

飞燕式双肢拱肋系杆拱桥优化设计

万小霞

(浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 某大桥采用4跨飞燕式空间系杆拱体系, 跨径布置为36 m+118 m+118 m+36 m=308 m, 桥面断面宽度为54.5 m, 采用钢梁钢拱结构。主桥的拱肋为分离拱肋, 外拱肋平面和吊杆面与铅垂面有一定夹角, 为平衡面外弯矩, 需对结构进行优化设计。通过对结构总体受力的分析, 选定吊杆在梁顶的锚固位置、内外吊杆力分配比例为变量进行优化。结果表明, 在构造允许的前提下, 内吊杆张拉点从吊杆面开始向道路中心线侧偏移600 mm, 内拱吊杆力分配比例提高10%时对拱肋受力更有利。

关键词: 系杆拱桥; 分离式拱肋; 吊杆力分配; 桥梁设计

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)08-0129-04

Optimal Design of Swift-type Double-limb Arch Ribbed Bowstring Arch Bridge

WAN Xiaoxia

(Zhejiang University Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: A bridge is a four-span swift spatial bowstring arch bridge. Its span layout is 36 m+118 m+118 m+36 m=308m. Its deck section width is 54.5 m. It is a steel girder steel arch structure. The arch rib of the main bridge is a separate arch rib, and the plane of the outer arch rib and the surface of the suspension rod have a certain angle with the vertical plane. To balance the bending moment outside the plane, the structure needs to be optimized in design. Through the analysis of the overall force of the structure, the anchoring position of the suspension rods at the top of the beam and the force distribution ratio between the inner and outer suspension rods are selected as variables for optimization. The results show that if the structure permits, the tension point of the inner suspension rod shifts 600 mm from the face of suspension rod to the center line of the road, and when the force distribution ratio of the inner arch suspension rod increases by 10%, the stress of the arch rib is more favorable.

Keywords: bowstring arch bridge; separate arch rib; force distribution of suspension rod; bridge design

0 引言

拱桥的应用已有三千多年的历史。早期因生产力水平低下, 基础理论发展缓慢, 设计和建造以经验为主, 主要应用于石拱桥。现存的赵州桥建于公元606年, 代表了中国古代石拱桥建造的最高成就^[1]。随着材料和理论的发展, 拱桥结构类型越来越丰富, 在跨径越来越大的同时发展出了多种结构形式, 在公路桥、铁路桥和市政景观桥梁上都有广泛应用。

我国设计建造拱桥已经有了丰富的经验和丰硕的成果, 目前已建成的平南三桥是世界最大跨径钢拱桥, 德余乌江特大桥则是世界上最大跨径上承式

钢管混凝土拱桥^[2]。城市拱桥以景观桥居多, 拱梁组合形式多样, 如太原南中环桥采用钢组合梁组合式系杆拱体系, 拱肋采用哑铃形主拱肋和钢管副拱肋的双肢拱肋形式; 深圳前海湾河桥则采用异形下承式钢箱拱桥, 结合了拱桥和桁架桥的构造和受力特点^[3]。梁拱组合体系可以有多种多样的组合形式和刚度分配办法^[4-8], 可以营造丰富的造型效果, 随着技术的发展和新技术的运用^[9-10], 拱桥的设计和施工也有了很大变化^[11-13]。

1 工程概况

某大桥为4跨连续梁拱组合体系, 采用4跨飞燕式空间系杆拱桥的结构形式, 跨径布置为: 36 m+118 m+118 m+36 m=308 m。中间2跨采用下承式拱桥体系, 主梁采用分离式双边箱的边箱结构, 结构中心线梁

收稿日期: 2024-12-31

作者简介: 万小霞(1992—), 女, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。

为六边形,也为变截面。跨中处拱肋截面轮廓最大纵横向尺寸约为 2.3 m×2.5 m,与中拱脚相接处拱肋截面轮廓最大纵横向尺寸约为 3.2 m×3.0 m,与边拱脚相接处拱肋截面轮廓最大纵横向尺寸约为 2.7 m×2.5 m。吊杆处隔板与吊杆共面布置,采用锚管进行吊杆锚固,锚管与吊杆处隔板一体,从底板伸出形成。

内拱与外拱在拱脚处逐渐合并,截面由六边形逐渐过渡为矩形,并与主梁固结。

内外拱之间设置风撑,风撑处设置吊点隔板,其腹板与内外拱同一立面位置吊点隔板同平面,风撑断面为工字形断面,翼缘板厚 24 mm,宽 700 mm,腹板厚 16 mm,宽 700 mm。

3 主桥结构计算

3.1 主桥计算模型

本桥主要传力形式为横梁直接承担恒载和活载,传递给主梁,主梁与主拱之间则通过吊杆进行传力,内外拱肋之间通过横撑进行传力和刚度加强,受力体系可简化为杆系受力体系,利用 MIDAS Civil 软件建立梁格模型。主梁、横梁、拱肋和拱肋横联承担轴力和弯矩,均采用梁单元进行模拟;吊杆只承受轴力,则用桁架单元进行模拟。考虑恒载、车道荷载、人群荷载、基础沉降、整体升降温、梯度升降温、纵向风力、横向风力等作用。有限元计算模型见图 5。

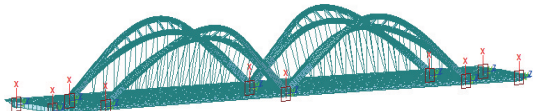


图 5 有限元计算模型

3.2 主桥受力分析

主梁主拱基本组合轴力、面内弯矩和面外弯矩包络图见图 6 至图 8。

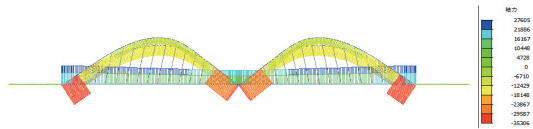


图 6 主梁主拱基本组合轴力包络图(单位:kN)

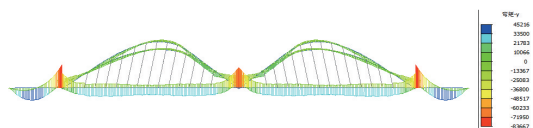


图 7 主梁主拱基本组合面内弯矩包络图(单位:kN·m)

由内力图可知:主跨主梁受力以轴拉为主,在吊杆力合理的前提下,跨内弯矩均匀,边跨主梁几乎不承担轴力,以受弯为主;主拱面内以受压为主,弯矩

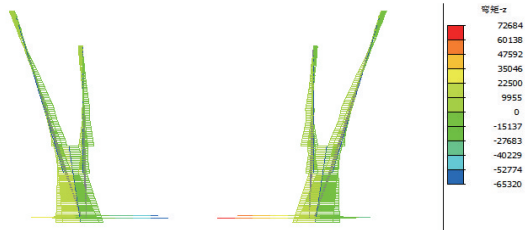


图 8 主梁主拱基本组合面外弯矩包络图(单位:kN·m)

较小,而面外则有较大弯矩。

4 主桥优化设计

通过对结构主要构件的受力分析可以看到,本工程因景观造型需求,拱肋向外倾斜,拱肋和吊杆面均与铅垂面有一定夹角,拱肋受到较大的面外力,拱脚也有较大的弯矩。拱肋受到的力主要有自身重力和吊杆力,受力方向分别为铅垂向下和平行于吊杆面,可以推断吊杆力的大小和角度对拱肋受力均有影响。因此,可以通过调整吊杆面与铅垂面的角度、吊杆力的大小,对结构进行优化设计。

4.1 梁端吊杆锚固位置优化设计

进行优化设计时,首先将内外吊杆梁端定位点的距离控制为定值 800 mm,然后将内吊杆梁端定位点与内拱肋中心线的距离 d 设置为本次优化的变量(见图 9)。为确保锚固结构的焊接空间, d 值最大为 600 mm。结合主梁顶板加劲肋的设置,将内吊杆中心线与内拱肋中心线重合,即 $d=0$ mm 作为基准,再将内吊杆梁端定位点向道路中心线移动至 $d=400$ 、600 mm 与之对比,选出对拱肋受力最有利的方案。比选的项目包括:拱脚弯矩和应力、拱肋结合处弯矩、拱顶横桥向位移、拱脚应力、拱间横联弯矩和应力。

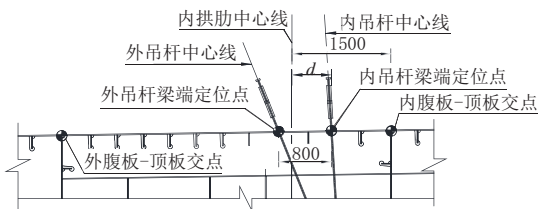


图 9 吊杆梁端定位点(单位:mm)

梁端定位点调整前后的计算结果对比见表 1。

根据计算结果,相对 $d=0$ mm,当 $d=600$ mm 时,基本组合拱脚应力降低 14%,3 个拱脚面外弯矩减少都超过 30%,拱顶位移则从 70 mm 降至不足 20 mm,拱肋横联的面外弯矩和应力也有所降低; $d=400$ mm 时的效应介于 $d=0$ mm 和 $d=600$ mm 之间。

由此可以得出结论:在构造允许的范围内,将梁

表1 梁端定位点调整前后计算结果对比

对比项	d / mm		
	0	400	600
恒载作用下中拱脚面外弯矩/(kN·m)	8 735	2 074	-1 300
恒载作用下边拱脚面外弯矩/(kN·m)	8 587	3 373	780
恒载作用下外拱拱脚弯矩/(kN·m)	6 981	5 232	4 468
恒载作用下内拱拱脚弯矩/(kN·m)	4 171	2 497	1 662
恒载作用下外拱拱顶横桥向位移/mm	77	33	12
恒载作用下内拱拱顶横桥向位移/mm	71	36	19
恒载作用下拱肋横联面内弯矩/(kN·m)	186	184	184
恒载作用下拱肋横联面外弯矩/(kN·m)	200	174	161
恒载作用下拱肋横联应力/MPa	150	139	133
基本组合中拱脚面外弯矩/(kN·m)	28 700	19 726	18 771
基本组合边拱脚面外弯矩/(kN·m)	24 648	17 692	14 217
基本组合中拱脚组合应力/MPa	-217	-195	-187
基本组合边拱脚组合应力/MPa	-189	-170	-162

端吊点向道路中心线侧移动,对拱肋的受力有明显的优化作用。本桥采纳d=600 mm为优化设计。

4.2 内外索面吊杆力分配优化设计

本桥为4索面拱桥,且内外吊杆倾斜角度不同,故标准断面的吊杆力由4根吊杆进行分摊时,对2片拱肋的效应有所区别。为简化分析,假设内外吊杆力之和不变,通过调整内吊杆的吊杆力进行对比分析。分析时,以内外吊杆的吊杆力相等为基准工况,然后分别将内拱吊杆力减小10%(对照工况1)、增大10%(对照工况2)、增大20%(对照工况3),分别计算这4种工况下拱脚和拱肋控制断面的应力进行对比,从中筛选出较优的吊杆力分配方案。

内拱吊杆力调整前后计算结果对比见表2。

表2 内拱吊杆力调整前后计算结果对比 单位:MPa				
应力位置	基准工况	对照工况1	对照工况2	对照工况3
中拱脚	-187.0	-191.0	-183.0	-184.0
边拱脚	-162.0	-162.0	-162.0	-162.0
外拱拱顶	-100.0	-105.0	-95.0	-96.0
外拱1/4(中)	-126.0	-134.4	-123.0	-124.0
外拱1/4(边)	-120.2	-125.6	-114.8	-116.0
外拱拱脚(中)	-97.6	-99.5	-96.5	-97.0
外拱拱脚(边)	-130.8	-137.2	-124.3	-126.0
内拱拱顶	-106.0	-109.0	-114.0	-113.0
内拱1/4(中)	-124.3	-123.1	-126.0	-125.0
内拱1/4(边)	-127.7	-125.3	-130.2	-130.0
内拱拱脚(中)	-134.6	-134.4	-134.8	-135.0
内拱拱脚(边)	-103.3	-96.1	-114.7	-112.0

由表2可知,拱脚和外拱拱肋控制断面的应力在3种工况下有如下变化:(1)当内拱肋吊杆力减小

10%时,增加5%左右;(2)内拱吊杆力增大10%时,应力降低3%~5%;(3)内拱吊杆力增加20%时,应力降低2%~4%。内拱应力变化则相对较小,多数断面变化在2%以内。考虑设计调整后拱肋的应力降低情况,同时考虑吊杆力的均匀和吊杆选型的接近,认为内拱吊杆力增加10%的方案为4种方案中的最优方案。

5 结 语

某大桥采用飞燕式分离双拱结构,主梁采用分离式钢箱梁,拱肋为通过拱间横联联系的双肢六角拱,在拱脚结合为矩形断面结合段,从而使拱脚结合段和拱梁结合段刚度得到增强。其结构受力形式明确,整体结构设计合理。由于造型要求,拱肋需向外倾斜。为优化结构设计,进行了拱肋的受力分析,对吊杆锚固位置和内外吊杆力分配比例作了调整。优化设计后的桥梁造型优美,结构合理,可以为城市景观钢结构拱桥的结构设计提供参考。

参考文献:

[1] 郑建文.朝天门长江大桥静力结构模型设计及稳定性分析[D].重庆:重庆交通大学,2010.

[2] 许春荣,郭慧乾,谭中法,等.超大跨径上承式钢管混凝土拱桥的设计与创新[J/OL].公路,2023(10):35-40.

[3] 黄华,蒲少杰,李小祥.超宽幅梁拱组合钢结构景观拱桥施工关键问题研究[J].城市道桥与防洪,2022(10):131-135;19.

[4] 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.

[5] 李晓琴,李映.两座拱梁组合体系桥梁设计分析及比较[J].结构工程师,2008(6):19-22.

[6] 林柏章.新型梁拱组合体系桥梁造型及结构内力影响研究[J].公路交通科技(应用技术版),2009(10):115-117.

[7] 娄廷会,张国林.一座景观梁拱组合桥的设计[J].公路,2007(6):12-16.

[8] 邹均平.下承式高低拱-梁组合结构桥梁设计及受力性能分析[J].中外公路,2009,29(5):127-130.

[9] 梁鹏,徐岳.现代桥梁CAD研究与开发[J].长安大学学报(自然科学版),2002,22(3):44-47.

[10] 韩伊伟,孙睿,林志聪,等.基于Citespace的木拱桥研究进展[J].四川建筑,2024,44(5):107-110;113.

[11] 戴玮,郑岗.基于BIM技术的三维数字化桥梁设计与管理[J].工程与建设,2014,28(6):724-726.

[12] 梁才,王进团,申威.超大跨径拱桥设计关键问题及其三维数字化解决方案[J].西部交通科技,2024(8):1-4.

[13] 刘小伟.泾河拱桥结构设计合理性分析[J].北方交通,2024(12):16-20.