中拱肋之间设置行车道,见图1(a)。

拱肋矢高25 m,矢跨比为1/5,线形采用2次抛物线。拱肋采用矩形钢箱截面,中拱肋高2.6 m,宽2.0 m;边拱肋高2.6 m,宽1.8 m;拱肋间各设置5道一字形风撑。

拱肋拱脚之间设置箱型钢结构系梁,系梁顶板下设吊杆钢锚箱;中系梁高2.6 m,宽2.0 m;边系梁高2.6 m,宽1.8 m。每片拱肋各设置19根吊杆(全桥共57根),吊杆顺桥向间距6.0 m,见图1(b)。

桥面系由端横梁、中横梁、小纵梁、桥面板组成,端横梁采用钢箱梁,单箱双室截面,中横梁和小纵梁采用钢工字梁,桥面板采用厚度为0.25 m的钢筋混凝土板,分块预制安装。

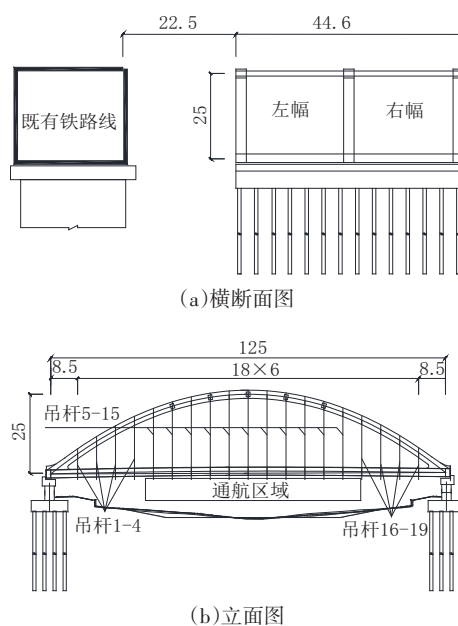


图1 桥梁结构及布置(单位:m)

金汇港桥北侧邻近浦东铁路、南侧邻近高压燃气管线,且桥下金汇港航道为Ⅳ级航道;本桥施工环境复杂,大型施工设备难以采用,并且施工过程中还需要保障铁路行车及航道运转安全。

2 复杂环境下的非对称施工方案

2.1 钢结构拼装方案

结合桥下金汇港航道的运输条件,将本桥钢结构合理划分节段后,通过散件运输+现场拼装的模式进行施工^[10]。根据“先梁后拱”的施工原则,沿桥梁纵向将本桥各组件均划分为3段,即包括西岸段、合龙段、北岸段;沿桥梁横向将本桥划分为左幅边拱、中拱、右幅边拱、横向联系。

由于金汇港桥主桥北侧邻近浦东铁路,属于涉铁施工,故需采用分幅非对称吊装钢结构的施工方法。主桥钢结构的拼装主要流程如下:左幅边系梁、中系梁及左幅横梁→左幅边拱肋、中拱肋及左幅风撑→右幅边系梁及右幅横梁→右幅边拱肋及右幅风撑,见图2。

此外,为保证拼装过程中钢结构的稳定性,在纵向分段位置处均设置临时支架墩,吊杆张拉后移除对应临时支架墩。

2.2 吊杆张拉方案

为保证非对称拼装施工条件下金汇港大桥成桥受力的合理性,拟定不同吊杆张拉方案,见表1。

吊杆张拉采用二次张拉法,即吊杆的张拉分为初张拉和调整张拉(终张拉)两个张拉阶段。初张拉阶段安排在主桥钢结构焊接安装完成后,调整张拉

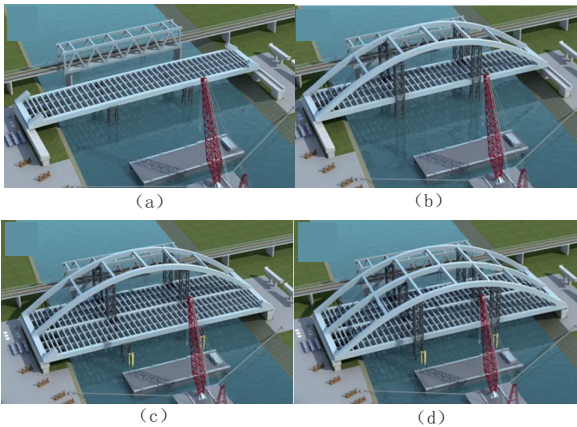


图2 钢结构吊装顺序图

表1 吊杆张拉方案

步骤	方案A	方案B	方案C
1		左幅边拱+中拱+左幅横向联系	
2	左幅边吊杆张拉 中吊杆张拉	左幅边吊杆张拉	—
3		右幅边拱+右幅横向联系	
4	右幅边吊杆张拉	中吊杆张拉 右幅边吊杆张拉	左幅边吊杆张拉 中吊杆张拉 右幅边吊杆张拉
5		桥面板安装	
6		吊杆二次张拉	

(终张拉)阶段安排在施加二期恒载之后。桥梁纵向上从拱脚到拱顶逐对称张拉各吊杆,张拉顺序拟定为:吊杆3、17→吊杆5、15→吊杆7、13→吊杆9、11→吊杆10→吊杆8、12→吊杆6、14→吊杆4、16→吊杆2、18→吊杆1、19。

三种吊杆张拉方案主要涉及钢结构合龙后的第一阶段吊杆张拉,各方案差异如下:方案A中,左幅钢结构拼装完成后,张拉右幅全部吊杆,待左幅钢结构拼装完成后张拉右幅剩余吊杆。方案B中,左幅钢结构拼装完成后,仅张拉左幅边吊杆,待左幅钢结构拼装完成后张拉右幅全部吊杆。而方案C中,钢结构拼装过程中保留全部临时支架,在钢结构全部合龙后才开始分批张拉全部吊杆。

3 基于内力控制的非对称施工方案比选

3.1 仿真分析模型

为分析非对称施工对桥梁受力状态的影响,建立金汇港桥主桥的有限元模型,见图5。

有限元模型中,吊杆采用桁架单元、桥面板采用板单元、钢结构均采用梁单元模拟。此外,利用杆单元建立临时支架,并采用平动位移的主从约束模拟

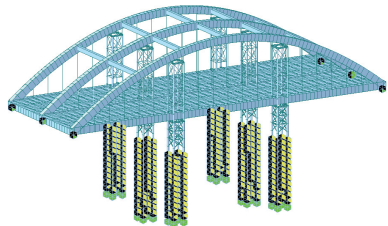


图5 有限元计算模型

临时支架与系梁、拱肋之间的边界关系^[11-13]。根据不同吊杆张拉方案,有限元模型中分别设置不同施工阶段以模拟施工全过程。

3.2 张拉方案的比选

选取较为典型的桥面板安装前、完全成桥前这两个施工阶段进行钢结构、吊杆力学性能的对比。桥面板安装前的施工阶段中,已根据不同张拉顺序方案完成全部吊杆的初张拉,且已拆除全部临时支架结构;完全成桥前的施工阶段中,已完成了全部吊杆的调整张拉,并完成了二期恒载的施工。

对比不同吊杆张拉方案下钢结构的最大挠度及截面下缘最大应力,见表2、表3。由对比结果可知,由于二期恒载的施加,完全成桥前的施工阶段中钢结构最大挠度相较于桥面板安装前的施工阶段明显增加;采用方案B时拱肋变形相对较小,但系梁变形相对较大。拱肋在各典型施工阶段中均处于受压状态,而系杆均处于受拉状态;采用不同吊杆张拉顺序方案时,钢结构截面下缘最大应力在桥面板安装前、完全成桥前的桥梁施工阶段中均大致相似。

表2 钢结构最大挠度对比 单位:mm

钢结构最大挠度		桥梁施工阶段	
		桥面板安装前	完全成桥前
拱肋	方案A	72.2	131
	方案B	70.1	127.6
	方案C	78.8	135.6
系梁	方案A	23.8	98.4
	方案B	30.1	104.7
	方案C	28.3	106.9

表3 钢结构截面下缘应力对比 单位:MPa

钢结构截面下缘最大应力		桥梁施工阶段	
		桥面板安装前	完全成桥前
拱肋	方案A	-70.7	-105.3
	方案B	-64.4	-100.5
	方案C	-65.2	-100.6
系梁	方案A	65.1	106.2
	方案B	62.4	105.9
	方案C	63.8	106.1

在完全成桥前施工阶段中,进一步对比不同张拉顺序下的吊杆应力的差异,见图6。由对比结果可知,不同吊杆张拉方案下短吊杆应力相对较小且基本无差异,而长吊杆应力差异较为明显;采用吊杆张拉方案A时,左幅、右幅边吊杆的应力明显较大;而采用吊杆张拉方案B时,中吊杆的应力略微偏大。

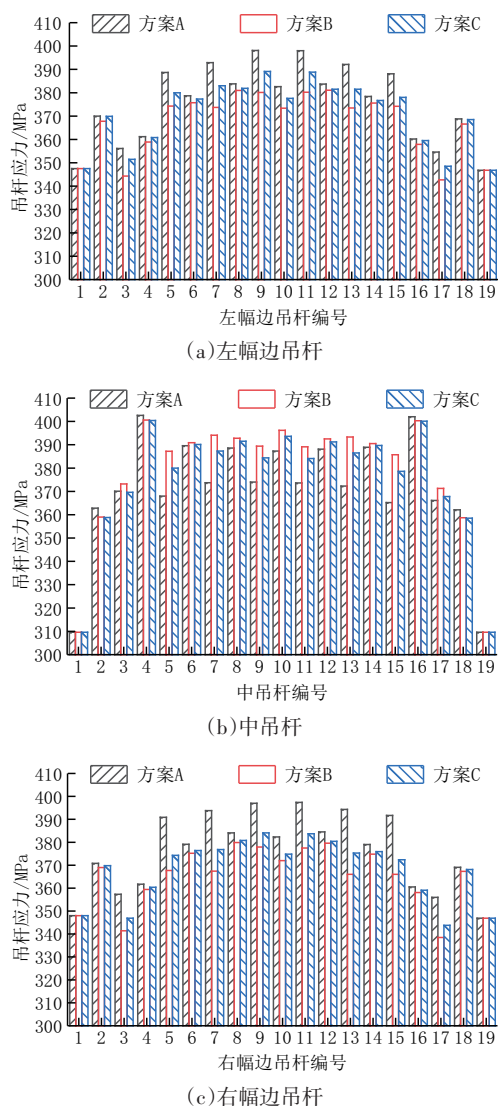


图6 完全成桥前吊杆应力对比(单位:MPa)

综合对比不同吊杆张拉方案的仿真计算结果可知,钢结构非对称施工会导致桥梁左右幅受力存在不对称性;但在吊杆完成张拉后,即成桥状态下拱肋与系梁均能较对称地受力,桥梁各项最大应力差小于4%;可基本认为索力调整可较为有效地解决了系杆拱桥非对称施工中可能存在的受力问题。

因此,结合主桥钢结构为非对称施工,拟定采用张拉方案C对各吊杆进行分段对称张拉,以达到控制线形以及满足设计的要求。在张拉时,横向上采

用6台智能张拉千斤顶同时张拉,并保证张拉过程中张拉力同步。

4 非对称施工监测与控制

4.1 非对称施工监测方案

根据拟定的非对称施工方案,采用拱端固定、梁端张拉的方式张拉吊杆。张拉过程中对系梁及拱肋高程、拱肋应力、吊杆应力等参数的变化进行监测,发生异常时停止张拉,位移、应变监测测点的布置,见图7。

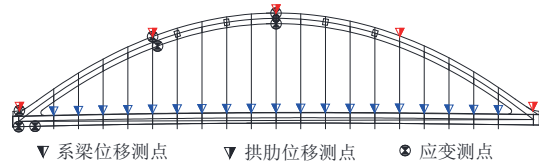


图7 施工监测测点布置情况

金汇港桥主桥施工期间的主要监测内容及控制目标如下。

(1)几何控制目标:包括桥面高程应满足 $\pm L/5\ 000+20=\pm 45\text{ mm}$,拱肋高程应满足 $\pm L/3\ 000=\pm 41\text{ mm}$,轴线偏位误差不大于 21 mm ,拱肋对称点相对高差不大于 41 mm 。

(2)吊杆力控制目标:全桥单根吊杆力实测值与理论预测值间的相对偏差应小于 $\pm 10\%$,但对根部1~2对吊杆可放宽;同一纵桥向坐标的上下游吊杆的吊杆力相对偏差不大于5%。

(3)应力控制目标:钢结构应力水平不大于60%材料允许强度。

(4)温度场监测:仅供施工控制分析时参数校准使用。

其中,吊杆力的测试采用综合频率法、千斤顶标定法和主梁标高变化法的方法综合判定吊杆张拉力。主要测试工况为初张拉后、调整张拉(终张拉)前后。

4.2 非对称施工控制效果

根据各位移测点的监测结果可知,除中系梁边吊杆(19号吊杆)外,初张拉后、调整张拉后各测点的位移均能满足金汇港桥主桥的几何控制目标。

由于初张拉后系梁尚未完全落架,张拉过程中吊杆力的耦合效应较为明显,存在张拉吊杆力值偏大于理论值的情况。但在调整张拉后,吊杆力值实测值与理论值的相对偏差在控制目标范围内,见图8。

此外,施工过程中对拱圈钢结构应变监测结果表明,拱肋关键截面上下缘的应力均在材料应力控制目标范围内,施工期内钢结构应力可控。

5 结 语

基于金汇港桥主桥涉铁施工的环境特征,并结

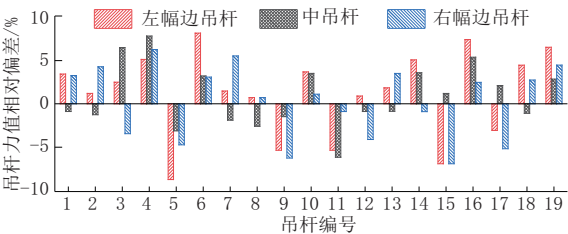


图8 调整张拉后吊杆力偏差对比

合三拱肋钢箱系杆拱桥的结构特点,拟定了多种复杂环境下非对称施工方案供选择;基于内力控制等方面综合比选,确定了“钢结构非对称拼装,吊杆分批对称张拉”的施工方案。即先拼装左幅钢结构边系梁、中系梁、边拱肋、中拱肋及横向联系,其次拼装右幅钢结构边系梁、边拱肋及横向联系,再沿桥梁纵向分批次对称初张拉吊杆,最后完成桥面板铺装并进行吊杆的调整张拉。结合金汇港桥主桥现场施工监控的测量数据及仿真计算结果,金汇港桥主桥采用“钢结构非对称拼装,吊杆分批对称张拉”施工方案后,可使得其二次张拉后吊杆力实测值与理论值误差不大于8.7%,满足规范控制要求。金汇港大桥已于2023年1月顺利贯通,本文提出的三拱肋钢箱系杆拱桥非对称施工与监控方案可供同类型桥梁施工参考。金汇港桥主桥施工效果见图9。

参考文献:

[1] 刘志燕.山区大跨度非对称拱桥拱肋架设技术[J].世界桥梁,2023,51(2):39-46.
[2] 刘帅辉.大跨钢管混凝土拱桥拱肋非对称安装施工技术研究[D].重庆:重庆交通大学,2022.
[3] 黄生富.多跨简支下承式系杆拱桥设计与施工[J].城市道桥与防



图9 金汇港桥主桥施工效果图

洪,2019(6):75-78.
[4] 刘安荣.下承式钢箱梁系杆拱桥“先拱后梁”法施工技术研究[J].建筑科技,2023,7(3):75-77.
[5] 姜海波.无支架施工系杆拱桥在泰东河大桥中的应用[J].城市道桥与防洪,2021(7):173-175;210.
[6] 宋胜录.大跨度下承式钢结构系杆拱桥的施工[J].建筑施工,2022,44(3):567-568;575.
[7] 李玉洁.拱桥先梁后拱施工技术及控制措施[J].交通世界,2022(31):134-136.
[8] 杨光,刘学红.大跨度外倾非对称式系杆拱桥施工控制研究[J].城市道桥与防洪,2019(4):131-135;142.
[9] Sun J P, Li J B, Jiang Y B, et al. Key Construction Technology and Monitoring of Long-Span Steel Box Tied Arch Bridge[J]. International Journal of Steel Structures, 2022, 23(1): 191-207.
[10] 陈兴合.内河航道钢箱提篮拱桥大节段吊装施工关键技术研究[J].施工技术(中英文),2023,52(9):102-107.
[11] 朱铭,吴艳.少支架非对称分段吊装工艺在钢结构拱桥施工中的应用[J].工程设计与设计,2024(3):184-186.
[12] 袁鑫,郑伟,朱超宇.空腹式连续箱形拱桥拆除关键技术与仿真分析[J].施工技术,2018,47(18):38-42.
[13] 胡晓勇,黄永辉,汪大洋,等.某大跨度外倾式非对称系杆拱桥的数值模拟研究[J].公路,2021,66(11):208-213.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadfloodbridge@163.com

