

刘君平,谢云鹏,熊世伟,等. UHPC 蝶形腹板混凝土拱桥试设计[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2025, 45(2): 75-84.

LIU Jun-ping, XIE Yun-peng, XIONG Shi-wei, et al. Trial design of concrete arch bridge with UHPC butterfly web[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2025, 45(2): 75-84.

DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2025.02.007

# UHPC 蝶形腹板混凝土拱桥试设计

刘君平<sup>1</sup>, 谢云鹏<sup>1</sup>, 熊世伟<sup>2</sup>, 王道琳<sup>1</sup>, 陈宝春<sup>1</sup>

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 江西省交通科学研究院有限公司, 江西 南昌 330200)

**摘要:**结合混凝土拱圈腹板受力特点与超高性能混凝土(UHPC)材料性能特点,提出采用预制拼装 UHPC 蝶形腹板替代现浇混凝土腹板,形成新型 UHPC 蝶形腹板混凝土拱结构,以减轻自重和施工难度;以跨径 270 m 的乌蒙山特大桥为原型,将原钢桁-混凝土组合拱圈的钢腹杆替换为 UHPC 蝶形腹板,进行 UHPC 蝶形腹板混凝土拱桥的试设计。研究表明:在施工过程中,试设计拱桥在最大悬臂和现浇完中箱顶、底板状态下的拱圈顶、底板混凝土和 UHPC 蝶形腹板应力在容许范围内,1 阶弹性整体稳定系数分别为 12.02 和 4.12,拱圈强度、整体强度-稳定和变形验算均满足规范要求;相比钢桁-混凝土组合拱圈, UHPC 增加质量与钢材减少质量相近,试设计拱圈自重仅增加 5%,材料成本减少 21%;同时,试设计拱圈拱脚、拱顶截面的面外抗弯刚度分别提高 25%和 32%,各控制截面轴力增加 3.8%~6.2%,由于拱轴系数的优化,拱脚和拱顶弯矩最大分别减小 37.0%和 22.5%;相比于原桥,试设计拱桥的自振频率要大,但最大增幅仅 8.5%,对拱桥动力特性的影响不大。研究成果对促进混凝土拱桥的技术进步具有较好的理论意义与实际应用价值。

**关键词:**桥梁工程;混凝土拱桥;有限元;试设计;UHPC 蝶形腹板;斜拉悬臂施工

中图分类号:U448.22

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2025)02-0075-10

## Trial design of concrete arch bridge with UHPC butterfly web

LIU Jun-ping<sup>1</sup>, XIE Yun-peng<sup>1</sup>, XIONG Shi-wei<sup>2</sup>, WANG Dao-lin<sup>1</sup>, CHEN Bao-chun<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China;

2. Jiangxi Transportation Institute Co. Ltd., Nanchang 330200, Jiangxi, China)

**Abstract:** Combined with the mechanical behaviors of concrete arch ring web and the material properties of ultra-high performance concrete (UHPC), the prefabricated assembly UHPC butterfly web was proposed to replace the cast-in-place concrete web. Subsequently, a new type of concrete arch structure with UHPC butterfly web was developed to reduce the self-weight and construction difficulties. The Wumengshan Bridge with a span of 270 m was taken as the prototype, the UHPC butterfly web was used to replace the steel truss web of the original steel truss-concrete composite arch ring, then a trial design was carried out for this new type of concrete arch bridge. The research results show that in the construction process, the stresses in

收稿日期:2024-09-30

基金项目:国家自然科学基金项目(52078136)

作者简介:刘君平(1977-),男,江西安福人,研究员,工学博士, E-mail:liujunping@fzu.edu.cn.

the arch ring at the maximum cantilever stage and the completion of cast-in-place of the middle box top and bottom plates are within allowable limits, and the first-order elastic overall stability coefficients are 12.02 and 4.12, respectively. The strength, overall strength-stability, and deformation verifications of the arch ring all meet the requirements of specifications. Compared with the steel truss-concrete composite arch ring, the weight increased by UHPC is similar to that reduced by steel, and the self-weight of the trial design arch ring only increases by 5%. However, the material cost reduces by 21%. Additionally, the out-of-plane bending stiffnesses of arch foot and vault sections in the trial design arch ring increase by 25% and 32%, respectively, and axial forces of critical sections only increase by 3.8%-6.2%. Due to the optimization on the arch axis coefficient, the bending moments of arch foot and vault sections reduce at most by 37.0% and 22.5%, respectively. Compared with the prototype bridge, the natural vibration frequency of the trial design arch bridge is larger with the maximum increment of only 8.5%, which has little effect on the dynamic characteristics of the arch bridge. In summary, the research results have good theoretical significance and practical application values for promoting the technical progress of concrete arch bridges. 7 tabs, 11 figs, 28 refs.

**Key words:** bridge engineering; concrete arch bridge; finite element; trial design; UHPC butterfly web; cable-stayed cantilever construction

## 0 引言

混凝土拱桥具有承载能力高、结构刚度大、养护费用低以及耐久性好等优点<sup>[1-2]</sup>。然而,混凝土拱桥存在一些缺点,主要表现为拱圈自重过大、承载效率低、混凝土腹板浇筑困难以及施工工期较长等,制约着混凝土拱桥的进一步发展。如何减轻拱圈自重、降低施工难度以及优化结构形式,成为混凝土拱桥向更大跨度发展的主要研究方向<sup>[3-4]</sup>。

通常,混凝土箱拱的腹板厚度较小,横截面较高,且配有很多钢筋以及型钢,导致现场浇筑施工非常困难,施工工期很长。为减小混凝土腹板的自重和现场施工难度,部分学者提出了采用钢腹板(杆)取代混凝土腹板的构思,开展了钢腹板(杆)-混凝土组合拱、钢腹板(杆)-劲性骨架混凝土组合拱的理论研究与试验研究<sup>[5-9]</sup>。结果表明,采用钢腹板(杆)替代现浇混凝土腹板后,可减轻自重约 30%,简化施工并大幅缩短施工周期。中国在建的贵州乌蒙山特大桥<sup>[10-11]</sup>采用钢桁-混凝土组合拱结构和预制拼装施工工艺,在减轻拱圈结构自重的同时,进一步简化施工,缩短了施工周期。

混凝土箱梁桥也存在类似结构自重过大、腹板施工难等问题<sup>[12]</sup>。为减轻混凝土箱梁的自重及简化施工,Kasuga 等依据桁式结构钢腹杆的受力特点,提出了一种预应力混凝土(prestressed concrete, PC)蝶形腹板构造<sup>[13]</sup>,采用预制装配化施工,省去

腹板现场浇筑工序并缩短工期,并对 PC 蝶形腹板的抗剪性能进行了研究。与传统混凝土箱梁相比,PC 蝶形腹板箱梁的结构自重可减轻 10%左右,与波形钢腹板-混凝土组合箱梁的结构自重相近,挂篮的施工长度能够延长 50%<sup>[14-15]</sup>。2013 年,世界上第 1 座 PC 蝶形腹板箱梁桥(田久保川桥)在日本建成<sup>[16]</sup>,之后,日本建成了多座 PC 蝶形腹板箱梁桥<sup>[17-19]</sup>。近几年,针对 PC 蝶形腹板以及 PC 蝶形腹板箱梁结构的受力性能,中国学者展开了相关试验和理论研究<sup>[20-24]</sup>,结果表明,提高钢筋强度、混凝土强度、预应力以及增大腹板厚度均能有效提高 PC 蝶形腹板抗剪承载力,并减小腹板的剪切变形。

将 PC 蝶形腹板应用在混凝土箱梁中为混凝土拱桥的创新发展提供了新思路。从受力角度分析,拱结构中腹板受剪作用比梁结构中腹板小,因此,PC 蝶形腹板完全可以应用于混凝土拱结构。由于普通混凝土强度较低,截面难以减小,从而自重减轻也较小,且蝶形腹板需要施加预应力,工序较为复杂。结合超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)材料技术的发展,提出 UHPC 蝶形腹板构造,并将其应用于混凝土拱圈中,形成 UHPC 蝶形腹板混凝土拱的构思,即采用预制装配 UHPC 蝶形腹板取代现浇混凝土腹板。相比于传统混凝土拱圈,该新型拱圈结构能够大幅简化施工,并减轻自重。

虽然 PC 蝶形腹板已经应用于梁式桥,但本文

提出的 UHPC 蝶形腹板具有较好的抗拉能力,且拱结构中受剪作用小,存在取消配筋的可能性。因此,UHPC 蝶形腹板在材料性能、受力特点均与现有梁桥中 PC 蝶形腹板存在较大差异。为了解该新型 UHPC 蝶形腹板混凝土拱桥的受力性能,有必要进行其前期的试设计研究,研究结果将为该新型拱圈结构的应用提供参考,并将促进拱桥技术的创新发展,具有较好的理论意义及实际应用价值。

1 背景工程概况

贵州乌蒙山特大桥位于贵州省纳雍—晴隆高速公路,大桥为世界首座钢桁-混凝土组合拱桥,总体布置见图 1。主桥计算跨径为 270 m,矢高为 54 m,矢跨比为 1/5,拱轴线采用悬链线,拱轴系数为 1.95。主桥上部结构形式采用 14×20 m 预制 T 梁,桥面横断面由 7 片 T 梁组成,桥面宽为 16.55 m,左、右幅设单向 2%横坡。

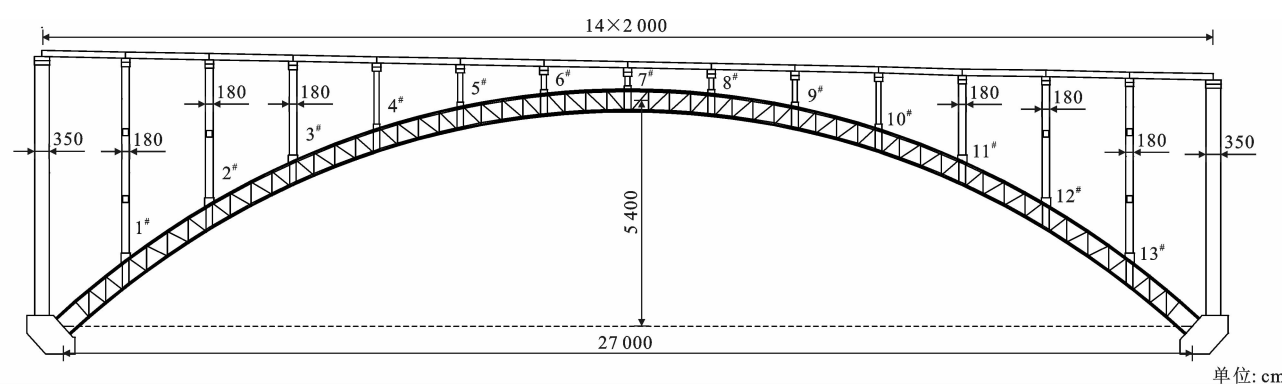


图 1 乌蒙山特大桥总体布置  
Fig. 1 General layout of Wumengshan Bridge

主桥采用钢桁-混凝土组合拱圈,拱圈截面高度均为 5.5 m,宽为 12 m,构造如图 2 所示。拱圈截面由混凝土顶、底板与 4 片钢桁骨架组成,单片钢桁骨架由上、下弦杆和竖、斜腹杆构成,4 片钢桁骨架通过钢横撑连接。其中,钢桁骨架的上、下弦杆埋置在顶、底板中,从而形成拱圈预制节段。钢桁骨架及钢横撑均采用 Q390 级 H 型钢,混凝土顶、底板采用 C60 混凝土。拱圈一般截面顶、底板厚度为 40 cm,与腹杆相交处加厚至 65 cm,为满足受力需要,拱脚段顶、底板均加厚至 65 cm。主拱圈节段安装采用两岸对称悬拼,每半跨拱圈分成 7 个吊装节段。

2 试设计拱圈构造

为便于对比分析,试设计方案仍采用原桥的拱上结构,仅改变拱圈构造,即仅采用 UHPC 蝶形腹板代替原桥的钢腹杆。同时,试设计拱肋采用与原桥相同的施工方法,即拱肋大节段预制斜拉悬臂拼装。为方便 UHPC 蝶形腹板与型钢弦杆的连接,将上、下弦杆由原来的 H 型钢更换为钢管,钢管截面刚度与 H 型钢截面保持一致。

2.1 拱圈构造

拱圈采用 UHPC 蝶形腹板-劲性骨架混凝土结构,混凝土顶、底板通过 UHPC 蝶形腹板连接,如图 3 所示。除腹板为 UHPC 外,其余材料与原桥一致,劲性骨架采用 Q390 圆钢管,尺寸为 350 mm(外径)×16 mm(壁厚),管内、外混凝土强度等级均为 C60。为保持顶、底板面积不变,对顶、底板的构造尺寸进行了调整,与腹板相交处的顶、底板厚度均增至 75 cm,拱脚段顶、底板厚度调整至 50 cm。考虑 UHPC 材料强度较高,拱圈一般段的腹板厚度取 10 cm,拱脚段腹板受剪作用较大,板厚增至 15 cm,拱圈各腹板纵向截面尺寸相同,仅改变板厚。

2.2 腹板与连接件构造

图 4(a)为 UHPC 蝶形腹板构造,其具体尺寸

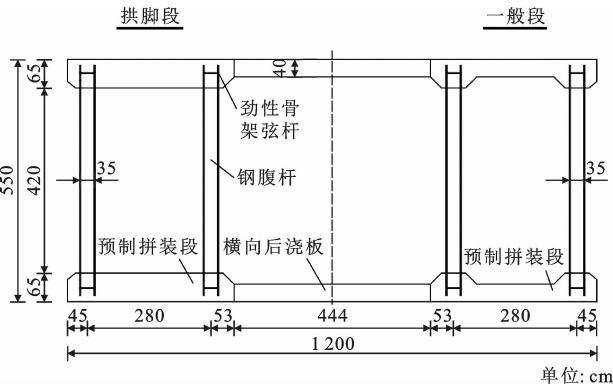


图 2 原桥拱圈横截面  
Fig. 2 Arch ring cross-section of prototype bridge

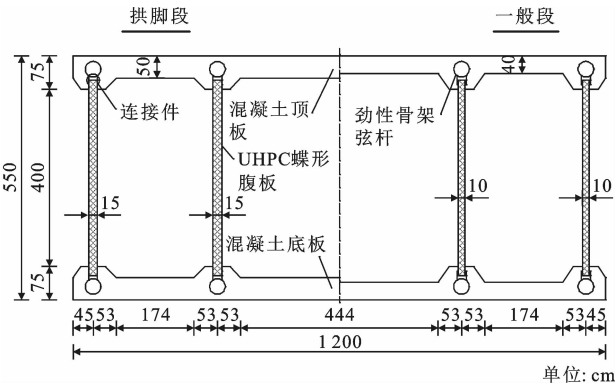


图 3 试设计拱圈横截面

Fig. 3 Arch ring cross-section of trial design bridge

根据拱肋实际受力情况而定,试设计腹板高为 400 cm,腹板宽为 350 cm。腹板上、下缘嵌入顶、底板深度为 20 cm,腹板两侧与水平方向的倾斜角度为 60°。为防止腹板最窄处应力过于集中,在腹板中部设置圆弧过渡段,圆弧半径为 100 cm。

图 4(b)为腹板在纵桥向的布置形式,由于蝶形腹板之间非连续布置,设置 10 cm 间隔以便于施工安装。考虑到拱圈顶、底板中箍筋的布置,在预制腹板时,在腹板上、下缘适当位置预留一定数量的穿筋孔,以确保顶、底板箍筋的连续性。

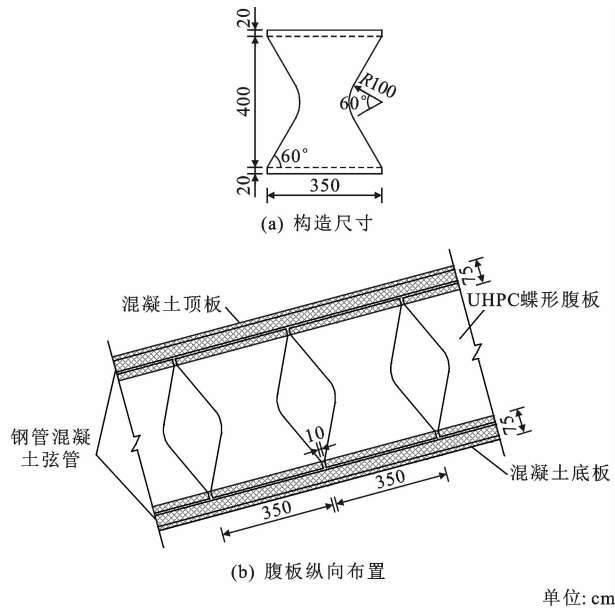


图 4 UHPC 蝶形腹板及连接构造

Fig. 4 Structure of UHPC butterfly web and its connection

结合预制 UHPC 蝶形腹板的装配化施工过程,采用连接件将预制 UHPC 蝶形腹板与顶、底板中的弹性骨架进行连接,如图 5 所示。在预制吊装节段时,在钢管上焊接开孔钢板,通过高强螺栓将 UHPC 腹板与弹性骨架弦管上的开孔钢板连接,再贯穿顶、

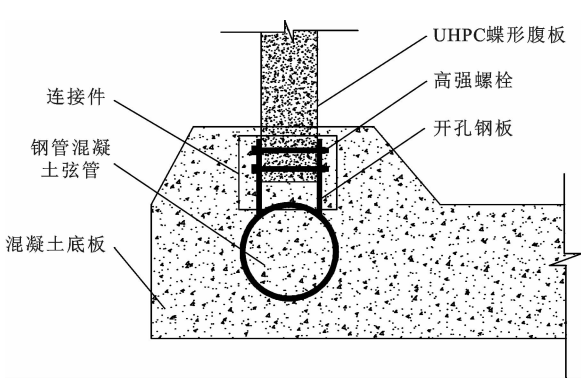


图 5 连接件构造示意

Fig. 5 Structure schematic of connecting piece

底板的箍筋和横向贯穿钢筋;最后,浇筑边箱顶、底板混凝土,使得 UHPC 蝶形腹板与边箱混凝土顶、底板构成整体。

2.3 拱轴系数

由于试设计桥的 UHPC 蝶形腹板自重一般大于原桥钢腹杆,使得拱轴系数与恒载压力线的偏差可能有所增大,因此,本文重新确定拱轴系数。

图 6 为试设计拱肋竖向位移随拱轴系数的变化曲线,可以看出:在恒载作用下,拱轴系数对  $L/4$  ( $L$  为计算跨径)截面的变形影响最小,而对拱顶截面的变形影响最大,且变形随拱轴系数的增大呈先减小后增大的趋势;当拱轴系数为 1.85 时,拱顶变形最小。因此,本试设计方案的拱轴系数选取为 1.85。

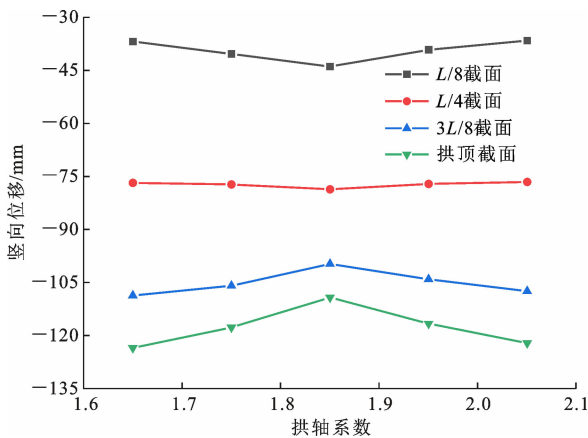


图 6 竖向位移-拱轴系数曲线

Fig. 6 Vertical displacement-arch axial coefficient curves

3 试设计拱桥受力计算分析

按照《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)<sup>[25]</sup>规定,进行承载能力极限状态和正常使用极限状态验算。由于篇幅有限,只选取以下 2 种最

不利荷载组合工况,即组合 I:1.2 恒载+1.4 汽车荷载+1.05 整体升温(24 ℃);组合 II:1.2 恒载+1.4 汽车荷载+1.05 整体降温(−15 ℃)。从试设计拱桥的拱圈强度、整体强度-稳定和变形 3 个方面进行验算。

3.1 有限元模型的建立

采用 MIDAS/Civil 软件建立试设计桥的有限元模型,如图 7 所示,试设计桥与原桥的建模方法一致。建模时拱圈截面顶、底板分别建立节点和单元,钢管与管内、外混凝土单元采用共用节点连接,桥面铺装通过二期荷载的形式施加;拱圈顶、底板各组成部分通过刚性连接构成整体,而 T 形主梁采用虚拟横梁法建立横向联系;边界条件为拱脚固结,主梁端部为简支。

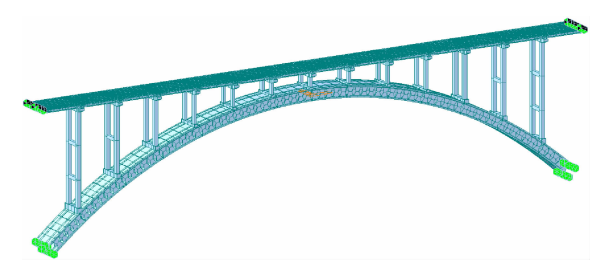


图 7 试设计桥有限元模型

Fig. 7 Finite element model of trial design bridge

在试设计桥计算模型中,除 UHPC 材料之外,其余材料性能参数取值与原桥一致。本文采用熊世伟<sup>[10]</sup>通过材性试验得到的 UHPC 材料性能参数,其弹性模量为  $4.59\times10^4$  MPa,轴心抗压强度为 162.4 MPa,轴心抗拉强度为 9.4 MPa。

3.2 拱圈强度验算

按照规范《公路圬工桥涵设计规范》(JTG D61—2005)<sup>[26]</sup> 规定,拱圈正截面小偏心受压强度验算时,各截面的轴向力极限值不得超过其设计值,且轴向力的偏心距不应超过规范容许值。因此,分别计算拱圈顶、底板截面轴力和偏心距,结果见表 1。结果表明,在最不利荷载组合作用下,各控制截面的轴力偏心距  $e$  均小于相应的容许偏心距  $d$ ;顶、底板截面的  $N_u/N$  均大于 1,最小值和最大值分别为 1.26 和 1.54。因此,试设计拱圈截面强度满足设计要求。

3.3 拱圈整体强度-稳定验算

根据《公路圬工桥涵设计规范》(JTG D61—2005)<sup>[26]</sup> 要求,当不考虑拱上建筑与拱圈的联合作用或拱圈宽度小于 1/20 计算跨径时,需分别计算试

表 1 拱圈强度验算

Table 1 Checking for arch ring strength

截面	荷载组合	轴力 N/kN	偏心 距 $e$ /m	容许偏 心距 $d$ /m	截面抗 力 $N_u$ /kN	$N_u/N^{-1}$
拱脚	I	−281 759	0.042	1.925	355 870	1.26
	II	−279 146	0.064	1.925	354 018	1.27
L/8	I	−239 476	0.029	1.925	312 279	1.30
	II	−236 731	0.036	1.925	311 770	1.32
L/4	I	−222 983	0.012	1.925	313 078	1.40
	II	−219 829	0.016	1.925	313 151	1.42
3L/8	I	−210 588	0.002	1.925	312 860	1.49
	II	−207 272	0.001	1.925	312 788	1.51
拱顶	I	−206 113	−0.030	1.925	311 843	1.51
	II	−202 748	−0.032	1.925	311 698	1.54

设计桥在成拱、成桥阶段的纵向和横向稳定性。在计算时考虑偏心距和长细比的影响,利用直杆抗压承载力计算公式进行验算,结果见表 2。可以看出,拱圈稳定性抗力  $F_u$  与荷载  $F$  的比值均大于 1,纵向和横向稳定的最小比值分别为 1.62 和 1.21,满足设计要求。

表 2 拱圈整体强度-稳定验算

Table 2 Checking for arch ring overall strength-stability

阶段	稳定形态	荷载 $F$ /kN	抗力 $F_u$ /kN	$F_u/F^{-1}$
成拱	纵向	103 542	253 098	2.44
	横向	171 653	254 460	1.48
成桥	纵向	155 770	253 098	1.62
	横向	210 242	254 460	1.21

3.4 拱圈变形验算

为避免活载作用下拱圈的变形过大,设计时要验算其竖向刚度。依据《公路圬工桥涵设计规范》(JTG D61—2005)<sup>[26]</sup> 要求,在作用短期效应组合下,一个桥跨范围内正挠度  $\delta^+$  与负挠度  $\delta^-$  的绝对值之和的最大值不应大于计算跨径的 1/1 000。因此,本文分别验算 L/8 截面、L/4 截面、3L/8 截面和拱顶截面处的挠度,结果见表 3。可以看出,规范的容许挠度  $\delta$  为 27 cm,各控制截面的正、负挠度绝对值之和的最大值为 4.39 cm,远小于容许挠度,说明拱圈具有较大的竖向刚度,满足规范要求。

表 3 拱圈变形验算

Table 3 Checking for arch ring deformation

cm

挠度	L/8 截面	L/4 截面	3L/8 截面	拱顶截面
$ \delta^+ $	1.21	1.94	1.53	0.78
$ \delta^- $	1.38	2.45	2.37	2.01
$ \delta^+ + \delta^- $	2.59	4.39	3.90	2.79
$\delta$	27			



4 拱圈施工过程受力分析

4.1 施工过程

试设计桥拱圈拟采用与原桥同样的施工方法，具体步骤为：首先制作拱肋边箱钢管骨架，安装预制UHPC蝶形腹板，然后浇筑2个边箱顶、底板，形成吊装节段，每个节段长度约22 m，最大吊重约290 t。采用斜拉悬臂施工方法将预制边箱拱肋节段合龙，灌注管内混凝土后再浇筑中箱顶、底板混凝土，形成组合拱圈截面。根据上述施工顺序进行建模计算，分析拱肋施工过程中顶板与底板混凝土、钢管和UHPC蝶形腹板的受力情况。限于篇幅，根据拱圈在施工过程中的受力特点，仅对边箱拱肋最大悬臂和现浇完中箱顶、底板2个关键受力状态进行分析。应力分析仅展示半跨情况，应力受拉为正，受压为负。

4.2 应力和稳定性分析

图8为顶、底板混凝土的应力计算结果，可知，在最大悬臂状态下，顶、底板混凝土最大压应力为9.51 MPa，在靠近跨中位置产生拉应力，最大为0.65 MPa，压应力与拉应力均小于规范强度设计值，满足要求。在现浇完中箱顶、底板状态下，顶、底板混凝土完全受压，最大压应力为12.50 MPa，在强度设计值范围内，满足规范要求。

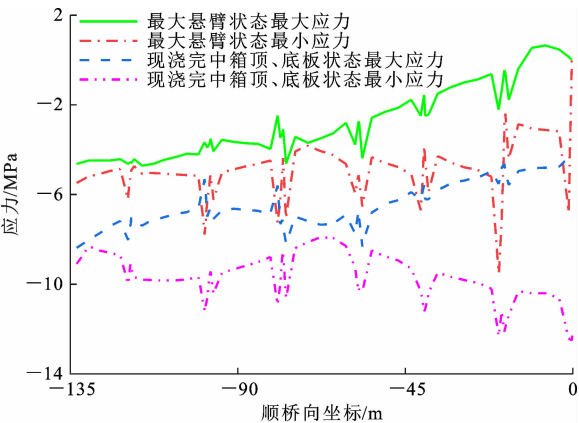


图8 顶、底板混凝土应力

Fig. 8 Top and bottom plates concrete stresses

图9为UHPC蝶形腹板在2种最不利受力状态下的应力，可以看出：蝶形腹板沿顺桥向的应力变化趋势为正、负交替变化；在最大悬臂和现浇完中箱顶、底板状态下，UHPC蝶形腹板的最大压应力均为3.36 MPa，在靠近跨中位置出现连续拉应力，最大拉应力分别为3.60、3.24 MPa，小于UHPC抗拉强度，满足要求。

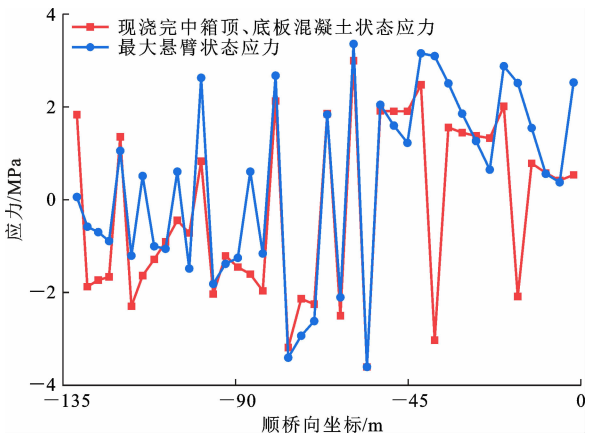


图9 UHPC蝶形腹板应力

Fig. 9 UHPC butterfly web stresses

大跨径拱桥施工过程中的稳定性分析非常重要，依据大量工程经验，一般认为拱桥施工过程中1阶弹性整体稳定系数应大于4.0<sup>[27]</sup>。采用MIDAS/Civil软件进行弹性屈曲稳定分析，最大悬臂状态考虑自重和斜拉索索力，现浇完中箱顶、底板状态仅考虑自重，计算结果分别如图10、11所示，可以看出：最大悬臂和现浇完中箱顶、底板状态的1阶失稳模态分别为面外失稳和面外正对称失稳；1阶弹性整体稳定系数分别为12.02和4.12，满足要求。

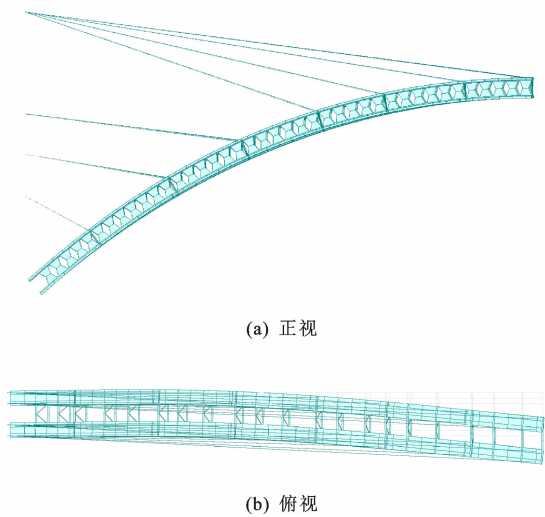


图10 最大悬臂状态下的1阶屈曲变形

Fig. 10 First-order buckling deformation under maximum cantilever state

5 试设计结果对比分析

5.1 材料用量与成本

由于试设计桥与原桥的拱上结构相同，因此，仅需对拱圈材料进行比较。表4为2座拱桥的拱圈材料用量与成本比较结果。

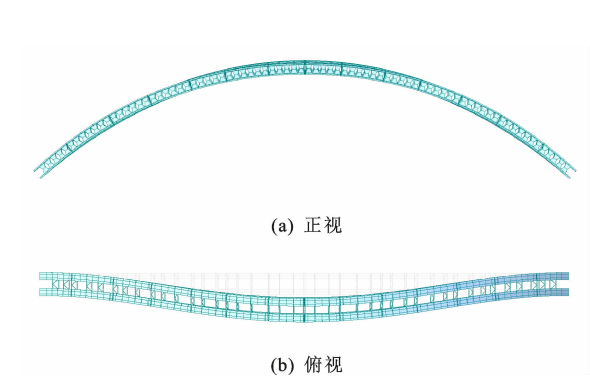


图 11 现浇完中箱顶、底板状态下的 1 阶屈曲变形  
Fig. 11 First-order buckling deformation under completion of cast-in-place of middle box top and bottom plates

表 4 两种拱圈的材料用量与成本比较  
Table 4 Comparison of material consumptions and costs between two arch rings

材料	试设计桥		原桥		两桥材料用量和成本比值	
	用量/ $\text{m}^3$	成本/万元	用量/ $\text{m}^3$	成本/万元	用量	成本
C60 混凝土	3 554	146.78	3 510	144.96	1.01	1.01
UHPC	366	179.78				
钢材	40	152.29	120	457.84	0.33	0.33

由表 4 可知,相比于原桥,试设计桥的 C60 混  
表 5 两种拱圈截面刚度比较

桥型	拱脚截面						拱顶截面					
	抗压刚度/ ( $10^9 \text{ N}$ )	两桥抗 压刚度 比值	面内刚度/ ( $10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ )	两桥面 内刚度 比值	面外刚度/ ( $10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ )	两桥面 外刚度 比值	抗压刚度/ ( $10^9 \text{ N}$ )	两桥抗 压刚度 比值	面内刚度/ ( $10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ )	两桥面 内刚度 比值	面外刚度/ ( $10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ )	两桥面 外刚度 比值
试设计桥	488.16	1.03	3 097.92	1.07	8 136.44	1.25	425.52	1.06	2 724.90	1.07	6 937.48	1.32
原桥	475.20		2 895.12		6 516.36		403.20		2 540.16		5 252.04	

5.3 拱圈内力  
表 6 为 2 种组合拱桥在荷载组合作用下的拱圈内力,其中: $N_A$  和  $N_B$  分别为原桥和试设计桥的轴力; $M_A$  和  $M_B$  分别为原桥和试设计桥的弯矩。由表 6 可知:与原桥相比,试设计桥各控制截面的轴力增  
幅仅为 3.8%~6.2%,而弯矩减小幅度较大,拱脚和拱顶弯矩最大减小分别为 37.0%和 22.5%。这是由于拱轴系数改变对拱圈截面的轴力影响较小,但对拱圈截面的弯矩影响较大<sup>[28]</sup>,各控制截面弯矩的减小进一步验证了试设计方案中拱轴系数选取的合理性。

表 6 各工况下拱圈内力比较  
Table 6 Comparison of internal forces of arch rings under varying working conditions

截面	荷载组合 I						荷载组合 II					
	$N_B/\text{kN}$	$N_A/\text{kN}$	$(N_B-N_A) \cdot N_A^{-1}/\%$	$M_B/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_A/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$(M_B-M_A) \cdot M_A^{-1}/\%$	$N_B/\text{kN}$	$N_A/\text{kN}$	$(N_B-N_A) \cdot N_A^{-1}/\%$	$M_B/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_A/(\text{kN} \cdot \text{m})$	$(M_B-M_A) \cdot M_A^{-1}/\%$
拱脚	-281 759	-270 609	4.1	-11 756	-18 668	-37.0	-279 146	-267 975	4.2	-17 861	-27 241	-34.4
L/8	-239 476	-226 497	5.7	-6 847	-8 241	-16.9	-236 731	-222 959	6.2	-8 480	-14 881	-43.0
L/4	-222 983	-214 119	4.1	-2 581	-3 508	-26.4	-219 829	-211 801	3.8	-3 483	-4 368	-20.3
3L/8	-210 588	-200 325	5.1	-446	-993	-55.1	-207 272	-197 507	4.9	-125	-839	-85.1
拱顶	-206 113	-196 836	4.7	6 158	7 948	-22.5	-202 748	-193 478	4.8	6 455	7 961	-18.9

5.4 动力特性

表 7 为 2 种组合拱桥的振型特征和自振频率,可以看出:相比于原桥的面内振型,试设计桥的 1 阶对称竖弯和 1 阶反对称竖弯自振频率分别增加 8.5%和 7.0%;相比于原桥的面外振型,试设计桥的 1 阶对称侧弯和 1 阶反对称侧弯的自振频率分别增加了 6.1%和 8.0%。因此,试设计桥各振型特征的自振频率大于原桥的自振频率,且最大增幅仅 8.5%,采用 UHPC 蝶形腹板替代钢腹杆对拱桥动力特性的影响不大。

表 7 两种拱桥的动力特性比较  
Table 7 Comparison of dynamic characteristics between two arch bridges

类型	振型特征	自振频率/Hz	
		试设计桥	原桥
面内	1 阶对称竖弯	0.89	0.82
	1 阶反对称竖弯	0.46	0.43
面外	1 阶对称侧弯	0.35	0.33
	1 阶反对称侧弯	0.95	0.88

6 结 语

(1)结合混凝土拱桥腹板受力与 UHPC 材性特点,提出采用预制拼装 UHPC 蝶形腹板替代现浇混凝土腹板,形成新型 UHPC 蝶形腹板混凝土拱圈结构,其与钢腹板(杆)-混凝土组合拱圈类似,能减轻混凝土拱圈约 35%的自重,并减小拱圈的施工难度。

(2)以首座钢桁-混凝土组合拱桥为工程背景,开展了 UHPC 蝶形腹板混凝土拱桥试设计研究,结果表明,拱圈强度、整体强度-稳定和变形验算均能满足现行规范要求。

(3)在最大悬臂和现浇完中箱顶、底板 2 种施工状态下,UHPC 蝶形腹板的最大压应力均为 3.36 MPa,最大拉应力分别为 3.60、3.24 MPa,满足规范要求;2 种施工状态下的 1 阶弹性整体稳定系数均大于 4.0,满足要求。

(4)相比于钢桁-混凝土组合拱圈,UHPC 增加质量与钢材减少质量相近,试设计桥的拱圈自重仅增加了 5%。就 UHPC 腹板与钢腹杆的材料成本而言,试设计桥拱圈的材料成本可减少 21%。

(5)与钢桁-混凝土组合拱圈相比,UHPC 蝶形腹板混凝土拱圈具有更高的面外抗弯刚度;拱圈各控制截面的轴力仅增加 3.8%~6.2%,由于拱轴系数的优化,拱脚和拱顶弯矩最大减小分别为 37.0%和 22.5%。采用 UHPC 蝶形腹板替代钢腹杆对拱

桥动力特性的影响不大。

(6)本文对 UHPC 蝶形腹板混凝土拱桥进行了初步试设计,结果表明该新桥型能满足施工和成桥受力要求,但对 UHPC 蝶形腹板仅进行了应力验算,其抗剪承载力及其影响参数、合理构造形式等方面应开展进一步研究,为其应用提供参考。

参考文献:  
References:

[1] 郑皆连,王建军,牟廷敏,等. 700 m 级钢管混凝土拱桥设计与建造可行性研究[J]. 中国工程科学, 2014, 16(8):33-37.  
ZHENG Jie-lian, WANG Jian-jun, MOU Ting-min, et al. Feasibility study on design and construction of concrete filled steel tubular arch bridge with a span of 700 m[J]. Strategic Study of CAE, 2014, 16(8): 33-37.

[2] 陈宝春,黄卿维. 600 m 跨径混凝土拱桥的试设计研究[J]. 中外公路, 2006(1):80-82.  
CHEN Bao-chun, HUANG Qing-wei. Research on trial design of 600 m span concrete arch bridge[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2006(1): 80-82.

[3] 陈宝春. 拱桥技术的回顾与展望[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2009, 37(1):94-106.  
CHEN Bao-chun. View and review of arch bridge technology[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2009, 37(1):94-106.

[4] ŠAVOR Z, BLEIZIFFER J. Long span concrete arch bridges of Europe [C]//RADIC J, CHEN B C. Proceedings of the 1st Chinese-Croatian Joint Colloquium on Long Arch Bridges. Zagreb: SECONHDGK, 2008: 171-180.

[5] WEI J G, CHEN B C, WANG T L. Studies of in-plane ultimate loads of the steel truss web-RC composite arch [J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 19(5):04014006.

[6] 刘君平,胡治华,罗 霞,等. 钢腹杆-劲性骨架混凝土弦杆组合拱节点受力性能试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(2):69-76.  
LIU Jun-ping, HU Zhi-hua, LUO Xia, et al. Test on mechanical performance of connections in steel brace-steel reinforced concrete (SRC) chord composite truss arch[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(2):69-76.

[7] 韦建刚,缪 锋,陈宝春,等. 钢腹杆混凝土拱桥地震响应分析[C]//房贞政. 第四届全国防震减灾工程学



- 术研讨会论文集. 北京:中国建筑工业出版社,2009:405-413.
- WEI Jian-gang, MIAO Feng, CHEN Bao-chun, et al. Seismic response analysis of concrete arch bridge with steel truss webs[C]//FANG Zhen-zheng. Proceedings of the 4th National Symposium on Earthquake Prevention and Disaster Reduction Engineering. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009: 405-413.
- [8] 吴明军. 420 m 跨径 SRC-钢腹杆组合拱试设计研究[D]. 福州:福州大学,2010.
- WU Ming-jun. Trial-design research on 420 m combination arch bridge with SRC-steel web members[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2010.
- [9] 韦建刚,黄卿维,陈宝春. 波形钢腹板-混凝土组合箱拱面内受力全过程试验研究[J]. 工程力学,2011,28(5):90-96,104.
- WEI Jian-gang, HUANG Qing-wei, CHEN Bao-chun. Experimental research on in-plane behaviors of box arch with corrugated steel webs and concrete flanges[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(5): 90-96, 104.
- [10] 熊世伟. UHPC 蝶形腹板-混凝土组合拱试设计研究[D]. 福州:福州大学,2023.
- XIONG Shi-wei. Trial-design research on concrete arch with UHPC butterfly webs[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2023.
- [11] 徐港宗. 钢桁腹杆-混凝土组合拱受力性能研究[D]. 福州:福州大学,2023.
- XU Gang-zong. Research on mechanical performance of steel truss web-concrete composite arch[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2023.
- [12] 赵煜,洪路加,周勇军. 基于钢束应力测试的预应力混凝土箱梁承载力评估方法[J]. 长安大学学报(自然科学版),2019,39(1):61-69.
- ZHAO Yu, HONG Lu-jia, ZHOU Yong-jun. Bearing capacity assessment method for PC box girder by testing stress of tendon[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2019, 39(1): 61-69.
- [13] KAMINAGA Y, ASHIZUKA K, TAKAHASHI A, et al. Design and construction of butterfly web bridge—Akutagawa Bridge[C]//CLAISSE P, GANJIAN E, NAIK T. Proceedings of IABSE Conference Nara. Zurich: IABSE, 2015: 1-7.
- [14] KASUGA A. Effects of butterfly web design on bridge construction[J]. Structural Concrete, 2017, 18(1): 128-142.
- [15] SHIBATA T, KATA K, KASUGA A, et al. Sustainability evaluation of butterfly web bridge[J]. Structural Concrete, 2018, 19(2): 422-439.
- [16] KASUGA A. Evolution of bridge construction in Japan[C]//ILKI A, CAVUNT D. Proceedings of the International Workshop on Advanced Materials and Innovative Systems in Structural Engineering: Seismic Practices. Istanbul: Istanbul Technical University, 2018: 41-57.
- [17] 刘海燕. 日本德岛高速别墅谷桥[J]. 世界桥梁, 2021, 49(6): 122.
- LIU Hai-yan. Japan Tokushima High-Speed Bessodani Bridge[J]. World Bridges, 2021, 49(6): 122.
- [18] 刘海燕. 日本新东名高速公路中津川大桥[J]. 世界桥梁, 2022, 50(3): 125-126.
- LIU Hai-yan. Japan Shin-Tomei Expressway Nakatsugawa Bridge[J]. World Bridges, 2022, 50(3): 125-126.
- [19] 黄睿奕, KAMINAGA K, ASHIZUKA K, 等. 一种新型桥梁结构——镂空蝴蝶形腹板桥梁的设计和施工[J]. 中外公路, 2017, 37(3): 149-151.
- HUANG Rui-yi, KAMINAGA Y, ASHIZUKA K, et al. Design and construction of a new type of bridge structure, the skeletonized butterfly web bridge[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2017, 37(3): 149-151.
- [20] 焦广如, 陈建兵, 张云飞. 蝶形腹板混凝土箱梁的变形计算研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(24): 68-73.
- JIAO Guang-ru, CHEN Jian-bing, ZHANG Yun-fei. Deformation calculation research of concrete box girder with butterfly web[J]. Building Structure, 2023, 53(24): 68-73.
- [21] 李会驰, 孙耀宗, 徐麟. 预制蝶形腹板的抗剪性能与桥梁应用研究[J]. 公路, 2021, 66(10): 104-112.
- LI Hui-chi, SUN Yao-zong, XU Lin. Research on shear performance and construction technology of butterfly web bridge[J]. Highway, 2021, 66(10): 104-112.
- [22] 朱子昊. 混凝土箱梁蝶形腹板剪切性能研究[D]. 苏州:苏州科技大学,2021.
- ZHU Zi-hao. Study on shear behavior of butterfly web in concrete box girder[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2021.
- [23] 朱子昊, 陈建兵, 焦广如. 蝶形腹板剪切变形计算与分析[J]. 苏州科技大学学报(工程技术版), 2021, 34(2): 39-43.
- ZHU Zi-hao, CHEN Jian-bing, JIAO Guang-ru. Calculation and analysis of shear deformation of butterfly webs[J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology (Engineering and Technology), 2021, 34(2): 39-43.
- [24] 张云飞, 陈建兵, 李响, 等. 基于有效宽度的蝶形腹板

箱梁抗弯承载力[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(19): 8341-8349.

ZHANG Yun-fei, CHEN Jian-bing, Li Xiang, et al. Flexural load carrying capacity of butterfly web box girder based on effective width[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(19): 8341-8349.

[25] JTG D60—2015, 公路桥涵设计通用规范[S].

JTG D60—2015, General specifications for design of highway bridges and culverts[S].

[26] JTG D61—2005, 公路圬工桥涵设计规范[S].

JTG D61—2005, Code for design of highway masonry bridges and culverts[S].

[27] 童加明, 邓年春, 林春姣, 等. 600 m 级劲性骨架拱桥外包混凝土浇筑方案[J]. 桂林理工大学学报, 2021, 41(4): 791-796.

TONG Jia-ming, DENG Nian-chun, LIN Chun-jiao, et al. Outercovers concrete construction scheme of 600 m concrete arch bridge with stiff skeleton[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2021, 41(4): 791-796.

[28] 李 杰. 600 m 特大跨径钢筋混凝土拱桥抗震性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.

LI Jie. Study on seismic response of 600 m super-span reinforced concrete arch bridge[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015.