

非闭合上下弦组合受力钢桁拱桥传力机理和关键设计参数研究

叶志荣

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要: 以某座204 m跨径的非闭合上下弦组合受力钢桁拱桥为例,详细介绍该桥的总体设计和结构设计要点,研究了该类型拱桥纵向和横向传力机理,并阐明了矢跨比、断面尺寸、板厚及风撑布置等关键设计参数的选取原则。研究表明:对于非闭合上下弦组合受力钢桁拱桥,上、下弦拱肋主要承受压力,呈现出明显的桁架梁受力特征,随着矢跨比减小,上、下拱肋的压应力和系梁的拉应力逐渐增大;在结构设计中,可根据承载能力极限状态下,上、下弦拱肋和系梁控制断面所承担的轴向压力的相对关系确定其轴压刚度,进而进行断面尺寸及板厚的选取;风撑的布置数量及位置主要受横风荷载作用下的横向受力控制,类似项目在设计时可先对不同风撑布置形式下的横向受力进行计算,再对桥梁的横向稳定性进一步验算。研究结论可为同类桥型结构的设计提供参考。

关键词: 非闭合;组合受力;钢桁拱桥;传力机理;关键设计参数

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)06-0297-05

Research on Force Transmission Mechanism and Key Design Parameters of Non-closed Upper and Lower Chord Combined Force-bearing Steel Truss Arch Bridge

YE Zhirong

[Tongji University Architectural Design Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Taking a non-closed upper and lower chord combined force-bearing steel truss arch bridge with a span of 204 m as an example, the overall design and structural design essentials of the bridge are introduced in detail. The longitudinal and transverse force transmission mechanisms of this type of arch bridge are studied. And the selection principles of key design parameters such as rise to span ratio, section size, plate thickness and wind support arrangement are clarified. The research results show that for the non-closed upper and lower chord combined force-bearing steel truss arch bridges, the upper and lower chord arch ribs are mainly subjected to the compression, which present the obvious force-bearing characteristics of truss beam. As the rise to span ratio decreases, the compressive stress of the upper and lower arch ribs and the tensile stress of the tie beam gradually increase. In the structural design, the axial compression stiffness can be determined according to the relative relationship between the axial pressures borne by the upper and lower chord arch ribs and the control section of the tie beam in the ultimate bearing capacity state, and then the cross-sectional dimensions and plate thicknesses are selected. The number and location of wind braces are mainly controlled by the lateral forces under the action of crosswind loads. When designing the similar projects, the lateral forces under different wind brace arrangements can be calculated first, and then the lateral stability of the bridge can be further verified. The research conclusion can provide reference for the design of the similar bridge structure.

Keywords: non-closed; combined force-bearing; steel truss arch bridge; transmission mechanism; key design parameters

0 引言

城市跨河桥梁不仅需要满足通航和行洪的要

求,通常还需一跨过河;同时,作为城市的重要景观节点,桥梁的设计往往要求造型优美、结构新颖,并与城市形象、品位和精神相匹配,以满足城市地标建筑的形象要求^[1]。系杆拱桥为代表的梁拱组合体系桥梁,通过系杆平衡主拱推力,无须设置较大的抗推基础,且梁拱组合体系刚度大^[2],具有较大的单孔跨

收稿日期: 2024-11-29

作者简介: 叶志荣(1982—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

越能力,能够满足一跨过河的需求。在桥型方案的设计中,通过对拱肋断面、桥头堡等元素进行调整,可实现打造标志性景观桥梁的目标^[3],较好地匹配城市跨河桥梁的使用功能和景观需求。

某桥位于连接城市新建城区与老城历史文化街区的城市主干路上,跨越约400 m宽的城市河流。桥梁采用古典与现代结合的下承式钢桁架拱桥形式,如图1所示,寓意“融通今古”。桥梁一跨跨越主河道,主拱采用非闭合上下弦拱肋组成的钢桁架结构,上下弦通过X形腹杆相连,辅以弧形装饰结构,极具现代气息;在拱脚外侧对称设置了高耸的中式桥头堡,饱含古典韵味。二者在桥梁外立面上融为一体,以实现“长虹卧波,融贯古今”的建筑造型构思。



图1 某非闭合上下弦组合受力钢桁拱桥

在桥梁结构设计中,将钢桁拱设计成单跨X形腹杆空间桁架,采用非闭合上下弦组合受力拱肋,上弦拱肋与主梁不闭合连接,而连接于拱脚处的桥门架上,上、下弦拱肋组合的受力模式与传统飞燕式拱桥不同。为研究该非闭合上下弦组合受力钢桁拱桥的纵、横向传力机理及设计参数取值,本文以该桥为例,分析了该类型拱桥结构纵、横向的传力机理,并阐明了矢跨比、断面尺寸、板厚选取和风撑布置等关键设计参数的选取原则,可为同类桥型的结构设计提供参考。

1 工程概况

1.1 总体设计

根据桥梁建筑设计方案,桥梁主跨跨径为204 m,跨越城市河流主航道,如图2所示;桥梁标准断面宽度为47.5 m,设置为双向8车道和人非道,如图3所示。

桥梁结构采用非闭合上下弦组合受力钢桁简支拱桥,结构体系为刚性系杆刚性拱的梁拱组合体系。主拱通过X形腹杆将上、下拱肋相连,组成桁架结构。上、下拱肋在支点断面不闭合于主梁,两片拱肋通过支点处的桥门架与三道矩形空间桁架风撑横向

联结。主梁设置钢箱系梁作为刚性系杆,以平衡主拱推力。钢箱系梁内侧设置3根工字型小纵梁,与桥面系横梁、边支点箱型横梁组成纵、横梁受力体系;外侧采用悬臂支撑人非道。

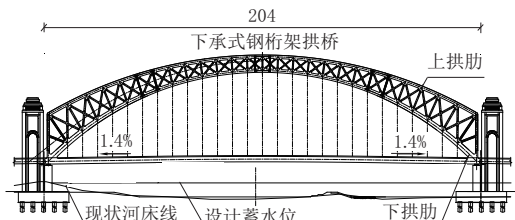


图2 桥梁立面布置(单位:m)

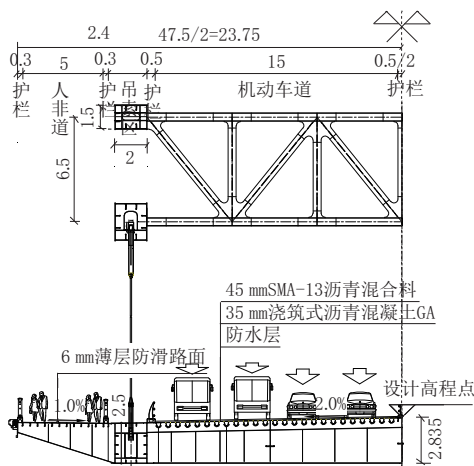


图3 桥梁横断面布置(单位:m)

1.2 结构设计

主拱上、下拱肋拱轴线为圆曲线。上、下拱肋矢高分别为48.5 m和42.0 m,拱肋矢跨比为1:4.5。上拱肋采用箱形等截面,断面尺寸为1.5 m(高)×2.0 m(宽);下拱肋采用箱形变截面,断面尺寸从拱顶处的1.5 m(高)×2.0 m(宽)渐变为拱脚处的2.5 m(高)×2.0 m(宽)。桥面系采用正交异性钢桥面板,桥面板板厚为16 mm,加劲肋采用U形加劲肋。拱顶桥面荷载由横梁传递到系梁上,系梁断面尺寸为2.5 m(高)×2.0 m(宽);系梁间的横梁间距为3.5 m,横梁采用工字形截面,断面高度由2.5~2.835 m。横梁间共设置三道小纵梁,纵梁截面采用工字形截面,截面高度为1.6 m;系梁采用钢箱形系梁,断面尺寸为2.5 m(高)×2 m(宽)。全桥共设置27对直吊杆,吊杆间距为7.0 m,吊杆型号为PES7-91、85。主桥基础承台为矩形承台,设置整体式群桩基础;桥头堡墩柱采用钢筋混凝土结构,桥面以上采用钢结构,主体结构外侧干挂石材进行装饰;主拱装饰采用外挑钢箱檐口、型钢包边等,与主拱相辅相成。

2 受力机理

2.1 纵向传力

为分析非闭合上下弦组合受力钢桁拱桥的受力机理,分别计算了上、下拱肋成桥状态下的轴力值、弯矩值,以及上、下拱肋的轴力值之和与其占比,如图4、图5所示。

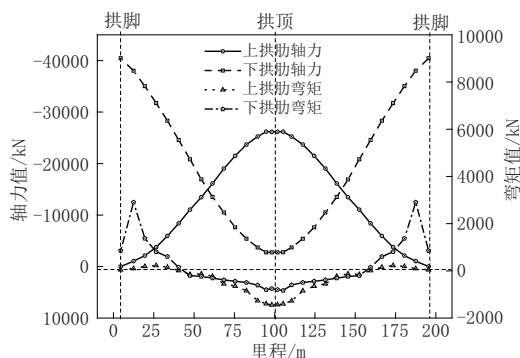


图4 上、下拱肋成桥状态轴力值和弯矩值

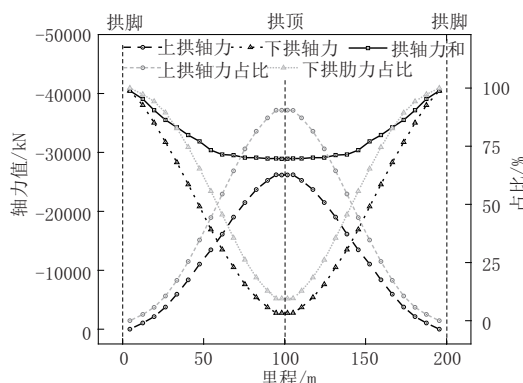


图5 上、下拱肋成桥状态轴力值之和与占比(单位:kN)

由图可知,上拱肋在成桥状态下的弯矩在227~ $-1\,445\text{ kN}\cdot\text{m}$ 之间,轴力在 $-1\,048\sim-26\,200\text{ kN}$ 之间,可见弯矩小,主要以轴心受压为主,且上拱肋在拱顶断面处压力最大,拱脚断面处压力最小,压力由拱顶断面向拱脚断面逐渐减小;下拱肋在成桥状态下的弯矩在 $-832\sim2\,907\text{ kN}\cdot\text{m}$ 之间,在拱脚附近断面处出现弯矩峰值,弯矩值较小,轴力在 $-2\,749\sim-40\,457\text{ kN}$ 之间,主要以轴心受压为主,且下拱肋在拱顶断面处压力最小,拱脚断面处压力最大,压力由拱顶断面向拱脚断面逐渐增大。拱顶断面处上拱肋承担的压力占比为90%,下拱肋占比为10%;拱脚断面处上拱肋承担的压力占比为2%,下拱肋占比为98%。

由计算结果可知,对于非闭合上下弦组合受力钢桁拱,由于上弦在拱脚处不闭合于主梁,导致拱脚断面处下拱肋承担全部压力,上拱肋退出承压;拱顶断面处上拱肋承担大部分压力,下拱肋部分参与受力;拱顶和拱脚之间由上、下拱肋组合受力。

非闭合上下弦组合受力钢桁拱呈现出明显的桁架梁受力特点。

2.2 横向传力

对于非闭合上下弦组合受力钢桁拱桥,在拱脚位置处上、下弦拱肋端部设置桥门架,桥门架的作用与钢桁梁桥中的桥门架作用类似,主要是提高结构抗扭和横向抗侧倾稳定能力。钢桁拱上、下弦在横向上可看作支承在桥门架上的横向受力体系。因此在钢拱的横向设置风撑,可有效增强桥梁结构的抗扭能力,提高钢桁拱的抗侧倾稳定安全系数,同时也能减小钢桁拱在横风荷载作用下的加载跨径。

3 设计参数分析

3.1 矢跨比

矢跨比 f 是影响拱桥结构受力的重要设计参数^[2-3]。系杆拱桥的合理拱轴线为二次抛物线,常用矢跨比为 $1/4\sim 1/6$ ^[3]。对于非闭合上下弦组合受力钢桁拱,拱顶断面处以上拱肋受压为主,拱脚断面处以下拱肋受压为主。

为分析非闭合上下弦组合受力钢桁拱的合理矢跨比,以矢跨比为研究对象,选取矢跨比分别为 $1/4$ 、 $1/4.5$ 、 $1/5$ 、 $1/5.5$ 、 $1/6$ 时,对上、下拱肋和系梁控制断面成桥状态和承载能力极限状态受力进行分析,计算结果如表1和图6所示。由表可知,随着矢跨比减小,上、下拱肋的压应力逐渐增大,且上拱肋压应力增大程度大于下拱肋,系梁的拉应力也逐渐增大。当矢跨比为 $1/4.5$ 时,上、下拱肋的压力分别为194、214 MPa,拱脚处系梁拉应力最大值为189 MPa,材料性能发挥充分,且有一定设计安全储备;而当矢跨比为 $1/5\sim 1/6$ 时承载能力极限状态应力水平大,偏向不安全。因此,该桥采用较大的矢跨比 $1/4.5$ 。

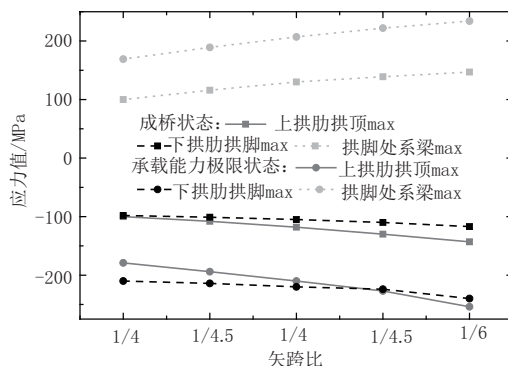


图6 不同矢跨比时上、下拱肋和系梁控制断面成桥状态和承载能力极限状态应力对比

3.2 拱梁刚度及断面尺寸

基于桥梁经济性考量,吊索区长度不宜过宽,本桥吊索区取 2.4 m ,系梁和上、下拱肋宽度则相应取 2.0 m 。结合横梁跨度和挑臂的长度,横梁梁高取

表1 不同矢跨比时上、下拱肋和系梁控制断面成桥状态和承载能力极限状态应力对比 单位:MPa

矢跨比	成桥状态应力			承载能力极限状态应力		
	上拱肋拱顶最大值	下拱肋拱脚最大值	拱脚处系梁最大值	上拱肋拱顶最大值	下拱肋拱脚最大值	拱脚处系梁最大值
1:4.0	-100	-98	100	-179	-210	169
1:4.5	-108	-101	116	-194	-214	189
1:5.0	-118	-105	130	-210	-220	207
1:5.5	-130	-110	139	-227	-224	222
1:6.0	-143	-117	147	-254	-240	234

2.5 m,横向受力较为适宜,系梁处梁高亦取 2.5 m。拱脚处系梁顶、底、腹板板厚均取 24 mm,如图 7 所示,由此确定系梁轴压刚度。

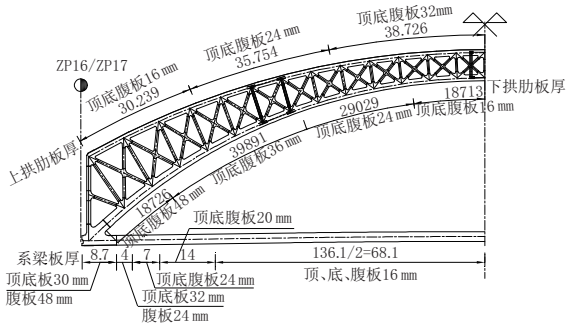


图7 上、下拱肋和系梁板厚选取

由于系梁以轴向受拉为主,承载能力极限状态下拱脚处系梁断面的轴力与下拱肋断面约为 1:2,因此在设计时两断面的轴压刚度之比宜取 0.5。拱脚处下拱肋断面尺寸取 2.5 m(高)×2.0 m(宽),且其轴压刚度为拱脚处系梁断面的 2 倍,可得其顶、底、腹板板厚取为 48 mm,此时二者轴压刚度比约为 0.51。考虑拱顶下拱肋断面的轴力较小,其断面尺寸从拱脚至拱顶渐变减小至 1.5 m(高)×2.0 m(宽),顶、底、腹板的板厚通过三次变厚减小至构造板厚 16 mm。

由于非闭合上下弦钢桁拱主要承受轴心压力,上拱肋拱顶断面与下拱肋拱脚断面为钢桁拱控制断面,承载能力极限状态的轴力之比约为 3:5,因此在设计时轴压刚度之比宜取 0.6。拱顶处上拱肋断面尺寸取 1.5 m(高)×2.0 m(宽),且其轴压刚度为拱脚处下拱肋断面的 0.6 倍,可得其顶、底、腹板板厚取为 32 mm,此时二者轴压刚度比约为 0.55。考虑拱脚处上拱肋断面的轴力较小,顶、底、腹板板厚通过二次变厚减小至构造板厚 16 mm,其断面尺寸保持不变。

表2 不同风撑布置形式下主拱成桥状态、横风荷载作用和承载能力极限状态应力对比 单位:MPa

形式	成桥状态应力					横风荷载作用应力				承载能力极限状态应力		
	上拱拱顶 最值	下拱拱 顶最大	上拱拱 脚最大	下拱拱脚 最大	上拱拱 顶最大	下拱拱顶 最大	上拱拱 脚最大	下拱拱脚 最大	上拱拱 顶最大	下拱拱顶 最大	上拱拱脚 最大	下拱拱脚 最大
二	-108	-35	-14	-99	-212	314	152	-225	-395	-390	-198	-383
三	-108	-39	-14	-101	-27	21	-39	64	-194	-90	-70	-214

3.3 风撑布置形式

风撑布置的关键是确定其构造、布置数量与位置。通过对不同风撑布置形式下的结构受力进行分析,确定合理的风撑布置形式,分析影响其布置的关键因素。

首先,考虑到主拱采用钢桁拱结构形式,风撑结构形式应与主拱统一、协调,因此以采用桁架式风撑结构为宜。综合考虑景观视觉效果和风撑刚度,桥梁两端门架采用平面桁架形式,桥梁中部风撑采用空间桁架形式。其次,分别分析在不设置风撑(布置形式一)、在 L/2 处设置 1 道风撑(布置形式二)、在 L/4、L/2 和 3L/4 处分别设置 3 道风撑(布置形式三)时的结构稳定性和主拱受力,计算结果如图 8、图 9 和表 2 所示。

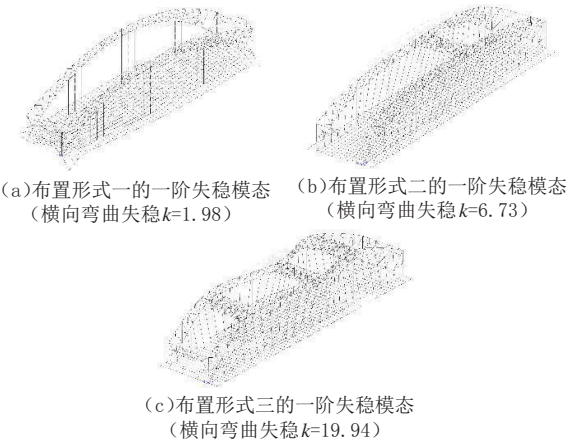


图8 不同风撑布置形式下结构失稳模态和稳定安全系数 k 对比

由图 8 可知,桥梁的稳定性由横向稳定控制,桥梁结构稳定安全系数随着风撑数量的增加而逐渐增大。不设置风撑时,桥梁横向抗扭刚度小,一阶失稳模态为横向扭转失稳,稳定安全系数为 1.98,不满足设计要求;在 L/2 处设置 1 道风撑时,一阶横向弯曲

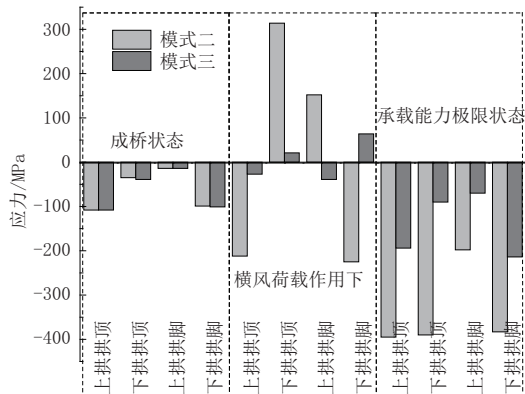


图9 不同风撑布置形式下的主拱成桥状态、横风荷载作用和承载能力

失稳稳定安全系数为6.73,虽尚能达到设计要求,但安全储备较低;在 $L/4$ 、 $L/2$ 和 $3L/4$ 处设置3道风撑时,一阶横向弯曲失稳稳定安全系数为19.94,桥梁具有较好的横向稳定性。

由于风撑布置形式一下的桥梁横向稳定性不能满足要求,表2仅列出了在风撑布置形式二与三下的主拱成桥状态、横风荷载作用和承载能力极限状态的应力对比。风撑布置形式二与三下的主拱成桥状态应力几乎一致,说明横向风撑的布置数量对钢桁拱上下弦纵向传力影响较小;但在横风荷载作用下,设置1道风撑与3道风撑下的主拱应力有显著差异。设置3道风撑时,主拱最大应力在 $-39\sim 64$ MPa之间;而在设置1道风撑时,主拱应力增大至 $-212\sim 314$ MPa。这是由于设置3道风撑时,主拱上、下拱肋在横风荷载作用下可近似看作四跨连续梁,加载跨径为 $L/4$;仅设置1道时,横向受力为两跨连续梁受力,横风加载跨径增大为 $L/2$,致使主拱应力大幅增加。正是由于横风荷载工况下的应力增加,风撑布置形式二下的主拱应力不能满足规范设计要求。

因此,对200 m跨径级别的钢桁拱桥,在 $L/4$ 、 $L/2$ 和 $3L/4$ 处设置3道风撑才能满足结构受力与稳定性的要求。横风荷载作用是影响风撑布置数量的首要

因素。在满足横向受力的前提下,可进一步对桥梁横向稳定性进行验算。

4 结 语

以某座204 m跨径的非闭合上下弦组合受力钢桁拱桥为例,研究了该类型拱桥纵、横向传力机理,对该桥型矢跨比、断面尺寸及板厚选取和风撑布置等关键设计参数进行了分析,得到了以下主要结论:

(1)对于非闭合上下弦组合受力钢桁拱桥,上、下弦拱肋受力以受压为主,呈现明显出桁架梁受力特点;

(2)随着矢跨比减小,上、下拱肋压应力和系梁拉应力逐渐增大,根据上、下弦拱肋和系梁控制断面应力计算结果,本桥采用1:4.5矢跨比;

(3)可根据承载能力极限状态里上、下弦拱肋和系梁控制断面所承担轴向压力的相对关系确定其轴压刚度,并据此进行断面尺寸及板厚的选取;

(4)风撑布置数量及位置主要受横风荷载作用下的横向受力控制,类似项目设计时可先对不同风撑布置形式下的横向受力进行计算,再对桥梁横向稳定性进一步验算;对于200 m跨径级别的钢桁拱桥,在 $L/4$ 、 $L/2$ 和 $3L/4$ 处设置3道风撑才能满足结构受力与稳定性的要求。

参考文献:

- [1] 徐利平.谈城市景观桥梁[C]//第二十一届全国桥梁学术会议论文集.北京:人民交通出版社,2014.
- [2] 李映.拱梁组合体系桥梁的拱梁相对刚度分析[J].桥梁建设,2008(1):50-53.
- [3] 刘鹏.拱梁组合体系桥梁的拱梁相对刚度分析[J].城市道桥与防洪,2022(8):68-71.
- [4] 易伦雄.南京大胜关长江大桥大跨度钢桁拱桥设计研究[J].桥梁建设,2009(5):1-5.
- [5] 张文华.东平水道特大桥(85+286+85)m双拱肋钢桁拱设计[J].铁道标准设计,2015(12):40-44.

《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:roadbridgeflood@163.com

