

大跨度钢桁拱桥设计关键技术

孙亮

(中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 柳州市白露大桥为主跨 288 m 的连续钢桁拱桥, 采用两片主桁, 主桁中心距为 37 m。针对边跨桁梁桁高矮、横向宽度大的特点, 将腹杆设计为变截面, 通过减小其线刚度并增大截面面积的方法以消除横向框架效应产生的不利影响。平联采用较为简洁的菱形桁式, 兼顾结构的受力合理性和美观性。桥面采用密横梁体系的正交异性整体桥面板, 使桥面板参与主桁共同作用的同时避免了横梁面外弯曲。为改善结构气动性能, 降低风致振动的影响, 采用柔性吊杆。边跨平弦钢桁梁采用支架法半悬臂施工, 中跨拱圈采用以临时墩辅助拱上吊机悬臂架设的施工方案, 桥面系随主桁同步架设。

关键词: 桥梁工程; 钢桁拱桥; 大间距主桁; 密横梁整体桥面; 柔性吊杆; 悬臂施工

中图分类号: U448.22+4

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)04-0061-04

1 概述

白露大桥是柳州市北外环路跨越柳江的过江通道, 桥位河段河槽顺直, 岸线稳定, 水文、地质条件均较好, 具备良好的建桥条件。桥址区柳江河道宽约 560 m, 水面宽约 500 m, 水下河床断面较为平缓, 下伏基岩主要为白云岩, 埋深 1.1 ~ 64 m, 单轴抗压强度 60 MPa, 地质构造较为稳定。

大桥设置双向八车道, 道路等级为城市快速路, 设计车速为 80 km/h, 设计活载为城—A 级汽车荷载, 桥下通航等级为Ⅲ(3)级, 双向通航孔净宽 110 m, 净高 10 m。

2 桥型方案与总体布置

白露大桥建设前, 柳州已建成的具有代表性的桥梁跨度多在 100 ~ 150 m 左右, 根据通航技术要求专题论证成果, 主桥采用单孔单向通航时, 跨度应在 100 m 左右, 采用单孔双向通航时, 跨度应在 200 m 左右, 同时, 由于桥位处于饮用水水源保护区范围, 根据大桥建设的环境影响评价, 江中不宜布置过多的桥墩以避免水下基础施工时对水源造成污染。结合通航、环保、水利主管部门的意见, 并综合考虑工程造价、景观效果等各方面因素, 经多方案比选, 最终确定采用 3 跨连续钢桁拱—桁梁组合结构体系, 孔跨布置为 108 m+288 m+108 m = 504 m, 边中跨

比为 0.375, 符合连续钢桁梁桥的受力特点。边跨钢桁梁与中跨刚性拱柔性梁形式的钢桁拱平顺连接, 线形流畅优美, 主桥立面布置见图 1。

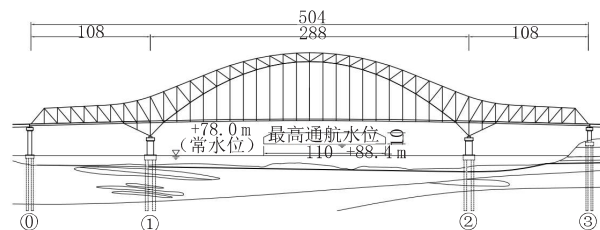


图1 主桥立面布置(单位:m)

3 结构布置

3.1 主桁结构

中跨拱圈采用变高度桁架形式, 拱圈桁架上弦与边跨钢桁梁上弦以反向圆曲线平顺连接, 形成 3 跨连续钢桁拱结构^[1]。拱圈矢高 67 m, 矢跨比 1/4.3, 采用变高度“N”形桁式, 跨中处桁高为 8 m, 2 个主墩支点处拱脚设有下加劲弦, 桁高为 35.45 m。为承受拱圈产生的水平推力, 在拱圈桁架的两拱脚间设有系杆, 拱圈与系杆之间通过柔性吊杆连接。变高度的拱圈桁架, 符合悬臂安装施工中结构的受力要求, 在成桥运营状态, 钢桁拱依靠拱圈与系杆结构共同受力, 具有较大的竖向抗弯能力与较好的竖向刚度。边跨钢桁梁主桁也采用变高形式, 梁端桁高为 13 m, 上弦以 5% 的坡度往中跨方向变高, 与拱圈桁架一样采用“N”形桁式, 节间距为 12 m。

桥面设置有双向八车道和双侧人行道, 车行道标准横断面宽度达 35 m, 为避免过多的杆件对桥面行

收稿日期: 2020-08-25

作者简介: 孙亮(1977—), 男, 学士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

驶观感造成较大的影响,采用了2片主桁的结构形式,主桁中心距37 m,人行道置于主桁外侧,桥面全宽43.5 m。

3.2 联结系

拱圈上下弦杆平面、边跨桁梁上弦杆平面、拱脚下加劲弦杆平面均设置纵向联结系,保证截面的整体性与拱圈的稳定^[2]。竖杆平面内每隔一个节间设置一道横向联结系,增加截面的抗扭转刚度,梁端斜杆平面及主墩处竖杆平面内设置桥门架。联结系形式力求简洁,纵向联结系采用菱形桁式,横向联结系采用三角形桁式(见图2)。



图2 联结系布置

3.3 桥面结构

公路桥面置于下弦平面,采用密横梁体系的正交异性整体桥面板,除在主桁节点处设置节点横梁外,每个节间中还设置3道节间横梁。横梁均采用工字形截面的鱼腹式变高梁,桥梁中心线处梁高为2.645 m,顶板为16 mm厚的整体钢桥面板,与主桁下弦杆(或系杆)的上水平板伸出缘对接焊连接,腹板、底板与主桁下弦杆(或系杆)上的接头采用高强度螺栓连接,见图3。

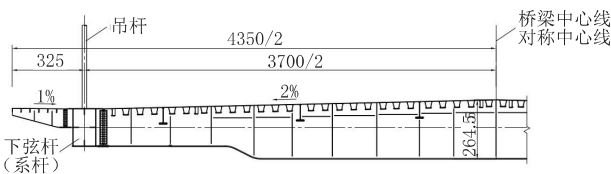


图3 桥面结构横断面布置(单位:cm)

4 设计关键技术

4.1 拱圈矢跨比的选取

拱圈的矢跨比不仅关系到拱桥的受力状况,还影响其线形的协调、美观程度,因此,合理地选取矢跨比是设计的关键^[3]。国内外已建成的钢桁拱桥矢跨比多在1/5~1/4,例如南京大胜关长江大桥为1/4、重庆朝天门大桥为1/4.3、悉尼港湾大桥为1/4.7、万州长江铁路大桥为1/4.8。为了选取合适的矢跨比,针对288 m的拱圈跨度分析了采用不同矢高时主桥的受力状态和材料用量指标,见表1。

表1 综合数据比较表

矢高 矢跨比	$f=57\text{ m}$ 1/5.05	$f=62\text{ m}$ 1/4.65	$f=67\text{ m}$ 1/4.30	$f=72\text{ m}$ 1/4.00
拱顶处最大弯矩 /kN·m	8 127	7 245	6 380	5 469
拱脚处最大轴力 /kN	91 750	94 372	96 178	99 782
系杆拉力 /kN	38 346	37 220	36 475	35 557
拱顶恒载位移 /cm	56	44	34	25
总用钢量 /t	16 201	16 184	16 172	16 453

从表1可知,随着矢跨比的增大,拱顶弯矩和系杆拉力逐步减小,拱脚轴力和拱圈刚度逐步增大,符合拱桥的受力特征。受各部位构件内力状况的综合影响,全桥用钢量总体变化不大,当矢跨比为1/4.3时达到相对较小值,结合桥梁整体线形的视觉美观效果,选取拱圈矢跨比为1/4.3。

4.2 大间距主桁的空间桁架结构

对于桥面宽度较大的桁架结构,设计时多采用3片主桁以减小横向受力构件的跨度和截面尺寸,但更多地考虑到城市桥梁的景观因素,本桥仍采用了2片主桁,由此对结构和构件造成的影响主要有以下两点:

(1)桥面横向受力构件跨度大,截面尺寸大。

桥面横梁跨度与主桁间距相同,为37 m,在恒载与横向8车道车辆荷载的组合作用下,跨中弯矩达15 633 kN·m,根据受力特性将其设计为鱼腹式结构,跨中截面高2.645 m,在距两端支点各约1/5跨处截面高度渐变至1.7 m,与主桁下弦杆(或系杆)截面等高,便于与之连接,同时,横梁下翼缘宽度也由跨中的760 mm渐变为支点附近的500 mm。

较大的横向宽度也为桥面系的运输和安装带来不便,为解决这一问题,将每个节间的桥面板在距节点横梁中心线1 m处断开,并在横向分为3段(含节间横梁),工地安装时将桥面板纵向与节点横梁上翼缘板对接焊,横向与主桁下弦杆(或系杆)的上水平板伸出缘以及相邻的桥面板对接焊,节间横梁的腹板和下翼缘板通过高强螺栓与主桁下弦杆(或系杆)上的横梁接头连接,桥面板划分及安装示意图4。



图4 桥面板划分及安装示意

(2)边跨桁梁的横向框架效应明显。

由边跨主桁腹杆、桥面横梁、平联横撑形成的横向框架结构高 13 m、宽 37 m,尽管鱼腹式横梁较小的杆端截面可一定程度上减小横梁与腹杆连接处的节点刚性,但由于横向框架较大的宽高比和腹杆线刚度,在桥面竖向荷载的作用下,腹杆除承受轴向力外还需承担由节点刚性引起的较大的杆端弯矩。此时若通过增大截面来提高腹杆的抗弯刚度,则会导致杆端弯矩进一步增大,甚至可能出现杆端弯矩的增长率超过截面抗弯刚度增长率的情形,造成材料浪费或使腹杆截面设计陷入恶性循环。为解决这一问题,从降低节点固端弯矩的思路出发,将主桁腹杆设计为变截面,减小腹杆在节点板以外部分的翼缘板宽度,通过降低其线刚度,达到减小弯曲应力的目的,同时还在腹杆中性轴附近增设肋板,适当增加截面积,减小其轴向应力,使其组合应力进一步减小。

4.3 平联形式的选取

平联杆件与主桁弦杆一起组成纵向平面桁架传递横向风力,为了不使主桁弦杆因横向风力的作用而产生主桁面外方向的弯矩,通常需在每个主桁节点处连续布置平联杆件,但考虑到较多的杆件会降低桥面通透感,影响桥梁的景观效果,在选取平联形式时结合结构的受力特性和美观程度,分别对连续布置的交叉形、连续布置的菱形和间断布置的“K”形等三种平联形式进行了分析,三种平联结构形式见图 5。

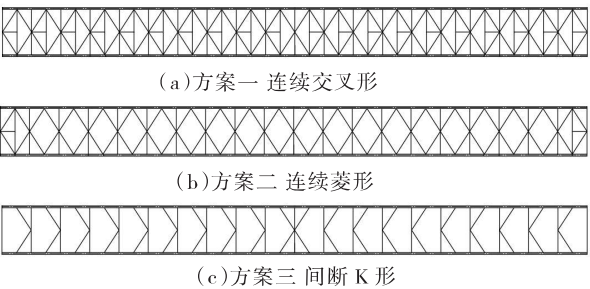


图 5 平联结构形式

方案一平联杆件连续交叉布置,并且为了减小横撑的自由长度,在横撑中部至斜撑交叉节点处还设置了短撑杆,结构刚度大,可将横向风力更直接地传递给桥门架,但杆件密集繁杂,美观程度较差。方案二在方案一的基础上取消了一半的横撑并取消了除端部以外的所有短撑杆,布置形式相对简洁,但同时由于平联刚度的降低,使弦杆需承受更多的风力。方案三 K 形平联间断布置,杆件数量少,形式简洁美观,但由于平联杆件不能与主桁弦杆一起组成

桁架结构,需通过弦杆侧向受弯将风力传递至桥门架。

计算表明,在横向风荷载作用下,方案一拱圈跨中侧向位移为 84 mm,拱脚处弦杆应力为 32 MPa;方案二拱圈跨中侧向位移为 95 mm,拱脚处弦杆应力为 58 MPa;方案三拱圈跨中最大侧向位移为 209 mm,拱脚处弦杆应力为 144 MPa,运营状态下拱肋弦杆杆件最大压应力超出材料设计强度较多,需加大截面尺寸。与方案一相比,采用方案二需加大部分主桁杆件板厚,总用钢量需增加约 300 t,若采用方案三,则需加大拱肋主桁杆件截面尺寸,并增加总用钢量约 1 300 t,综合考虑桥面景观效果和结构经济性后确定采用方案二——菱形平联。

4.4 密横梁形式的整体桥面结构

传统的钢桁桥梁公路正交异性桥面板结构多采用纵横梁结构体系^[4],由纵肋和横肋双向加劲的钢桥面板将桥面荷载通过纵梁传递至节点横梁,并由节点横梁传递至主桁节点。桥面荷载转换为主桁的节点荷载,除节点刚性引起的次弯矩外,主桁杆件以受轴向力为主,符合桁架结构的受力特性。但由于桥面系参与主桁共同作用的影响,会使纵梁产生轴力并引起横梁产生面外弯曲,随着桥梁跨度的增大,这种共同作用的效应更为明显,横梁的面外弯曲应力已成为设计的控制因素之一。

为解决这一问题,桥面系采用了密横梁形式的正交异性整体桥面板,取消纵梁后桥面荷载直接由横梁传递至主桁节点以及弦杆上,这样虽然使弦杆产生了节间弯矩,但采用密横梁减小了横梁间距,可有效降低节点横梁截面高度,同时,桥面系仍然参与主桁共同作用,分担主桁轴力(见图 6)。



图 6 密横梁形式的整体桥面板

4.5 吊杆形式选择

钢桁拱桥吊杆的风致振动影响到桥梁的安全性和舒适性,而吊杆的形式又是影响其风致振动的重要因素之一^[5],为了确保结构抗风安全,针对吊杆形式开展了理论分析研究。

吊杆按其材料可分为刚性吊杆和柔性吊杆。刚

性吊杆一般采用H形截面或带倒角的箱形截面钢拉杆,安装方便、易于维护。H形截面吊杆因其自振频率较低且外形气动性能较差,易产生涡振和驰振,通过增加风嘴或在翼板、腹板上开孔等方式可在一定程度上予以改善;箱形截面吊杆由于增加了截面刚度,提高了吊杆的自振频率,同时截面倒角优化了吊杆的气动外形,从而可提高振动发生的风速。柔性吊杆一般采用平行钢丝或钢绞线拉索,具备较好的耐疲劳性能,其圆形截面具有较好的气动性能,同时可在确保吊杆安全系数满足规范要求的前提下,尽量选择截面较小的拉索,使吊杆始终处于紧绷状态,可进一步减小吊杆风振振幅,提高发振风速。

从吊杆的气动性能、振幅大小、疲劳性能、安装维护便利性等方面进行比选,最终确定采用综合性能较优的柔性吊杆^[6]。吊杆选用标准抗拉强度为1 860 MPa的整束挤压钢绞线拉索,桥梁运营至今,尚未监测到明显的涡振、驰振等风致振动现象,使用效果良好。

4.6 施工方案

对于主跨为桁拱、边跨为桁梁的连续钢桁拱—梁组合体系桥梁,通常边跨采用支架法架设,主跨采用斜拉扣挂悬臂架设,通过调整吊索塔架的拉索索力来控制结构的内力和变形,从而实现拱圈的安装和合龙。该方法施工操作相对简单,但吊索塔架自身结构高度较大,需采用大吨位的塔吊,安装较为困难,同时还需占用拱圈的架设时间。考虑到桥位段江面行驶船舶少且吨位小这一有利条件,提出并制定了以临时墩辅助拱上爬行吊机悬臂架设中跨拱圈的施工方案(见图7),省去了吊索塔架的定制、安装工期^[7]。

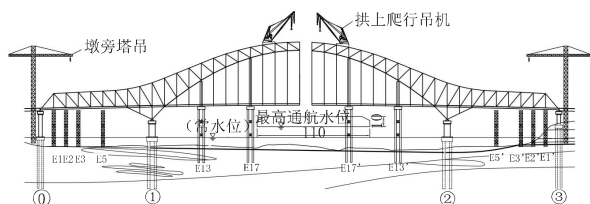


图7 施工方案示意

边跨钢桁梁采用支架法半悬臂架设的常规施工方案,分别在E1、E2、E3、E5节点处设置临时支墩,从边墩向跨中方向逐段架设直至主墩,架设过程中

逐步施加和调整压重,以保证梁体的抗倾覆稳定性。

边跨钢梁架设完成后,利用拱上爬行吊机继续向跨中悬臂拼装中跨桁拱,根据墩顶部位杆件的受力状况,在E13、E17节点处设置临时墩,考虑到架设过程中因结构自重引起的钢梁整体偏移量,纵向活动支座侧的E13、E17临时墩位置分别向跨中偏移了0.6 m和0.3 m,固定支座侧的临时墩仍按理论位置布置。

整个施工过程中,桥面系均随主桁杆件同步架设,合龙时,借助于前期钢桁拱架设的仰角姿态,并通过调整支点高程以及利用支点处的纵横移设备实现无应力合龙,顺序为先合龙拱圈再合龙系杆和桥面。

5 结 语

柳州白露大桥主桥采用主跨288 m的连续钢桁拱结构,桥面宽度43.5 m,主桁中心距37 m,是国内主桁间距最大的公路钢桁拱桥。依据大桥的工程技术特点,对主桁腹杆进行变截面处理,解决了边跨平弦桁梁横向矮宽框架效应造成的节点固端弯矩大的问题;通过进行分析、比选,在结构受力和美观之间寻找平衡点,优化了平联的结构形式;兼顾结构受力和构造的合理性,采用了密横梁形式的整体桥面结构;中跨拱圈采用以临时墩辅助拱上吊机悬臂架设的施工方案,施工便捷顺利,有效节省了工期,取得了良好的预期效果。

参考文献:

- [1] 胡涛,易伦雄.柳州市维义大桥主桥设计与施工[J].桥梁建设,2010(5):39-42.
- [2] 易伦雄.大胜关长江大桥工程特点与关键技术[J].钢结构,2007,22(5):78-80.
- [3] 任巍峰.浅谈横琴二桥钢桁拱矢跨比的选取[J].交通科技,2016,276(3):45-46.
- [4] 胡辉跃,刘俊峰,宁伯伟.三门峡黄河公铁两用大桥主桥钢桁结合梁设计[J].桥梁建设,2018,48(2):83-88.
- [5] 高宗余,李龙安,方秦汉,等.钢桁拱桥吊杆风致振动研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2007,31(2):281-284.
- [6] 付祖良,周建林,王晓媚.济宁市南二环路京杭大运河连续钢桁拱桥设计[J].城市道桥与防洪,2015(5):76-80.
- [7] 王晓敬.临时支墩在大跨度钢桁拱桥梁架设中的应用[J].铁道工程学报,2013,174(3):38-44.