

杨创捷,苏浩林,谢肖礼.上承式V拱桥体系转换及成桥力学性能分析[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2023,38(4):44-50.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.04.006

YANG C J, SU H L, XIE X L. Analysis of System Transformation and Mechanical Properties in Bridge Completion Stage of Deck V-Arch Bridge[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 38(4): 44-50. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.04.006

# 上承式V拱桥体系转换及成桥力学性能分析

杨创捷,苏浩林,谢肖礼\*

(广西大学土木建筑工程学院,广西 南宁 530004)

**摘要:**针对拱桥随着跨径增大而刚度下降,且在移动荷载作用下变形明显的问题,提出上承式V拱桥,在传统上承式拱桥的主梁和拱肋之间加入V形杆件,形成以主拱为下弦杆,V形杆件为腹杆,主梁为上弦杆的桁式结构,以提高结构的整体刚度和减小结构在移动荷载下的变形.以300 m跨径上承式拱桥为例,采用有限元软件研究结构进行体系转换的合理时机及成桥力学性能.结果表明:按顺序施工完拱肋、立柱及主梁后,加入V形杆件完成体系转换再进行二期恒载的施工方案较为合理,且该施工方案的施工阶段的应力及稳定性满足要求;300 m跨径上承式拱桥的强度、刚度、稳定性及动力特性均满足要求,且较传统拱桥具有更好的力学性能.

**关键词:**上承式V拱桥;桁式结构;刚度;体系转换;成桥力学性能

**中图分类号:**U445 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2023)04-0044-07

## Analysis of System Transformation and Mechanical Properties in Bridge Completion Stage of Deck V-Arch Bridge

YANG Chuangjie, SU Haolin, XIE Xiaoli

(School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the stiffness decrease and the deformation is obvious under the moving load with the increase of the span, this paper proposes the deck V-arch bridge. V-shaped members are added between the main girder and main arch to form a truss structure with the main arch as the upper chord, V-shaped members as the web members, and the main girder as the bottom chord to increase the integral rigidity of the structure, thereby reducing the deformation of the structure under moving load. Taking a 300 m span deck arch bridge as an example, the right time of system transformation and mechanical properties in bridge completion stage of the structure are studied based on the finite element software. It shows that the construction scheme that after the arch ribs, columns and main beams are constructed in sequence, V-shaped members are added to complete the system transformation, and then the secondary dead load is added which is more reasonable, and the stress and stability in construction stage of this construction scheme meet the requirements. The strength, stiffness, stability and dynamic characteristics of the 300 m-span deck arch bridge meet the requirements, which has better mechanical properties than the traditional one.

**Keywords:** deck V-arch bridge; truss structure; stiffness; system transformation; mechanical properties in bridge completion stage

收稿日期:2021-04-20

基金项目:广西重点研发计划资助项目(桂科 AB18126047);广西防灾减灾与工程安全重点实验室系统性研究项目资助(2016ZDX0001)

\*通信作者,E-mail:270933087@qq.com

上承式拱桥的刚度大,跨越能力强,且桥面构造简单,施工方便,造价经济,被广泛应用于大跨度桥梁尤其是跨越山区深谷桥梁的建设<sup>[1-3]</sup>,如大瑞铁路怒江四线特大桥<sup>[4-5]</sup>(主跨490 m,上承式钢桁拱架拱桥),沪昆高铁北盘江特大桥<sup>[6-7]</sup>(主跨445 m,上承式钢管混凝土拱桥),万州长江大桥<sup>[8-9]</sup>(主跨420 m,上承式钢筋混凝土拱桥)等。随着跨径的增大,上承式拱桥的刚度下降明显,且拱脚推力较大,这些都限制了上承式拱桥在超大跨径桥梁和软土地基桥梁建设工程上的发展<sup>[10-12]</sup>。因此,提高刚度及减少拱脚推力是突破上承式拱桥发展瓶颈的关键。

谢肖礼等<sup>[13]</sup>提出缆拱组合体系拱桥,充分利用悬索桥与拱桥的受力特征,主跨桥面荷载由拱肋与主缆共同承担,主缆张力平衡拱肋推力,使得恒载作用下结构产生的水平力基本为零,有效解决拱桥在软土地基上的推力问题。在活载作用下,拱桥在1/4跨处会产生较大的位移<sup>[14-16]</sup>。闫瑾等<sup>[17]</sup>研究拉索钢管拱桥,在总结斜拉桥和拱桥的受力特性的基础上,把斜拉索引入拱桥结构中,有效地调整拱脚过大的负弯矩和抵御“超重车”引起的主拱圈变形。

缆拱桥能有效解决拱桥的推力问题,但缆拱组合体系的设计施工相对复杂。拉索钢管拱桥能有效抵御“超重车”引起的变形问题,但局部拉索的设置并未大幅提高拱桥的整体刚度。因此,本文提出上承式V拱桥,在传统上承式拱桥的基础上,在主梁和拱肋之间加入V形杆件,形成以拱肋为下弦杆,V形杆件为腹杆,主梁为上弦杆的桁式结构,提高结构的整体刚度。同时,桁式结构能充分发挥拱上建筑的联合作用,使得下弦杆(拱肋)的负担减轻,从而减小拱脚产生的推力。

上承式拱桥在建造的过程中,结构在施工阶段的受力状态一直是设计及施工人员关注的重点<sup>[18-19]</sup>。对结构进行施工阶段分析,能找出施工中潜在的不利工况,通过制定合理的施工措施便可避免不必要的损失<sup>[20-21]</sup>。本文拱桥V形杆件的加入涉及结构的体系转换,更有必要进行施工阶段尤其是体系转换的分析。因此,以300 m跨径上承式拱桥为例,采用不同的施工顺序对结构进行施工阶段分析,找出体系转换的合理时机,最后对结构进行成桥力学性能分析。

## 1 体系转换方案研究

为研究本文拱桥体系转换的合理时机,在3种不同的体系转换方案下,对300 m跨径上承式公路拱桥进行设计。

### 1.1 结构布置

300 m跨径公路拱桥主要由拱肋、主梁、立柱及V形杆件组成,其结构布置及结构体系转换如图1和图2所示。相对于传统的桁架拱桥,V拱桥为整体桁式结构,结构形式更为简洁,且桁高明显增大。施工时,先按传统拱桥成桥,让拱结构承担一期恒载(图2a),再加入腹杆完成体系转换,形成桁式结构,以抵御二期恒载及活载(图2b),使得结构在活载下的变形减小。因此,V拱桥充分发挥了拱结构在恒载下受力的优越性及桁式结构在活载下变形小的优点。

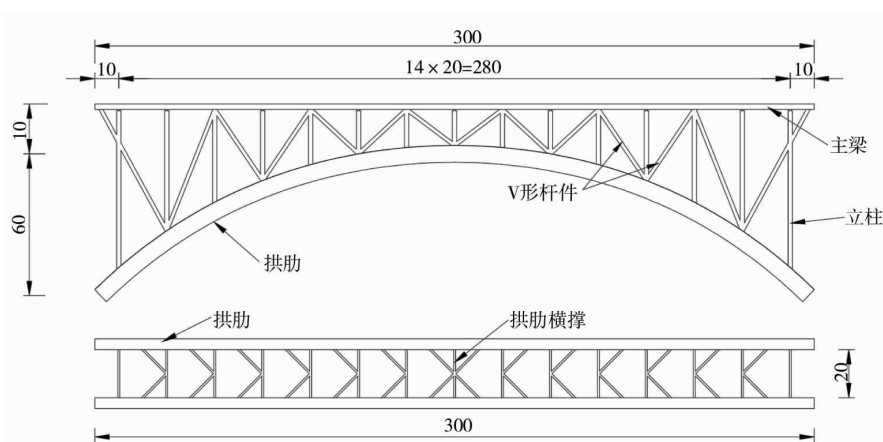


图1 300 m跨径拱桥总体布置(单位:m)

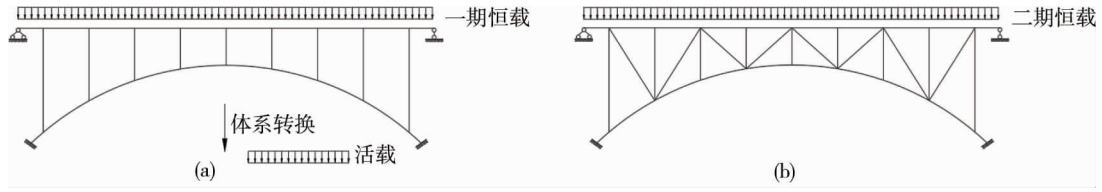


图 2 结构体系转换

300 m 跨径拱桥构件参数及用量如表 1 所示,合计用钢量 3 056.4 t(0.51 t/m<sup>2</sup>),混凝土用量 900 m<sup>3</sup> (0.15 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>).拱肋及腹杆截面如图 3 所示.拱肋采用变截面钢箱(单箱三室),矢跨比 1/5,矢高 60 m,拱轴线为悬链线,拱轴系数 2.7,拱肋中心间距 20 m,拱肋之间采用 K 形风撑连接.腹杆采用带肋箱型截面,全桥共设 15 对立柱,立柱间距 20 m.主梁截面如图 4 所示.采用单箱多室钢箱梁,主梁桥面宽度 20 m,设置双向 4 车道,桥面铺装混凝土厚 15 cm,仅作为二期恒载,不参与结构受力.

表 1 300 m 跨径拱桥构件参数及用量

构件	截面形式	材料	截面惯性矩/m <sup>4</sup>	扭转惯性矩/m <sup>4</sup>	截面积/m <sup>2</sup>	用量/t
拱肋	带肋箱型截面	Q345	0.421 72~1.563 21	0.569 86~3.886 19	0.164 52~0.230 52	1 106.8
拱肋横撑	箱型截面	Q345	0.003 29	0.004 93	0.031 60	180.0
腹杆	带肋箱形截面	Q345	0.042 62	0.008 19	0.065 45	398.8
腹杆横撑	箱型截面	Q345	0.000 64	0.000 48	0.000 32	8.0
主梁	带肋箱型截面	Q345	0.386 25	3.456 59	0.386 25	927.6
		C50	/	/	/	2 250.0
立柱	带肋箱型截面	Q345	0.043 60	0.012 73	0.009 82	337.5
立柱横撑	箱型截面	Q345	0.012 54	0.000 48	0.000 32	100.7

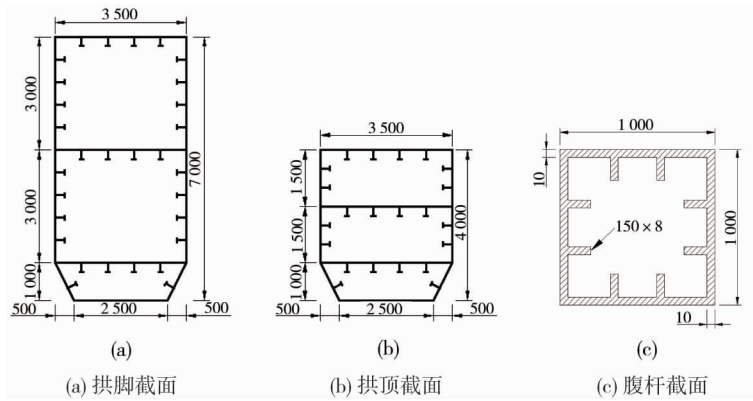


图 3 拱肋及腹杆截面(单位:mm)

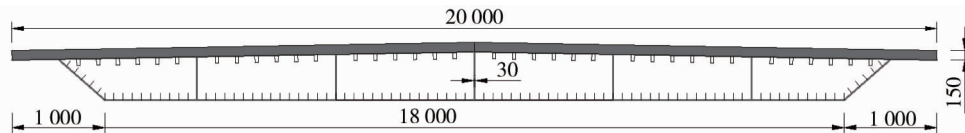


图 4 主梁截面(单位:mm)

### 1.2 考虑不同体系转换的施工方案

腹杆的施工时机将影响拱肋、主梁及腹杆的受力,因此,考虑以下 3 种施工方案,研究体系转换的合理时机,使得拱肋、主梁、腹杆三者均处于较为合理的受力状态.

#### 1) 方案一

阶段一:施工拱肋;阶段二:施工立柱;阶段三:施工主梁;阶段四:施工腹杆(完成体系转换);阶段五:桥面铺装.

2) 方案二

阶段一:施工拱肋;阶段二:施工立柱;阶段三:施工主梁;阶段四:桥面铺装;阶段五:施工腹杆(完成体系转换).

3) 方案三

阶段一:施工拱肋;阶段二:施工立柱;阶段三:施工腹杆;阶段四:施工主梁(完成体系转换);阶段五:桥面铺装.

## 2 施工阶段及成桥力学性能分析

### 2.1 Midas Civil 有限元建模参数

采用有限元软件 Midas Civil 分别对 3 种施工方案的施工过程进行模拟和施工阶段分析.传统拱桥构件参数及用量如表 2 所示,结构布置如图 5 所示.为验证本文拱桥成桥力学性能优越性,与用钢量(适当减少传统上承式拱桥拱肋的用钢量,将其作为腹杆的用钢量,见表 2)及跨径相同的传统拱桥(图 5)进行对比.

本文拱桥全桥共划分节点 356 个,单元 499 个;传统拱桥全桥共划分节点 348 个,单元 409 个.两桥单元均用梁单元模拟,两者有限元模型分别如图 6 和图 7 所示.边界条件均设置为拱肋固结,主梁与桥台弹性连接.

表 2 传统拱桥构件参数及用量

构件	截面形式	材料	截面惯性矩/m <sup>4</sup>	扭转惯性矩/m <sup>4</sup>	截面积/m <sup>2</sup>	用量/t
拱肋	带肋箱型截面	Q345	0.913 26~2.757 15	1.145 40~2.201 88	0.233 32~0.311 32	1 514.6
拱肋横撑	箱型截面	Q345	0.031 60	0.004 93	0.031 60	180.0
主梁	带肋箱型截面	Q345	0.067 38	3.456 59	0.386 25	927.6
		C50	/	/	/	2 250.0
立柱	带肋箱型截面	Q345	0.009 82	0.012 73	0.043 60	337.5
立柱横撑	箱型截面	Q345	0.000 32	0.000 48	0.012 54	100.7

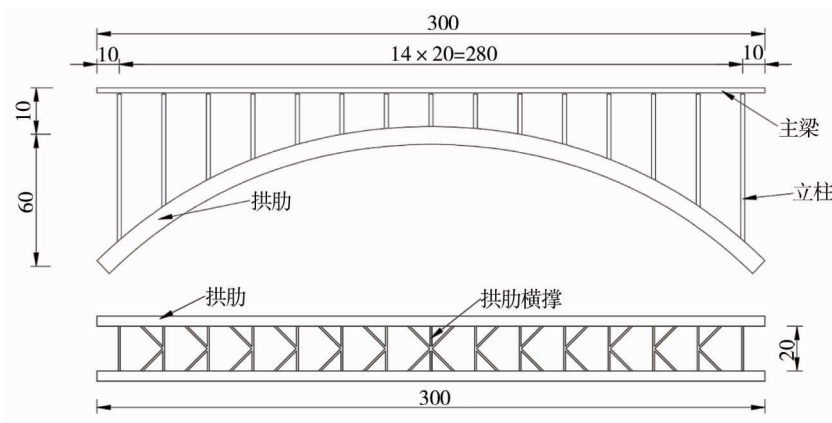


图 5 传统拱桥结构布置(单位:m)

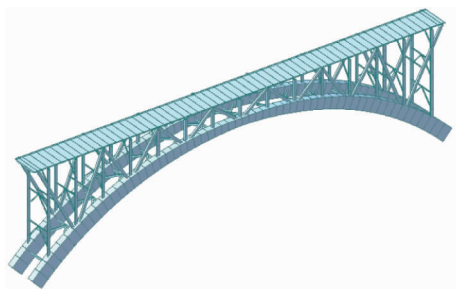


图 6 本文拱桥有限元模型

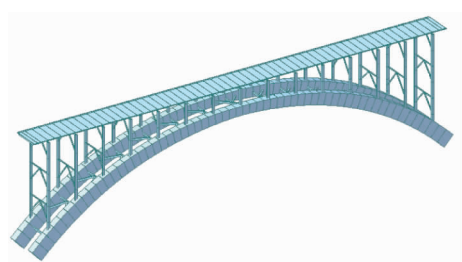


图 7 传统拱桥有限元模型

## 2.2 施工阶段分析

### 2.2.1 应力分析

3种施工方案下,各构件成桥状态的最大应力计算结果如表3及图8所示.对比3种施工方案下各构件应力可知:按施工方案一成桥后,拱肋应力(-98.3 MPa)较大,主要是因为体系转换时机较晚,拱结构承担大部分恒载,容易发生拱肋失稳问题;按施工方案三成桥后,腹杆应力(-84.1 MPa)及主梁应力(-73.7 MPa)较大,主要是因为体系转换时机过早,桁式结构承担了大部分恒载,导致主梁、腹杆的应力都较大,容易出现失稳及疲劳问题;而按施工方案一成桥后,各构件的应力水平适中.因此,结构进行体系转换的合理时机为按顺序施工完拱肋、立柱及主梁后,加入V形杆件完成体系转换.

表3 3种施工方案下各构件最大施工应力 MPa

构件	方案一	方案二	方案三	
拱肋	-98.3	-152.4	-94.5	
立柱	-48.3	-83.7	-33.7	
腹杆	拉	46.5	30.8	62.8
	压	-57.4	-37.5	-84.1
主梁	拉	27.5	17.7	34.0
	压	-47.0	-32.4	-73.7

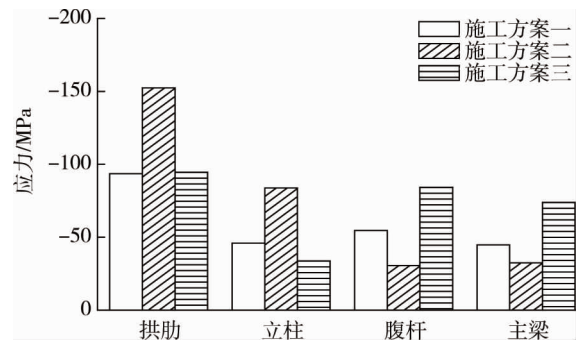


图8 施工阶段最大应力对比

### 2.2.2 稳定性分析

为研究体系转换(拱结构体系转换为桁式结构体系)时的稳定性问题,对3个施工方案体系转换前的施工阶段进行稳定性分析,分别为方案一的阶段三、方案二的阶段四和方案三的阶段三.利用有限元软件Midas Civil,并考虑结构自重,计算施工阶段稳定的临界系数.结果表明:方案一体系转换前结构的整体稳定系数为21.19,比方案二(10.10)高109.8%,比方案三(11.62)高82.36%.由此可见,方案一的施工稳定性较其他2种施工方案高,且满足要求.

## 2.3 成桥力学性能分析

### 2.3.1 结构应力分析

根据规范<sup>[22-23]</sup>要求,在以下3种荷载工况下,对结构进行强度及温度响应分析:(1)工况I,恒载;(2)工况II,1.2×恒载+1.4×汽车荷载;(3)工况III:1.2×恒载+1.4×汽车荷载+1.05×整体降温.其中,汽车荷载等级为公路—I级,设计车道为双向4车道;桥面铺装等二期恒载以75 kN/m的线均布荷载加在主梁;考虑整体升温、降温20℃.各施工方案下本文拱桥及传统拱桥的应力计算结果如表4所示.

表4 各工况下构件的最大拉应力和压应力

MPa

构件	工况 I				工况 II				工况 III				
	方案一 拱桥	方案二 拱桥	方案三 拱桥	传统 拱桥	方案一 拱桥	方案二 拱桥	方案三 拱桥	传统 拱桥	方案一 拱桥	方案二 拱桥	方案三 拱桥	传统 拱桥	
拱肋	-98.29	-152.38	-94.51	-110.01	-143.52	-200.40	-137.86	-187.87	-150.00	-191.93	-145.35	-197.77	
立柱	-48.29	-83.71	-33.73	-61.55	-87.54	-130.14	-67.43	-139.65	-92.92	-135.42	-72.70	-156.67	
腹杆	拉	46.42	37.83	62.84	/	87.22	66.77	98.26	/	119.27	101.53	133.03	
	压	-57.42	-30.48	-84.16	/	-112.49	-65.34	-144.57	/	-134.60	-87.45	-166.56	
主梁	拉	27.48	17.71	14.56	17.84	58.76	54.37	63.53	57.98	90.17	86.57	93.82	86.20
	压	-47.00	-32.44	-33.73	-30.41	-91.18	-65.03	-123.31	-56.43	-83.27	-58.03	-115.40	-21.74

由表4可知:在工况I作用下,传统拱桥拱肋的最大应力为-110.01 MPa,本文拱桥为-98.29 MPa,较前者降低了10.65%;但在工况II作用下,传统拱桥拱肋最大应力为-187.87 MPa,而本文拱桥仅为-143.52 MPa,较前者降低了23.61%,由此可见,本文拱桥的刚度大,移动荷载引起的荷载效应较小;在工况III作用下,传统拱桥拱肋的最大应力为-197.77 MPa,而本文拱桥仅为-150.00 MPa,较前者降低了24.15%.与工况II相

比,工况Ⅲ的计算结果有所增加,可知本文拱桥的温度响应比传统拱桥高,主要是由于拱桥增加了超静定次数,但经荷载组合后拱桥拱肋的最大应力仍小于传统拱桥.

### 2.3.2 结构挠度分析

考虑活载作用,对结构进行刚度分析,主梁挠度的计算结果如表5和图9所示.由表5可知:传统拱桥主梁的最大上下挠度绝对值之和为114.74 mm,而本文拱桥仅为30.13 mm,较前者减少了73.74%.由图9可知:传统拱桥的上下挠包络图均呈W型,峰值非常大,而本文拱桥则呈扁平波浪形,峰值相对较小.

表5 结构位移

挠度类型	传统拱桥	本文拱桥
主梁最大下挠/mm	69.94	27.84
主梁最大上挠/mm	44.80	2.29
主梁最大上、下挠(绝对值)之和/mm	114.74	30.13

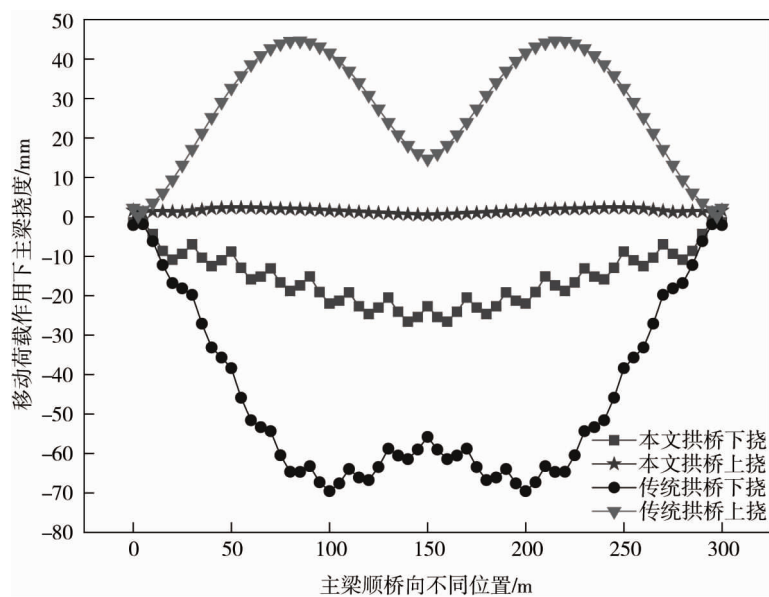


图9 主梁的位移

### 2.3.3 结构稳定性分析

考虑恒载及活载同时作用,对传统拱桥及本文拱桥进行稳定性分析.结果表明,传统拱桥的结构失稳临界系数为15.03,本文拱桥的结构失稳临界系数为21.26,均为面内压溃失稳,后者较前者提高了41.45%,可见在结构稳定性方面,本文拱桥有较大提高.

### 2.3.4 结构基频分析

结构频率计算结果如表6所示.由表6可知:传统拱桥的基频为0.495 4 Hz,本文拱桥的基频为0.548 6 Hz,均为面外正对称振动,后者基频较前者提高了10.738 8%.两者首次发生面内振动的频率分别为0.680 9、1.610 5 Hz,本文拱桥面内振动频率较传统拱桥提高了136.525 2%.

表6 结构基频计算结果

阶数	拱桥模态		结构基频/Hz	
	传统拱桥	本文拱桥	传统拱桥	本文拱桥
1	面外正对称	面外正对称	0.495 4	0.548 6
2	面内反对称	面外反对称	0.680 9	1.365 5
3	面内正对称	面外正对称	1.013 0	1.489 5
4	面外反对称	面内正对称	1.272 3	1.610 5
5	面外正对称	面内反对称	1.292 4	1.672 2

### 3 结论

1) 结构强度高. 经恒载、活载、温度等荷载组合后, 本文拱桥应力为  $-150.00$  MPa, 较传统拱桥( $197.77$  MPa)降低了  $24.15\%$ .

2) 结构刚度大. 本文拱桥主梁最大上下挠度绝对值之和仅为  $30.13$  mm, 较传统拱桥( $114.71$  mm)减少了  $73.74\%$ . 此外, 传统拱桥上下挠的包络图均呈 W 型, 峰值非常大, 而本文拱桥则呈扁平波浪形, 峰值相对较小.

3) 结构稳定性良好. 本文拱桥的失稳临界系数为  $21.26$ , 较传统拱桥( $15.03$ )提高了  $41.45\%$ .

4) 结构基频提高. 本文拱桥基频为  $0.548 6$  Hz, 较传统拱桥( $0.495 4$  Hz)提高了  $10.738 8\%$ .

### 参考文献:

- [1] 刘迎春, 薛素铎, 上官兴. 上承式拱桥结构形式变化综述[J]. 公路, 2012, 57(3): 50-56.
- [2] GEORGE J, MENON A. Simplified performance assessment for single-span masonry arch bridges under live load [J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(6): 0001723.
- [3] 宁远思. 大跨度上承式铁路拱桥优化设计与建设管理作用分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(8): 2040-2046.
- [4] 丁文富, 杜宇本, 蒋良文. 大瑞铁路怒江四线大跨车站特大桥综合勘察技术与成果分析[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(4): 101-106.
- [5] 张喆. 怒江四线特大桥钢箱梁拱上支架法施工技术研究[J]. 河北水利电力学院学报, 2022, 32(2): 72-76.
- [6] 谢海清, 徐勇, 陈列, 等. 沪昆高铁北盘江特大桥铺设无砟轨道适应性研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(11): 93-96.
- [7] 吕梁, 钟汉清, 辜友平, 等. 沪昆高铁北盘江特大桥主拱圈施工全过程非线性稳定性评估[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(2): 101-105.
- [8] 李晓鹰, 余葵, 胥润生. 万州长江公路大桥防撞设施工程船撞工况研究[J]. 公路, 2017, 62(9): 150-156.
- [9] 文传勇. 万州长江大桥船舶撞击力有限元分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(2): 17-20.
- [10] 谢肖礼, 覃霞, 欧阳平, 等. 提高拱梁固结拱桥刚度的有效方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(6): 747-754.
- [11] 霍志刚. 大倾角有推力拱桥结构性能研究[J]. 公路, 2020, 65(1): 114-117.
- [12] LIU C Y, WANG Y Y, WU X R, et al. In-plane stability of fixed concrete-filled steel tubular parabolic arches under combined bending and compression[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(2): 04016116.
- [13] 谢肖礼, 付元杰, 邓年春. 700 m 级中承式缆拱桥设计[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(6): 1162-1168.
- [14] FAN B H, WANG S G, CHEN B C. Dynamic effect of tie-bar failure on through tied arch bridge[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2020, 34(5): 04020089.
- [15] CHENG J, JIN H. Reliability-based optimization of steel truss arch bridges[J]. International Journal of Steel Structures, 2017, 17(4): 1415-1425.
- [16] HUANG D Z. Vehicle-induced vibration of steel deck arch bridges and analytical methodology [J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 17(2): 241-248.
- [17] 闫瑾, 上官兴. 600 m 拉索钢管拱桥设计新思维[J]. 公路, 2012, 57(6): 69-75.
- [18] 李艳凤, 于欢, 包龙生. 下承式系杆拱桥施工阶段受力特性研究[J]. 公路工程, 2019, 44(4): 149-153.
- [19] 高波, 钟跃. 高铁 140 m 系杆拱桥先拱后梁法施工关键技术[J]. 中国铁路, 2020(6): 136-143.
- [20] 闫兴非, 陈玮, 张凯龙, 等. 上海罗蕴河系杆拱桥施工顺序对成桥状态的影响[J]. 中国市政工程, 2020(3): 30-34.
- [21] CHEN Q, ZHANG Y, XIANG H W, et al. Construction control techniques of long-span steel truss arch bridges[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development(English Edition), 2015, 9(1): 35-44.
- [22] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [23] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢结构桥梁设计规范: JTG D64—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.