

宁波新典桥的技术特色与受力分析

曹沛

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 宁波新典桥主桥是一座跨径为213 m的简支下承式钢箱系杆拱桥, 位于宁波城市核心区, 跨越奉化江, 是城市主干道的重要组成部分。梳理了新典桥主桥所采用的步履式拱梁整体顶推施工方案的关键技术与创新点, 总结了ECO铺装技术对钢桥面耐久性的积极效应, 为相似桥梁建造提供了宝贵经验。对比了合理拱轴线与景观拱轴线的受力区别, 认为在进行景观拱桥设计时, 拱轴线是否合理对其经济性影响有限。此外, 还对景观悬挑步道及复杂拱梁结合段进行受力和构造解析, 为景观桥梁的设计提供了有效参照。

关键词: 钢箱系杆拱; 技术特点; 合理拱轴线; 顶推施工

中图分类号: U448.22

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)07-0071-05

Technical Characteristics and Stress Analysis of Xindian Bridge in Ningbo

CAO Pei

[Tongji University Architectural Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 20009, China]

Abstract: Ningbo Xindian Bridge is a simple-supported through steel box bowstring arch bridge with a span of 213 meters. It is located in the core urban area of Ningbo, spans the Fenghua River and is an important part of the urban trunk road. The key technologies and innovative points of the overall incremental launching construction scheme of the walking arch beam used in the main bridge of Xindian Bridge are sorted out. The positive effects of ECO paving technology on the durability of steel bridge decks are summarized. The valuable experience is provided for the construction of similar bridges. By comparing the force differences between a reasonable arch axis and a landscape arch axis, it is believed that whether the arch axis is reasonable has a limited impact on its economy in the design of landscape arch bridge. In addition, the stress and structural analysis are conducted on the connected section of landscape cantilever walkway and complex arch beam, which provides the effective reference for the design of landscape bridges.

Keywords: steel box bowstring arch; technical characteristics; reasonable arch axis; incremental launching construction

0 引言

在现代城市的发展过程中, 桥梁不仅是连接两地的重要交通枢纽, 更是城市文化和科技进步的象征。宁波新典桥作为城市交通网络的关键节点, 其设计^[1]和建造过程中所采用的技术和方法, 不仅体现了工程的实用性, 也展现了宁波这座城市对于美学和创新的追求。

1 工程概况

新典桥主桥是一座简支下承式钢箱系杆拱桥,

1跨跨越奉化江(V级航道), 设计时速50 km/h, 为双

向6车道加人非, 桥宽40.4 m, 因设置景观悬挑步道, 主桥结构加宽至56.2 m。新典桥及接线工程桥梁全长443.1 m, 跨径布置为: 31.5 m(北引桥)+221.6 m(主桥)+(2×31.5 m+32.5 m+3×31.5 m)(南引桥)。

新典桥总体布置图见图1。

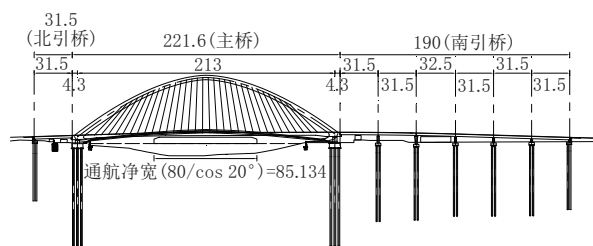


图1 新典桥总体布置图(单位:m)

2 技术特点

2.1 基于功能及景观需求打造的主航道桥梁

新典桥位于宁波的城市核心区, 是一座备受瞩目

收稿日期: 2024-10-18

作者简介: 曹沛(1990—), 女, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。

目的景观桥,除需满足交通功能外,还要综合人文、环境等因素,设计出造型别致、环境协调、人民友好的桥梁。桥位水面宽度约185 m(含亲水驳岸),为满足奉化江通航,要求主桥1跨过江。综合景观、经济等多方位论证后,确定采用跨径213 m的简支下承式钢箱系杆拱方案^[2]。

2.2 施工条件受限下的顶推工艺与设备

新典桥主桥施工条件苛刻,主要表现为:施工期间需确保不小于60 m的通航净宽、桥位东侧设计桥面上方约16 m处有高压线、主梁刚度弱等。传统的支架及浮吊施工均无法满足通航需求,缆索扣挂施工又受限於东侧的高压线,经综合比选后,采用了步履式拱梁整体顶推施工方案^[3-7]。该方案施工工艺如下。

(1)施工场地平整及硬化,施工主桥桥墩及临时顶推支墩。

(2)在东侧引桥区域设置钢结构预拼场,将拱梁拼接成整体后,安装前后导梁。

(3)采用步履式千斤顶对拱梁进行整体顶推过江直到就位。全桥共采用32套步履式千斤顶,每套千斤顶顶升吨位1 000 t,顺桥向顶推吨位80 t,行程1 000 mm;横向向纠偏吨位100 t,行程50 m^[3]。

新典桥主桥在岸上拼装完成,以整体顶推的方式抵达对岸。这在宁波桥梁建造史上尚属首次,也是全国跨径最大的钢拱梁整体顶推跨江桥梁^[4]。

2.3 提升钢结构使用寿命的ECO铺装

新典桥主桥采用正交异性钢桥面板,具有自重轻、承载力高、施工速度快等优点,但同时也存在疲劳问题。为提高其耐久性,在车行道范围内采用了ECO改性聚氨酯材料桥面铺装^[8-9]。

ECO改性聚氨酯材料具有强度高、抗冲击性能好、耐高低温、防水耐磨、黏附力强,能显著提高钢桥面板寿命等特点^[8],可有效解决车辙、疲劳、低温收缩、水害和老化等常见的铺装病害,提高结构耐久性,延长桥梁使用寿命。此外,ECO改性聚氨酯材料还具有快速固化的特点,在施工完成2 h后即可开放承载。新典桥是国内第1座采用ECO改性聚氨酯材料铺装体系的新建桥梁。

3 主航道桥梁设计

3.1 总体布置

新典桥主桥为简支下承式钢箱系杆拱桥^[10]。自重、车辆、人群等竖向荷载经由横梁传给系梁;景观

悬挑步道及副拱上的荷载通过挑臂传给系梁。上述荷载经由吊杆传递到拱肋,最终经拱梁结合段传给桥墩直至基础。

新典桥主桥典型断面布置图见图2。

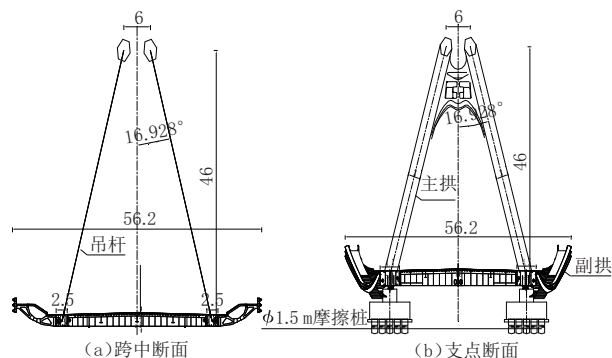


图2 主桥典型断面布置图(单位:m)

新典桥主桥跨径213 m(总长221.6 m),桥梁总宽56.2 m(含景观悬挑步道及副拱,见图2)。钢主梁采用双边箱系梁+3道小纵梁+密排横梁的结构形式。横梁间距3 m,系梁间距34 m。跨中段主梁高2.34 m,系梁尺寸为2 m×2.5 m;拱梁结合段处主梁高3.34 m,系梁尺寸为3 m×4.8 m。系梁板厚为16~36 mm。

主拱呈提篮状,倾角16.928°,矢高46 m,矢跨比1/4.63,拱轴线为1.7次抛物线。主拱采用六边形断面,拱肋高度从拱顶3.5 m线性增加到拱脚处5 m,宽度保持3 m不变,板厚为32~48 mm。

拱上及梁上的吊杆间距分别为4.5、6.0 m。

副拱作为装饰构造支撑在与系梁相连的78对挑臂上,其断面沿纵桥向采用“合—分—合”的变化形式,既增加了视觉灵动性,又降低了风阻影响。

3.2 合理拱轴线与经济性分析

3.2.1 合理拱轴线^[11]与景观拱轴线受力分析

3.2.1.1 作用及其取值

采用MIDAS Civil 2023建立主桥计算模型。主拱拱轴线分别采用1.7次、2次抛物线(对应景观拱轴线+斜吊杆、合理拱轴线+直吊杆);考虑结构自重、活载、温度及风荷载等作用(对应景观拱轴线的作用及其取值见表1),不同拱轴线的作用取值均保持一致(自重除外)。基本组合系数为:1.2恒载+1.4活载+1.4×0.75温度/人群/风等。

3.2.1.2 拱肋、系梁的弯矩和轴力

2种拱轴线对应的拱肋和系梁弯矩见图3、图4。比较图3、图4可知:

(1)景观拱轴线与合理拱轴线的拱肋弯矩沿轴线分布的趋势明显不同,前者呈波浪形分布,弯矩最大值在拱顶到1/4拱之间,为74 328 kN·m;后者拱肋

表 1 作用及其取值

作用类型	取值
自重/t	8 889
二期(含铺装/栏杆/管线/绿化等)/(kN·m ⁻¹)	102
车辆	城 A,双向 6 车道,考虑偏载;人群荷载取 6 kN/m;影响线加载
温度荷载	体系升温 34.2℃;体系降温-30.8℃;梯度温度参考 BS5400 规范;另考虑拱肋与主梁间±10℃温差
风荷载	考虑与车辆组合取 25 m/s;不与车辆组合取 37.8 m/s
相邻联作用在牛腿上的支反力	西侧恒载合力 12 600 kN,活载合力 7 700 kN;东侧恒载合力 7 920 kN,活载合力 5 390 kN

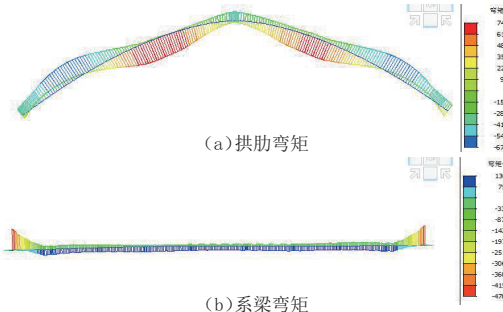


图 3 景观拱轴线(1.7次抛物线)对应的拱肋和系梁弯矩图

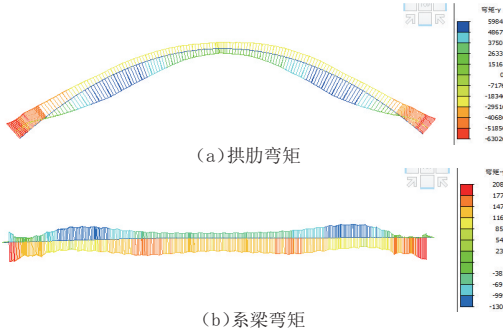


图 4 合理拱轴线(2次抛物线)对应的拱肋和系梁弯矩图
弯矩较为均匀,最大值在拱脚,为 67 658 kN·m。从弯矩最大值来看,合理拱轴线的拱肋弯矩比景观拱轴线少了约 9%。

(2)2种拱轴线对应的系梁最大弯矩均集中在梁端,除去端部外,系梁弯矩分布均较为均匀。对应景观拱轴线的系梁最大弯矩为 16 290 kN·m(除去梁端);对应合理拱轴线的系梁最大弯矩为 20 883 kN·m,对跨中段系梁而言,采用合理拱轴线时系梁弯矩增加了约 25%。

2 种拱轴线对应的拱肋和系梁轴力见图 5、图 6。比较图 5、图 6 可知:

(1)2 种拱轴线对应的拱肋轴力均呈现出由拱顶向拱脚逐渐增大的规律,对应景观拱轴线和合理拱轴线的拱肋最大轴力分别为 67 658、59 697 kN,采用

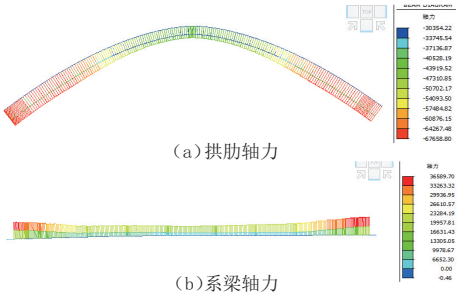


图 5 景观拱轴线(1.7次抛物线)对应的拱肋和系梁轴力图

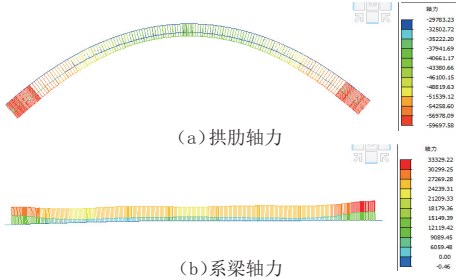


图 6 合理拱轴线(2次抛物线)对应的拱肋和系梁轴力图

合理拱轴线时拱肋轴力最大能降低约 12%。

(2)对应合理拱轴线的系梁轴力分布更均匀,梁端最大轴力为 33 329 kN,跨中最大轴力为 23 284 kN;对应景观拱轴线的系梁端部最大轴力为 36 589 kN,跨中最大轴力为 27 269 kN。采用合理拱轴线时系梁端部轴力降低约 9%,跨中轴力增加约 17%。

综上可知,拱轴线对结构内力分配影响较为明显。就新典桥主桥而言,采用合理拱轴线时拱肋内力呈减低趋势,系梁内力呈增加趋势(除去梁端 13 m 范围外)。主要原因在于:采用合理拱轴线时吊杆竖向分力与拱肋间夹角 $\theta \in (52^\circ \sim 90^\circ)$,采用景观拱轴线时吊杆竖向分力与拱肋间夹角 $(\theta + \beta) \in (61^\circ \sim 177^\circ)$ 。结合图 7 可知,对于垂直于拱肋的分力而言,对应合理拱轴线的值较景观拱轴线小,因此在拱肋中的弯矩对应减小;在吊杆力基本保持不变的情况下,拱肋越平坦,对应竖向刚度越弱,此消彼长,对应合理拱轴线的系梁内力会有所增加。

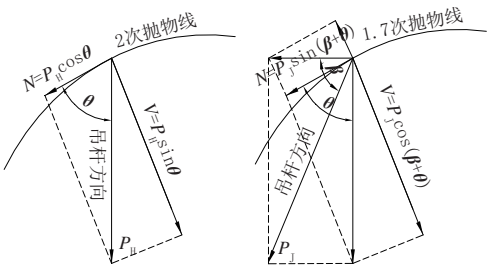


图 7 拱肋受力示意图

3.2.2 合理拱轴线与景观拱轴线用钢量对比

基于“恒载作用下吊杆力基本一致、系梁基本水平、基本组合下主拱与系梁应力差控制在 3% 以内”的原则,调整不同拱轴线的主拱及系梁板厚(其余构

件板厚均相同)。统计得到不同拱轴线的钢材用量,见表2。

表2 不同拱轴线钢材用量对比表				
序号	拱轴线	用钢量/t		
		拱肋	系梁	全桥
①	景观拱轴线(1.7次抛物线)	2 247.0	966.7	8 788.6
②	合理拱轴线(2次抛物线)	1 916.8	1 063.9	8 555.6
	②-①	-330.2	97.2	-233.0
	(②-①)/①/%	-14.69	10.06	-2.65

由表2可知:

(1)采用合理拱轴线后,拱肋的钢材用量较景观拱轴线降低了约15%,相反,系梁的钢材用量增加了约10%;

(2)从全桥钢材用量来看,采用合理拱轴线时钢材用量仅比采用景观拱轴线时少了2.65%。从经济性角度来看,是否采用合理拱轴线并非景观拱桥设计的决定性因素。

3.3 拱梁结合段构造设计及受力分析

3.3.1 合理的拱梁结合段构造设计

拱梁结合段主要板件三维示意图见图8。由图8可知,主拱在拱脚处与系梁固结。为确保有效传力,采取了以下措施:

- (1)在拱内增设1道纵向隔板以加强主拱与系梁间传力;
- (2)在系梁内对应主拱壁板及隔板处设置传力的纵横向隔板;
- (3)在主拱与系梁相交的锐角三角区域增设3道弧形三角板过渡,提高疲劳性能;
- (4)在支座范围内增设支承隔板及加劲板,确保支反力作用下板件的强度及稳定;
- (5)在主拱与系梁交会的封闭区域上方0.5 m高度内设置剪力钉,并沿拱肋壁厚方向浇筑1圈厚30 cm的超高性能混凝土UHPC,其余位置浇筑C30混凝土填实,以增强拱梁结合段整体性^[12]。

3.3.2 拱梁结合段受力分析

采用ABAQUS对拱梁结合段进行分析^[13-14],不考虑内部混凝土参与受力,并采用S4R四结点曲面壳单元模拟钢板。为确保拱梁结合段区域的受力分析精确性,依据圣维南原理,选取足够大的局部模型,以保证在模型边界处施加等效荷载时,不会对拱梁结合段的受力特性产生显著影响^[15]。

拱梁结合段mises应力云图见图9。由图9可知:

(1)整体来看,拱肋以弯压为主,系梁以弯拉为主,所关注区域内应力均在180 MPa以下,满足强度要求。

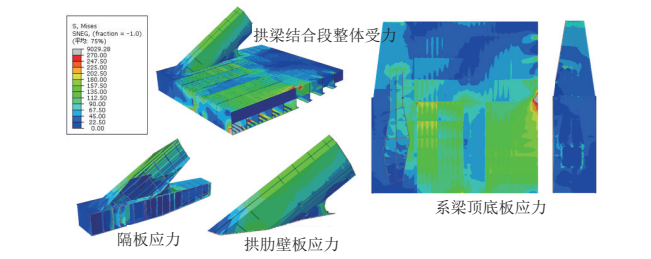


图9 拱梁结合段mises应力云图

(2)由于拱脚处拱肋承受弯矩,因此上壁板应力大于下壁板应力,拱肋壁板应力均在150 MPa以下,拱梁相交处的弧形三角板出现了应力集中现象,最大为170 MPa。

(3)拱梁结合段的系梁顶板应力在100 MPa以下,底板应力在80 MPa以下。

3.4 景观悬挑步道及副拱的设计

在主梁两侧设置景观悬挑步道及副拱,其总体布置见图10。景观悬挑步道及副拱的主要构造特点如下。

- (1)观景步道及副拱通过挑臂支撑在主梁上。
- (2)挑臂最大长度9.5 m,采用曲线变高的工字形断面,并通过设置“X”形钢拉杆增强面外稳定,提升人行舒适度。
- (3)副拱沿纵桥向采用“分-合-分”的镂空设计以降低风阻。此外,副拱不参与主桥整体受力,为降低温度效应,将其分成9段,标准长度为24 m。

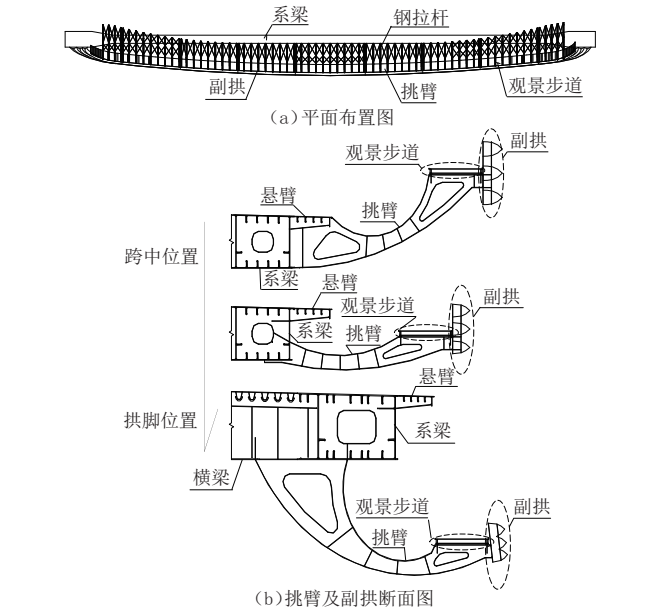


图10 景观悬挑步道及副拱总体布置图

4 施工方案与技术创新点

新典桥采用拱梁整体顶推施工方案及步履式顶推工艺,主要施工难点为:受限于施工期间奉化江通

航需求,最大顶推跨径达 70 m;主梁刚度弱、系梁在端部变宽又变高(系梁宽 2.5~4.8 m,梁高 2.34~3.34 m)。为克服以上困难所采取的措施包括:

(1)采用兼顾受力需求与施工效率的拱梁间支承体系。当拱肋拼装完成后,对拱梁间的拼装支架及连接节点进行加固,将其转换成顶推临时撑杆(见图 11)。这一措施既免除了拱梁临时支撑的工程量,节约了造价,又解决了主梁刚度弱的问题,显著改善了顶推时结构的受力。



图 11 拱梁间顶推临时撑杆布置图

(2)优化顶推设备布置,精细化系梁设计。通过在 70 m 大跨的临时墩处设置 2 组千斤顶协同顶进的方法,降低单点支承的反力,改善最不利顶推工况下主梁的受力;通过增设腹板竖向加劲肋的方式来确保施工期间主梁腹板的稳定。

(3)提出解决系梁变高、变宽的顶推措施。如图 12 所示,在千斤顶上设置 1 道横向分配梁,通过在分配梁上移动支垫来适应系梁变宽;在系梁梁高渐变段安装临时楔形块,将渐变主梁转化成突变主梁,并通过特殊的步履式顶推滑块装置来减少通过突变位置时抄垫的工程量。

通过以上施工措施及构造处理,新典桥主桥所采用的顶推施工方案突破了吨位重(总重约 1 万 t)、



(a) 横向分配梁

(b) 楔形块

图 12 顶推措施

主梁刚度弱、结构变宽又变高等技术难点,缩短了施工周期,节约了工程造价。

5 结 语

(1)新典桥主桥作为 1 跨过江的下承式钢箱系杆拱桥,以其独特的设计和施工技术,不仅满足了城市的交通需求,还成为了宁波城市景观的一部分。

(2)分析了新典桥主桥在构造设计、施工方案及耐久性等方面的关键技术特点,并探讨了拱轴线对景观桥梁经济性的影响,为今后同类桥梁的设计和施工提供了工程经验。

参考文献:

[1] 姜群. 城市景观拱桥的设计要点[J]. 四川建材, 2020(9): 56-57.
[2] 陈何峰, 赵炜. 宁波新典桥主桥设计[J]. 城市道桥与防洪, 2022(10): 76-80.
[3] 罗干生, 赵炜, 廖晓. 宁波新典桥施工方案研究与实践[J]. 城市道桥与防洪, 2022(6): 167-170.
[4] 陈涛, 王朝, 王吉. 宁波新典桥施工关键技术[J]. 工程技术, 2022(4): 88-90.
[5] 周光强, 向剑, 舒大勇, 等. 杭州九堡大桥多跨连续组合拱桥步履式整体顶推技术[J]. 施工技术, 2011, 40(9): 27-31.
[6] 徐荣胜. 杭州九堡大桥主桥钢拱梁整体顶推施工[J]. 城市道桥与防洪, 2010(2): 55-58.
[7] 武德智, 周盛, 胡元峰, 等. 跨航道钢箱系杆拱桥拱梁整体顶推施工工艺[J]. 城市道桥与防洪, 2022(9): 154-156; 165.
[8] 赵玺, 王佐才, 王均义, 等. 钢桥面铺装 ECO 改性聚氨酯混凝土耐久性能研究[J]. 工业建筑, 2018(10): 726-731; 735.
[9] 李小鹏. ECO 改性聚氨酯混凝土在钢箱梁桥面铺装施工中[J]. 中国储运, 2023(4): 144-145.
[10] 陈楚龙, 吴晓勤, 刘新华, 等. 大倾角钢箱提篮拱桥总体设计[J]. 世界桥梁, 2024(6): 13-18.
[11] 张国靖, 刘永健, 刘江. 下承式拱桥合理拱轴线的解析解与计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2022(5): 217-230.
[12] 刘蕾蕾, 余强, 邱毅, 等. 钢箱刚架系杆拱桥拱脚钢混结合段构造设计研究[J]. 公路交通技术, 2021(3): 78-83; 97.
[13] 黄世平. 大跨钢系杆拱桥拱脚节点受力及优化分析[J]. 西部交通科技, 2020(5): 92-94.
[14] 刘贺, 赵满. 基于 ABAQUS 的异形钢拱桥拱脚局部应力分析[J]. 四川建材, 2023(2): 143-144.
[15] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.