

中承式景观拱桥总体设计及优化

陈炫佑

(广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510507)

摘要: 以中山市长洲大桥工程为背景, 系统性地介绍中承式景观拱桥的总体布置、景观设计、关键节点构造, 并对结构体系、矢跨比、拱肋内倾角、预拉力等关键技术参数的进行分析和优化。研究结果表明: 矢跨比越大, 拱脚水平推力越小, 对结构越有利; 拱肋内倾角的变化对稳定系数影响较小; 拱桥采用部分推力体系, 设置合理的系杆预拉力, 可以有效降低拱脚水平推力, 减少下部结构的规模; 通过结构的优化调整, 可以达到力与美的平衡。

关键词: 中承式景观拱桥; 结构体系; 矢跨比; 拱肋内倾角; 预拉力

中图分类号: U448.22; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)12-0083-06

Overall Design and Optimization of Half-through Landscape Arch Bridge

CHEN Xuanyou

(Guangdong Communication Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou 510507, China)

Abstract: Taking the Zhongshan Changzhou Bridge Project as the background, the overall layout, landscape and key node construction of a half-through landscape arch bridge are systematically introduced. And the key technical parameters of structural system, rise span ratio, arch rib inclination angle and pretension force are analyzed and optimized. The research result shows that the larger the rise span ratio is, the smaller the horizontal thrust at the arch foot will be, which is more beneficial to the structure. The variations in the arch rib inclination angle has a relatively small influence on the stability coefficient. The arch bridge is used with the partial thrust system. The reasonable setting of tie bar pretension force can effectively reduce the horizontal thrust at the arch foot and decrease the scale of substructure. The optimization and adjustment of structure can achieve a balance between strength and beauty.

Keywords: half-through landscape arch bridge; structural system; rise span ratio; inclination angle of arch rib; pretension force

0 引言

城市桥梁长期存在于大众生活环境中, 对于景观效果有较高要求, 既需要融入周边环境, 满足大众的审美要求, 还要注重结构的安全经济。拱桥是一种天然具有建筑美感的结构形式, 既能令人赏心悦目又能兼顾其结构功能。在城市桥梁的设计中, 拱桥方案通过不断地变化、组合与创新, 被赋予了美学与力学的统一可能性, 成为城市景观桥梁的重要结构形式。

20世纪80年代, 西班牙建筑师Santiago Calatrava成功设计了第一座斜靠式拱桥: Bacde Roda Bridge^[1], 是对拱桥景观造型追求的经典之作。随后这结构体系被广泛运用在国内的城市桥梁中, 如江

苏昆山玉峰桥、浙江义乌丹溪桥、江阴市杏春桥^[2]。蝴蝶拱最早出现在英国Bedford城, 我国也相继建设了中山长江大桥、南宁大桥等一大批蝴蝶拱桥。邓文中^[3]院士在蝴蝶拱的基础上, 进一步通过不对称的拱肋设计了大沽桥, 成为驰名中外的天津名片“日月桥”。

唐云等^[4]对提出了景观桥梁设计要与环境融合, 并在安全性和稳定性上创新的设计思路; 杨乐杰等^[5]提出了兼具景观与实用效果的连续梁与中承式组合系杆拱桥体系, 降低了拱轴内力, 提高了稳定性; 张庆明等^[6]认为提篮拱的拱肋侧倾角的取值应综合考虑拱的横向稳定性和极限承载能力; 米曦亮等^[7]认为拱轴系数对拱脚水平推力影响很小, 系杆力与基础形式是影响内力和位移的主要因素; 吴海军^[8]认为在内倾角 20° 的范围内, 提篮拱的稳定性随着内倾角的增大而增加。刘蕾蕾^[9]通过将预应力、剪力钉和开孔钢板、承压钢板等合理组合搭配, 作为

收稿日期: 2025-04-10

作者简介: 陈炫佑(1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。

钢箱拱与拱座之间的理想连接形式,明显改善拱脚应力集中;吴用贤^[10]对“拱穿梁”和“梁穿拱”两种拱梁固结节点方案进行分析,认为拱穿梁方案有利于保证拱肋传力体系的连续性和完整性。

综上,当前国内外学者对城市景观拱桥有大量的设计实践,但是对设计过程的梳理总结以及关键设计参数的系统性研究较少。本文以中山市长洲大桥为例,介绍其总体布置、景观设计、关键节点构造,并就结构体系、矢跨比、拱肋内倾角及预拉力等关键技术参数展开研究和优化。

1 工程概况

长洲大街延长段工程为按双向4车道设计的城市次干路,设计速度为40 km/h,位于中山市西区马山片区,南起长洲路与光明路西段交叉口,北至康欣路与翠虹路交叉口,全长约1.5 km。其中,长洲大桥是控制性节点工程,受通航要求及两侧用地规划限制,考虑一跨跨越狮涠河的方案,主桥采用中承式系杆拱桥体系,跨径布置为(35+100+35)m。考虑到桥梁总体造型和景观层次,车行道和慢行道的不同接线要求,将车行道和慢行道分开布置。车行道桥面宽21.5 m,横断面布置为:2.5 m(吊杆区)+0.5 m(防撞护栏)+7.5 m(车行道)+0.5 m(分隔带)+7.5 m(车行道)+0.5 m(防撞护栏)+2.5 m(吊杆区)=21.5 m。慢行道宽4.35 m,净宽3.6 m。图1所示为长洲大桥效果图。

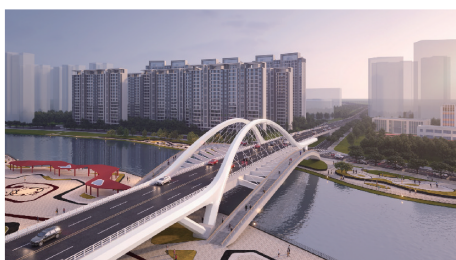


图1 长洲大桥效果图

2 主桥设计

2.1 总体布置

狮涠河通航技术等级为限制性Ⅶ级航道,根据《内河通航标准》(GB 50139—2014),采用双向通航孔,通航净宽需不小于41 m,净高大于4.5 m。

考虑到狮涠河两侧河漫滩为规划亲水公园,应避免过多侵占其空间,并且满足河道通航、防洪的要求,主桥采用(35+100+35)m的跨径组合是合理的。立面布置见图2。

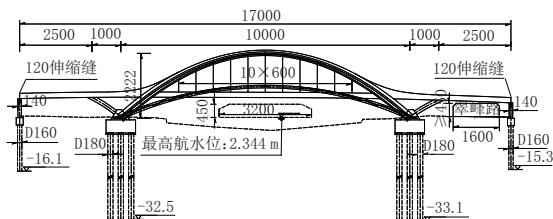


图2 长洲大桥立面布置图(单位:cm)

2.2 景观设计

两片主拱肋采用内倾式设计,但取消设置风撑,既保留了常规提篮拱行车视野的渐变性,又避免了风撑带来的压抑感。两侧慢行道通过主梁外侧挑梁、吊杆共同支撑,实现与车行道分离外飘。慢行道平面及立面整体均呈拱状,其中跨中处慢行道高于主桥桥面,是良好的观景平台,同时与主拱肋相映成趣,形成视觉冲击与美感。

为了实现长洲大桥与两岸滨河景观带的有机融合,两片流线型拱肋与慢行道直接伸入亲水公园内,增强了桥梁与滨河景观带的联系与互动性,实现了美学与力学的结合与统一。

2.3 主拱设计

拱肋计算跨径为100 m(含桥面以下拱脚段)。拱肋平面由铅垂面绕拱脚连线向内侧旋转 16° 形成。拱轴线在其自身平面内为二次抛物线,矢高为23.0946 m,矢跨比1/4.33;投影到铅垂面上的名义矢高为22.2 m,名义矢跨比为1/4.5。主拱与主梁相交处为拱梁固结,拱脚通过拱座与承台相连。

主拱为钢箱拱,截面为五边形,拱顶箱高1.5 m,宽1.89 m,拱脚箱高2.5 m,宽2.45 m(见图3)。桥面以上拱肋壁板厚度为25、30 mm,纵向加劲肋高度为200 mm、厚度为20 mm;桥面以下拱脚壁板厚度为45 mm,纵向加劲肋高度为280 mm、厚度为32 mm;拱梁结合段壁板厚度为35 mm,纵向加劲肋高度为240 mm、厚度为24 mm。节段内普通隔板厚度为20 mm,吊点隔板厚度为40 mm。为了保证连接效果,吊点横隔板采用熔透焊与主拱连接,其余普通隔板则采用角焊缝连接。

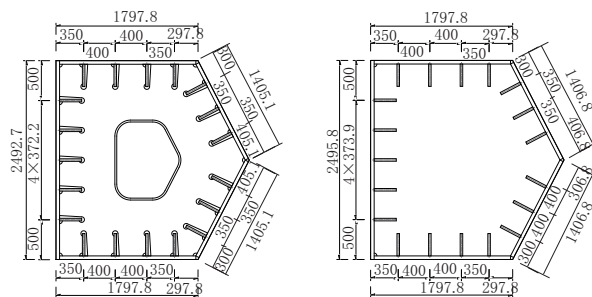


图3 主拱横断面图(单位:mm)

2.4 主梁设计

主梁采用双边钢箱梁,主梁外边缘梁高 1.8 m,中心处梁高 2.015 m,梁顶宽 21.5 m(见图 4)。主梁共分 25 个节段,标准节段长 6 m。桥面板采用正交异性板,根据不同节段受力情况,板厚 16、24 mm,采用 8 mm 厚 U 形加劲肋。桥面板每隔 3 m 设置一道横梁,为加强纵向传力,设 2 道通长小纵梁。

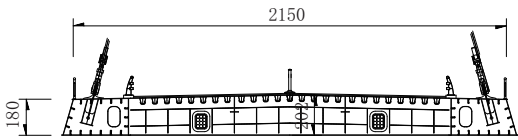


图 4 主梁标准横断面图(单位:cm)

2.4.1 主纵梁

主纵梁采用钢箱梁,箱顶宽 2.75 m,箱底宽 3.31 m,外边缘箱高 1.8 m,根据不同节段受力情况,边箱梁顶板厚 20、24、30、35 mm,相应底板厚度分别为 20、24、30、35 mm,对应腹板厚度分别为 16、20、24 mm。不同厚度壁板对接时,采用外对齐设计。顶底板加劲板肋高度 200 mm,厚度采用 16~24 mm。腹板加劲肋高度 160 mm,厚度 14~20 mm。

边箱每隔 3.0 m 设一道横隔板,吊点横隔板厚和普通横隔板根据受力要求,分别采用 30 mm 和 20 mm。

拱肋和主梁在相交处采取固结方式,利用主纵梁作为刚性系杆。考虑路线纵坡的影响,拱梁固结段主梁分段长度为 12 m,主梁顶底板厚度为 35 mm,腹板厚度 24 mm。主梁与拱肋交汇区段设置 4 道横隔板,板厚 30 mm。在 4 道横隔板对应的位置设置单箱三室中横梁,增强拱肋固结点处主纵梁的横向联系。

2.4.2 横梁、小纵梁

根据所处主梁的位置,横梁分为中隔板、中横梁及端横梁。全桥共计 43 道中隔板,拱梁固结位置设置中横梁 2 道,过渡墩处设置端横梁 2 道。

中隔板顺桥向标准间距为 3 m,跨中梁高 2.015 m,采用倒 T 形断面,底板尺寸为 600 mm×20 mm,腹板厚 16 mm。中横梁、端横梁均采用箱型断面。

横断面上设 2 道通长小纵梁,采用倒 T 形断面,底板尺寸为 400 mm×16 mm,腹板尺寸为 768 mm×14 mm。

2.5 慢行道设计

本桥车行道外侧设置慢行道,慢行部分在桥梁中部河道位置进行外悬,与车行道净距 8 m,且略高于机动车道部分(见图 5)。慢行道与主拱之间通过吊杆连接,吊杆间距 6 m,与车行道之间通过横梁连

接,间距同吊杆间距一致。慢行道主梁采用双槽型内扣断面,主梁宽度 4.35 m,主梁梯道支点处梁高 1.4 m,跨中梁高 0.9m。

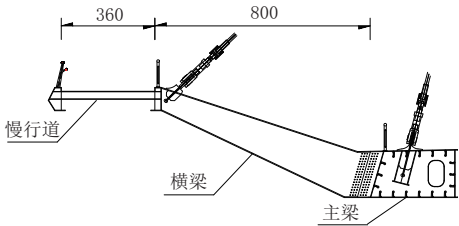


图 5 慢行道横断面图(单位:cm)

2.6 拱座设计

拱座构造根据拱脚及斜撑的角度设计,拱座基础包括承台和桩基础,承台厚度 4.5 m,每处拱座桩基础包含 9 根 D180 钻孔桩。

2.7 桥面系设计

主桥桥面板采用正交异性钢-UHPC 组合桥面板结构,具体组成为:

- 上面层:4 cm 厚 SMA-13 改性沥青混凝土;
- 中间层:热熔型改性环氧树脂黏结层;
- 下面层:4 cm 超高性能混凝土(UHPC)层;
- 钢桥面表面:冷喷锌底漆(80 μm);
- 铺装结构层总厚度:8 cm。

2.8 吊杆设计

吊杆采用标准强度为 1 860 MPa 钢绞线整束挤压拉索,纵向间距为 6 m,每断面共 4 根拉索,左右两侧各 2 根,梁上吊点分别设置于车行道和慢行道主梁上,全桥共 44 根。根据受力需要,共设置 GJ15ECD-4/9/12/15 四种规格吊杆,吊杆最长约 18.3 m。吊杆设计寿命为 25 a,并考虑其可更换性,更换时同一断面上的两根吊索应同步更换。在吊杆护套管成型过程中挤压形成双螺旋线,作为吊杆防风雨振措施。吊杆在梁上及拱上均采用销接耳板式锚固方式,其中慢行道吊杆在梁端的销轴设关节轴承,以适应纵桥向的位移。

2.9 施工方案设计

本桥采用“先梁后拱”的施工方法,具体如下:

- (1)施工基础的钻孔灌注桩,搭设施工栈桥和主桥钢梁施工支架。
- (2)施工承台和拱座,同步预埋拱脚段和斜腿根部节段。
- (3)在支架上组拼钢梁节段,焊接除合龙梁段间焊缝以外的所有对接焊缝。
- (4)在主梁上搭设拱肋拼装支架,吊装、焊接主

拱肋节段,完成拱肋合龙。

(5)安装吊杆,并进行初步预紧。

(6)全桥共在主纵梁(即刚性系杆)合龙段设置2处张拉反力装置。利用千斤顶张拉装置上的 $\phi 15.24-15$ 钢绞线,其中同一个截面上应采用对称、均衡对拉的顺序进行张拉。

(7)张拉完成后,维持原预拉力,按腹板、底板、顶板顺序完成主梁合龙的焊接;分三级逐级解除张拉力,将张拉力传递给顶底板和腹板。

(8)主桥吊杆第一次张拉。

(9)支架拼装无吊杆段的人行道主梁,吊装有吊杆段的人行道主梁,直至合龙。

(10)张拉人行道吊杆,拆除人行道拼装支架。

(11)施工附属设施,终调吊杆张拉力。

3 关键节点构造

3.1 拱梁节点构造

拱梁结合段不仅是拱的主要压力和弯矩传递构件,同时也承担着主梁和桥面板传递的拉力和剪力^[11]。在本桥的拱梁结合段,主拱肋与主梁部分相交(见图6)。其中,主梁采用斜腹板钢箱,主拱肋为空间拱且采用变截面五边形横断面。复杂的受力情况和奇特的造型,导致拱梁结合位置构造极其复杂。

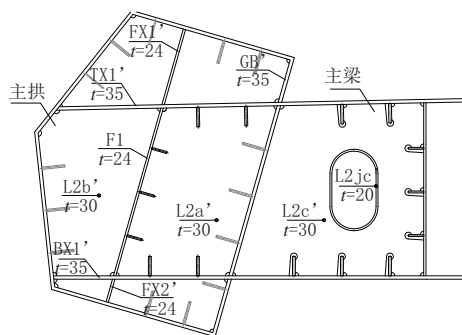


图6 拱梁节点构造图(单位:mm)

所有构造的应服从于结构的受力特性。主梁作为刚性系杆承受着巨大的拉力,应尽可能保证主梁传力路径的流畅。主拱肋在此处主要承受压力,故可以适当牺牲部分拱肋的连续性。因此,拱梁结合段采用“梁穿拱”的方式,即拱肋壁板在穿过主梁时均应断开,保证主梁壁板的完整性。

同时,为了增强拱梁结合段的可靠性,应采取以下措施:

(1)在主梁箱内的拱肋腹板GB应该延伸至拱梁结合段两端,增加拱肋腹板与主梁顶底板的焊缝

长度;

(2)主梁中的拱肋顶板和腹板应延伸至拱肋壁板,增强拱肋的刚度及与主梁的连接;

(3)在拱肋与顶底板相交的区域,沿拱肋斜腹板与主梁顶底板设置三角板,从而避免应力集中的现象。

3.2 拱座节点构造

拱桥的弯矩、轴力、剪力最终都通过拱脚转换、传递到基础和地基上,因此拱座节点需要强大的结合能力以及可靠性。

本工程采用拱座节点构造见图7。主拱斜腿钢箱共设三道横隔板形成三个箱室,其中HG1为拱座界面承压板,HG2为高强锚固螺杆承压板,HG3为拱肋横隔板,主拱钢箱内灌满C50微膨胀混凝土。主拱肋埋入拱座的部分在钢箱内外均设置开 $\phi 90$ mm圆孔的加劲肋,内穿 $\phi 28$ 的钢筋与进入孔内的混凝土形成PBL键。在PBL键之间还穿插设置了 $\phi 22 \times 100$ 的焊钉进一步加强连接效果。拱座节点全断面设置15根 $\phi 65$ 的高强锚固螺杆,锚固在HG2以及预埋在拱座里的锚梁上。

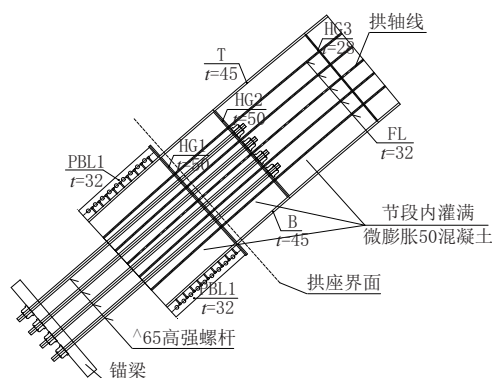


图7 拱座节点构造图(单位:mm)

在预应力钢箱混凝土里,拱肋的压力通过HG1承压板传递到拱座混凝土中,钢箱混凝土起到扩散应力与限制钢箱屈曲的作用,弯矩通过高强锚固螺杆传递,剪力则通过PBL键与焊钉传递。预应力钢箱混凝土构造相对简单,受力可靠更加可靠。

4 结构优化

4.1 结构体系

拱桥主要分为无推力体系和有推力体系两种结构体系。其中有推力体系适合用于地质条件较好的地区^[12]。

为了保证桥梁景观效果,实现主桥拱肋连续、流畅的形态,增强桥梁与滨河景观带的直接联系,本桥

采用中承式有推力拱桥体系。但本桥位全场地分布淤泥质粉质黏土,厚度达 2.20 ~ 12.30 m 不等,是典型的软土地基。若采用有推力体系,不仅要通过复杂且昂贵的地基处理以及拱脚基础解决主拱的水平推力问题,也难以从根源上避免长期地基不均匀沉降导致的附加内力。因此,本项目考虑主拱与主纵梁固结,利用主纵梁作为刚性系杆分摊部分拱肋推力,形成部分推力体系。

4.2 矢跨比

矢跨比是拱桥的重要参数,其不仅决定了拱桥景观形态以及与周围环境的协调程度,而且从根本上影响桥梁的拱脚水平推力。因此,研究拱桥在不同矢跨比下的内力变化规律,对景观拱桥的设计尤为重要^[13]。

中承式系杆拱矢跨比一般在 1/3.5 ~ 1/6 之间。从桥梁景观上考虑,桥面以上矢高 $2f/3$,桥面以下 $f/3$ 是一种合适的比例。因此,本桥选用 1/3、1/3.5、1/4、1/4.5 之间多个矢跨比以及 1/4.5 矢跨比情况下施加 8 000 kN 预拉力等不同工况进行计算,对比其内力变化情况(见图 8、图 9)。

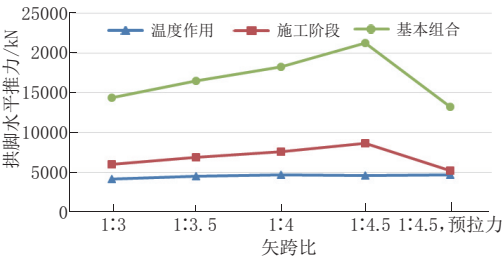


图8 不同矢跨比的拱脚水平推力 (单位: kN)

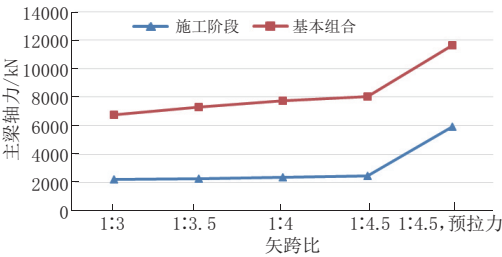


图9 不同矢跨比的主梁轴力

计算结果表明,矢跨比越大,拱脚水平推力越小,对结构越有利。而采用较小的矢跨比更能获得良好的景观效果。鉴于本项目为景观桥梁,最终采用 1:4.5 的矢跨比,同时采取施加系杆预拉力的措施,使拱脚水平推力仍然控制在合理范围内。矢跨比变化对主梁轴力影响较小,但是施加预加力后,主梁轴力增大明显。

4.3 拱肋内倾角

拱肋内倾角的大小主要影响拱肋稳定性、拱脚

横桥向水平推力等^[14]。拱肋上作用竖向荷载时,随着内倾角的增大,拱肋的竖向 1 阶稳定系数增大,其中 15° ~ 20° 时增长幅度最大。因此,桥梁稳定系数将逐步提高,但面外弯矩也将增大。另外,当拱肋内倾角过大时也会影响人行道净空。本项目采用 13°、16°、18° 三种内倾角进行试算,拱脚横向内力水平基本相当,拱肋整体稳定系数分别为 46、44、42.6。结合景观设计的要求,桥拱肋内倾角最终采用 16°。

4.4 系杆预拉力

根据部分推力拱桥的受力特性,系杆拉力可抵消部分拱脚水平推力,其余部分由基础承担。^[15]通过调整二者之间的比例分配,可以改善结构的受力与变形。本工程以基础变形最小、桩基截面内力最小为优化目标,采用 4 000、6 000、8 000 kN 等三组预拉力与不施加预拉力的情况进行对比(见图 10、图 11)。

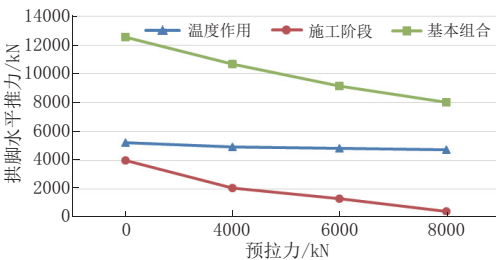


图10 不同预拉力下承台水平推力

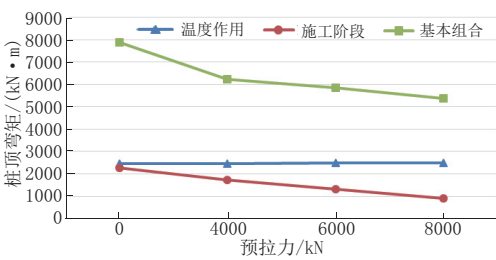


图11 不同预拉力下桩顶弯矩

计算结果表明,系杆预拉力越大,可以越有效地降低施工阶段产生的拱脚水平推力以及桩顶弯矩。考虑到拱脚水平推力和桩顶弯矩不宜出现负值,本桥最终采用 8 000 kN 预拉力,抵消施工阶段出现的 88% 水平推力,桩顶弯矩也降低了 60.6%,其他工况(如温度作用)产生的推力则由基础承担。

5 结 语

本文以中山市长洲大桥为例,对中承式景观拱桥的结构体系、矢跨比、拱肋内倾角及预拉力等关键技术参数展开研究和优化,并得出以下主要结论:

(1) 由于结构体系从根本上决定了拱桥的受力特性以及景观效果,因此根据拱桥桥址的地质情况、

运营养护能力采用合适的结构体系。长洲大桥通过采用主拱与主纵梁固结的方式,利用主纵梁作为刚性系杆分摊部分拱肋推力,形成部分推力体系,有效降低了拱脚顺向水平推力,减少了下部结构的规模。

(2)矢跨比越大,拱脚水平推力越小。从景观效果考虑,桥面以上矢高 $2/3$,桥面以下 $1/3$ 是一种合适的比例,但可能牺牲部分矢跨比的合理性。矢跨比在 $1/5$ 以上仍可以通过采取结构措施减小其不良影响。

(3)系杆预拉力是影响结构内力和变位的主要因素,设计时应结合桥梁基础规模进行综合考虑,合理利用系杆预拉力降低施工阶段产生的拱脚水平推力,控制桥梁基础的规模。

(4)景观桥梁设计时应该以景观优美为优先,在保证结构受力安全的前提下,设计时宜采用结构上措施的优化调整,以达到力与美的平衡。

参考文献:

- [1] 肖汝诚,孙海涛,贾丽君,等.昆山玉峰大桥—首座大跨度无推力斜靠式拱桥的设计研究[J].土木工程学报,2005,38(1):78-83.
- [2] 吴学华.斜跨拱桥结构特点及力学性能分析[D].大连:大连理工大学,2009.

- [3] 邓文中.桥梁形态与美学[J].Engineering,2018(2):221-242.
- [4] 唐云.关于景观桥梁方案设计思路的研究[J].城市道桥与防洪,2016(3):76-78.
- [5] 杨乐杰.中承式系杆拱桥景观构思及结构设计[J].中国市政工程,2020(4):18-21.
- [6] 张庆明,周罡.大跨径提篮拱的拱肋侧倾角对稳定性影响的研究[J].桥梁建设,2007,37(4):32-34.
- [7] 米曦亮,李东.中承式系杆拱桥结构优化设计[J].桥梁建设,2010,40(6):58-62.
- [8] 吴海军,唐海海,何立.大内倾角钢箱提篮拱几何非线性稳定分析[J].公路与汽运,2021(1):95-98.
- [9] 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,2021,37(3):78-83;97.
- [10] 吴用贤.空间三角钢拱桥关键节点设计[J].上海公路,2016(1):1007-1009.
- [11] 熊安书,肖锋,陈亮,等.提篮式拱梁组合体系桥梁拱梁结合段受力特性研究[J].世界桥梁,2024,52(4):99-105.
- [12] 谢亚洲,肖汝诚,李扬.三种拱式体系的性能比较[J].公路工程,2011,36(5):1674-0610.
- [13] 田寿,方合雪,翟考.软土地基上承式景观拱桥设计[J].山西建筑,2022,48(9):157-159.
- [14] 王达,姚型龙,严伟飞,等.中承式提篮拱桥拱肋最优内倾角取值影响分析[J].交通科学与工程,2022,38(4):60-64.
- [15] 齐鹏,魏海龙,孙镇国,等.特大跨径拱桥系杆张拉优化方法研究[J].公路交通科技,2023,40(5):85-91;99.

(上接第69页)

形成整体作为整联则更好地增强钢桥面整体性,减少桥面伸缩缝,以及减少大跨主梁下挠。同时,为平衡大跨和中跨主梁跨中及支点弯矩,对大跨与中跨相邻两侧的边跨一定范围内的拱肋区箱室灌注混凝土进行压重。并对主拱肋拱脚上方10 m范围内灌注混凝土,形成钢混组合截面。通过计算,主桥的强度、变形、稳定性和疲劳应力均能满足规范要求。

参考文献:

- [1] 傅海堂,郭文华.佛山市富龙西江特大桥桥型方案总体设计[J].广东公路交通,2019,45(4):127-131.
- [2] 李兵,姚云龙,郭立成,等.佛山富龙西江特大桥主桥设计[J].桥梁

- 建设,2023,53(6):127-134.
- [3] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].
- [4] CJJ 11—2011(2019年版),城市桥梁设计规范[S].
- [5] 仲健.通港大桥主桥结构设计及计算分析[J].城市道桥与防洪,2021,269(9):80-82;88.
- [6] 吴天恩.特大桥大跨度系杆拱施工方案设计[J].科技创新与应用,2023(35):117-124.
- [7] 田芮竹.五跨中承式双飘带外张拱桥设计[J].城市道桥与防洪,2023(4):127-134.
- [8] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [9] 刘安兴,孙颖,刘杰,等.富龙西江特大桥钢箱梁方案疲劳分析研究[J].广东公路交通,2018,4(6):23-29;49.
- [10] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].