

# 1 000m级中承式拱桥试设计研究

谢肖礼, 杨创捷, 邱辰, 苏浩林

(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稳定性下降、且在移动荷载作用下容易发生剪切、弯曲变形等问题, 提出了解决方案。在主梁和拱肋之间加入刚性杆件形成三角网, 使三角网与拱肋、主梁形成连续的系列三角形。利用三角形稳定性, 提高了主梁和拱肋的线刚度, 从而提高结构的整体刚度。桥梁在移动荷载下, 三角形必然受非节点荷载作用, 降低了稳定性, 设置吊杆、立柱以增加弹性约束, 减少节点间的弯剪变形。此外, 采用整体式节点, 简化其构造, 并采用预制拼装方法, 施工方便快捷。给出了该方案的具体结构形式, 阐述了力学原理, 并对跨径1 008m中承式拱桥进行试设计。有限元结果表明: 该方案拱桥强度、刚度、稳定性及动力特性均满足要求, 较传统拱桥具有更好的力学性能及经济性。

**关键词:** 三角形稳定性; 中承式拱桥; 线刚度; 有限元; 试设计

中图分类号: U44

文献标志码: A

## Trial Designing Study of Half-through Arch Bridge with Main Span of 1 000m

XIE Xiaoli, YANG Chuangjie, QIU Chen, SU Haolin

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

**Abstract:** The arch bridge stability declines when the span increases. The phenomena such as shearing and bending deformation tend to happen with moving load. Put the rigid bar between the main girder and arch rib to form a triangulation network, and then the triangulation network, arch rib and main beam compose a continuous series triangles. The stability of the triangle is used to improve the linear stiffness of the main beam and arch rib, so as to improve the overall stiffness of the structure. When the bridge is under moving load, the triangle must be subjected to the non-node load, which reduces the stability of the triangle. Therefore, suspender and columns are set to increase the elastic constraint and

reduce bending and shear deformation between nodes. In addition, integral nodes can be used to simplify the structure with the proposed method of precast-assemble for construction which is convenient and fast. The concrete structure of the scheme is given, the mechanics principle is expounded, and the trial designing of half-through arch bridge with the main span of 1 008m is carried out. The finite element results show that the strength, stiffness, stability and dynamic characteristics of the presented arch bridge meet the requirements with a better mechanical properties than traditional arch bridges and proposed design is more economical.

**Key words:** stability of the triangle; half-through arch bridge; stiffness; finite element; trial designing

1 000m拱桥因其形式多样、刚度较大、耐久性好、造型美观等特点, 成为建设大跨桥梁的主要桥型之一, 尤其是西部高山峡谷地区, 大跨度拱桥能实现一跨而过, 极具竞争优势<sup>[1-3]</sup>。不过, 随着拱桥跨径的增大, 特别跨径超过600m后, 拱圈应力急剧增大、稳定性问题突出, 施工难度大等因素使得其经济性变差, 世界上也未有跨径超过600m的拱桥建成<sup>[4-5]</sup>。

钢桁架拱桥<sup>[6-8]</sup>, 自重较轻, 有效避免了材料强度基本被自重消耗殆尽的问题<sup>[9-10]</sup>, 但是, 随着跨径的增大, 其面临刚度不足及施工时整体稳定性差等问题。钢管混凝土拱桥<sup>[11-14]</sup>, 跨越能力及适应能力强<sup>[15-16]</sup>, 但是, 在建设过程中面临如何解决混凝土收缩徐变引起的脱空现象及如何实现钢管的套箍作用等难题<sup>[17]</sup>。劲性骨架拱桥<sup>[18-20]</sup>, 大大提高了核心混凝土的承载能力与延性, 可以减慢或抑制受压时的纵向开裂<sup>[21-22]</sup>, 但是, 结构复杂, 施工工序多。

除以上常见的拱桥体系外, 有学者运用拱桥创

收稿日期: 2020-07-19

基金项目: 广西重点研发计划(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(2016ZDX0001)

第一作者: 谢肖礼(1963-), 男, 研究员, 工学博士, 主要研究方向为桥梁结构新体系。E-mail: guxixiaoli@126.com

通信作者: 邱辰(1988-), 男, 讲师, 博士生, 主要研究方向为桥梁结构新体系。E-mail: 270933087@qq.com



论文  
拓展  
介绍

新体系进行特大跨径拱桥的试设计研究:闫瑾<sup>[23]</sup>等人对600m特大跨径品型钢管拉索拱桥进行了初步设计,该体系拱桥把斜拉索引入到拱桥结构中,创新出的一种新拱桥体系。谢肖礼<sup>[24]</sup>等人对700m级缆拱桥进行初步设计,该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。邵旭东<sup>[25]</sup>等人对800m级钢—UHPC组合桁式拱桥进行了概念设计,该体系将UHPC材料用于拱桥拱形桁式结构,即由全UHPC材料构成的箱型上、下弦拱肋和钢腹杆组成。

本文针对建设特大跨径拱桥面临的难题,提出一种自重轻、刚度大、稳定性好的拱桥设计方案。设计思路为:在传统拱桥结构的基础上,在主梁与拱肋之间加入三角网形成连续系列三角形,利用三角形角点的约束及三角形稳定性原理来提高主梁与拱肋的线刚度,从而提高结构的整体线刚度。三角网可采用整体式节点简化构造,并采用预制拼装方法,施工方便快捷。本文主要介绍其结构形式和力学原理,并对1000m级该方案拱桥进行设计研究。

## 1 1000m级中承式拱桥概念设计

### 1.1 结构形式

本文拱桥的结构组成如图1所示,主要由主拱、主梁、三角网、吊杆及立柱组成,三角网与主梁及拱肋组成连续的系列三角形结构。三角网节点采用整体式节点,三角网杆件与整体式节点板之间采用螺栓连接,整体式节点板及三角网杆件均可在工厂预制加工,再运至现场拼装,施工方便快捷。

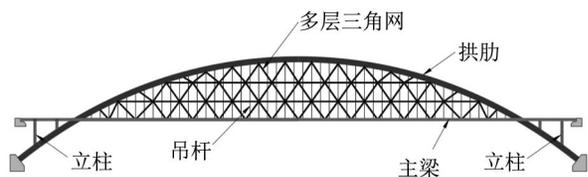


图1 本文拱桥结构布置示意图

Fig.1 The structural arrangement of presented arch bridge

### 1.2 力学原理

本文拱桥基于三角形稳定性原理来提高拱桥的整体性能,其特征及力学原理具体有以下四点:

(1) 设置斜腹杆形成三角形结构,提高刚度及稳定性

传统中承式拱桥立柱、吊杆仅对主梁起到了多

点弹性约束的作用,提高了其线刚度,而对拱肋的刚度没有贡献。加入斜腹杆后,斜腹杆与主梁、拱肋形成了连续的系列三角形(如图2所示),因三角形具有良好的稳定性,主梁及拱肋的线刚度均得到有效提高,从而提高了结构的整体刚度。

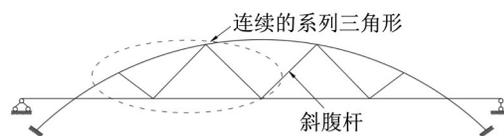


图2 斜腹杆布置示意图

Fig.2 Web member arrangement

(2) 大跨度拱桥设置多层的三角网,减小杆件自由长度

随着拱桥跨径的增大,图2中主梁与拱肋之间的杆件自由长度增大,超过一定长度后,杆件受非节点力的特征将十分明显,大大降低了三角网的线刚度及稳定性,此外杆件长度过长会增加施工难度。因此,在大跨径拱桥中需要根据杆件的稳定性及施工难度,来设计三角网的杆件长度、网格间距及层数,使得三角网线刚度及稳定性提高,从而进一步提高拱肋和主梁的线刚度并降低施工难度,如图3所示。

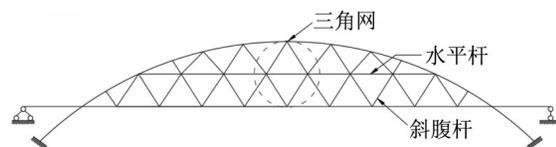


图3 三角网布置示意图

Fig.3 Triangle net arrangement

(3) 通过吊杆提供多点弹性约束,解决“桥中桥”问题

与其他结构不同,桥梁主要受移动荷载作用,使结构中的三角形必然受非节点力作用,从而在一定程度上降低三角形的稳定性,当三角形边长过长时便会出现“桥中桥”问题。为此,需对主梁设置足够密的柔性吊杆,增加对主梁的弹性约束,提高其线刚度以减小弯剪变形,如图4所示中的三角形ABC,当没有吊杆1、2时,主梁段BC弯剪变形如虚线所示,加入吊杆1、2后,其变形如实线所示,大大减小了其弯剪变形,保证了三角形良好的稳定性,有效解决了因三角形边长过长而存在的“桥中桥”问题。

(4) 适时进行体系转换,尽早提高结构稳定性

本文拱桥先按传统中承式拱桥成桥后,安装三角网完成体系转换后再承担二期恒载及活载,如图5

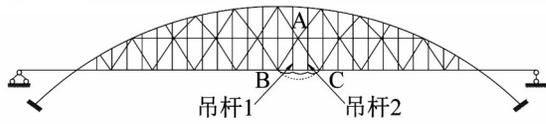


图4 吊杆布置示意图

Fig.4 Suspender arrangement

定性问题突出,故本文拱桥按传统中承式拱桥成桥后,及时加入三角网进行体系转换,使其具有较大的刚度,以抵御二期恒载、活载及其他荷载。本文拱桥的吊杆与三角网在空间上相互独立,受力上相互不干扰,是实现以不同形式承担不同荷载的关键。若在吊杆与三角网间增设联系,由于两者刚度差异,容易在连接处发生疲劳问题,故在空间布置上吊杆与三角网应相互独立。

所示。鉴于传统中承式拱桥随着跨径的增大,其稳

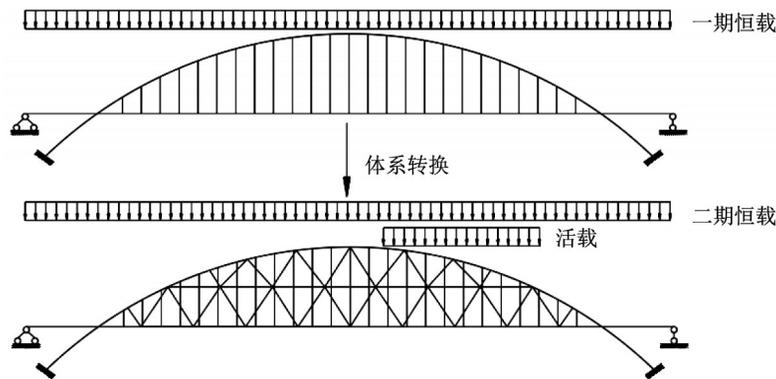


图5 结构体系转换

Fig.5 System conversion of construction

## 2 1 000m 级中承式拱桥试设计研究

### 2.1 结构设计简介

对1 000m级中承式拱桥进行试设计,以研究本文拱桥结构的力学性能。该试设计中关键参数包含

矢跨比、拱轴系数、拱肋内倾角度及三角网刚度等,通过优化此类参数,来满足千米级拱桥所需的各项力学性能(刚度、强度、稳定性及动力特性)。

#### 2.1.1 总体设计

本文方案为1 008m跨径中承式拱桥,结构布置如图6所示,材料用量见表1。该拱桥桥面宽度

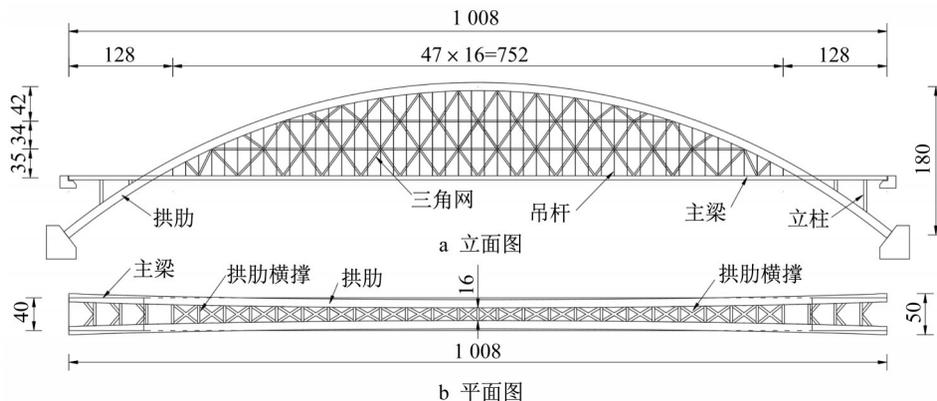


图6 本文拱桥总体布置(单位:m)

Fig.6 The layout of the presented arch bridge(Unit: m)

40m,两片拱肋中心间距40m,且两片拱肋各内倾3.5°,桥面以上两片拱肋之间采用X形横撑连接,桥面以下两片拱肋之间采用K形横撑连接。拱肋矢跨比为1/5.6,

矢高为180m,采用悬链线作为拱轴线,拱轴系数m取1.8。该桥共设置48对吊杆,吊杆间距16m,吊杆采用高强钢丝束,吊杆截面直径为0.12m。

表1 本文拱桥构件参数及用量

Tab. 1 The member parameter and usage of the presented arch bridge

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	箱型截面	Q345	77.315~120.889	78.432~101.539	1.821~2.038	32 837.000
		C50	/	/	/	29 644.000
拱肋横撑	箱型截面		0.353	0.469	0.181	2 796.300
三角网	带肋箱形截面	Q345	0.014	0.013	0.054	3 365.000
三角网横撑	箱型截面		0.011	0.016	0.033	166.000
主梁	箱型截面		3.114	7.734	11.550	11 638.900
立柱	箱型截面	Q345	0.283	0.425	0.139	281.100
		C50	/	/	/	1 898.000
吊杆	箱型截面	高强钢丝	$1.018 \times 10^{-5}$	$2.036 \times 10^{-5}$	0.011 3	611.900
合计用钢量:51 696.900t(1.282t·m <sup>-2</sup> ),混凝土用量:12 616.800m <sup>3</sup> (0.313 m <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> )						

2.1.2 拱肋设计

拱肋采用钢箱结构,拱肋截面高由拱顶处15m变化到拱脚处18m,宽度均为9m,拱脚外包30~50cm厚的混凝土(约110m长),其中外包混凝土与拱肋钢箱的受力分配上遵从刚度分配原则;拱肋截面形式如图7所示(不含拱脚外包混凝土)。两条拱肋之间设置足够的横联,采用X型撑和K型撑。

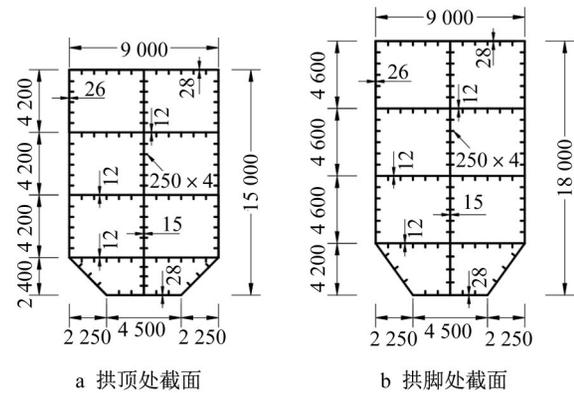


图7 拱肋截面(单位:mm)

Fig.7 The cross section of arch(Unit: mm)

2.1.3 主梁设计

主梁为钢箱梁,如图8所示,桥面宽为40m,高2.8m,桥面铺装为20cm厚混凝土,仅作为二期恒载,不参与结构受力;钢箱顶板设置U形肋,腹板及底板设置I字形形肋。

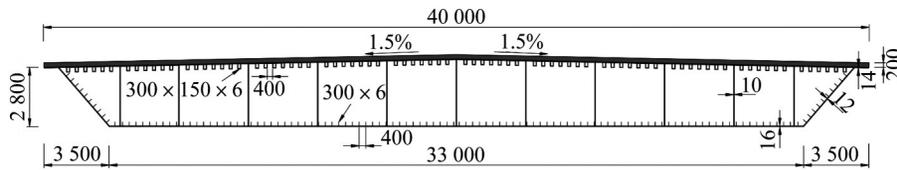


图8 主梁截面(单位:mm)

Fig.8 The cross section of main beam (Unit: mm)

2.1.4 三角网设计

三角网构件截面采用带肋箱形截面,如图9a所示。三角网节点为米字型节点,采用整体式节点设计,如图9b所示,三角网与吊杆的空间布置如图10所示,吊杆位于外层平面,三角网位于内层平面,且吊杆平行于三角网网面,与主梁法线夹角为3.5°。

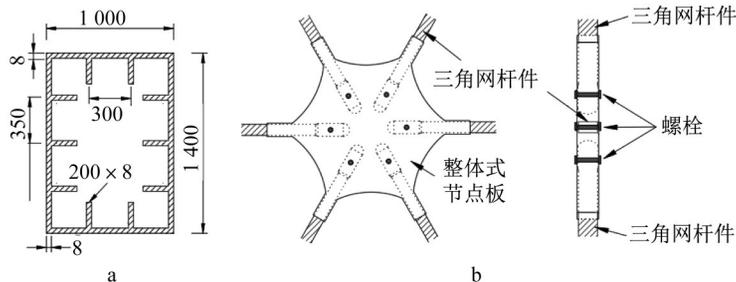


图9 三角网构件截面及整体式节点板示意图(单位:mm)

Fig.9 The cross section of member of triangle net and integral gusset plate(Unit: mm)

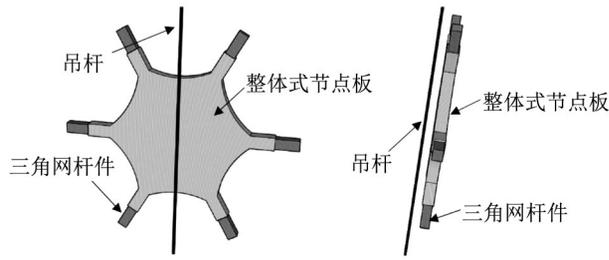


图10 三角网与吊杆空间布置图

Fig.10 Space layout of triangle net and suspender

## 2.2 有限元模拟及结果分析

为了研究本文方案的有效性,通过有限元建模分析其力学性能,并与用钢量相同(适当减少传统中承式拱桥拱肋的用钢量,将其作为三角网的用钢量)的传统中承式拱桥(及尼尔森体系拱桥(见图11~图12)进行对比,三者用钢量相类似,材料用量如表2和表3所示。

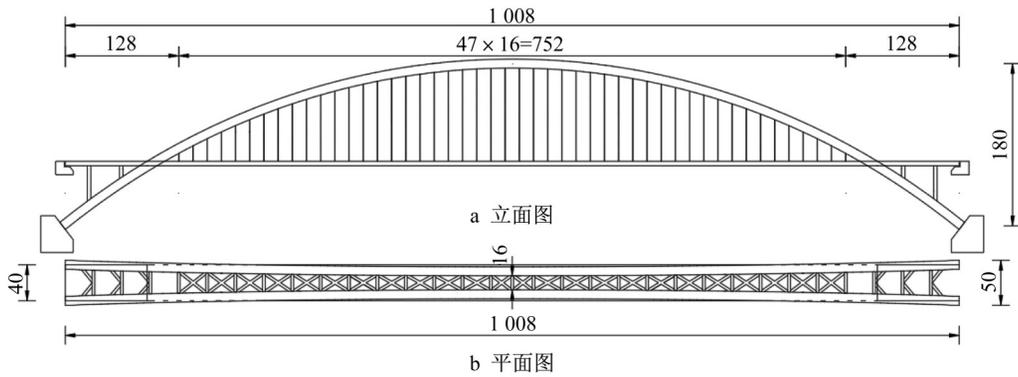


图11 传统拱桥结构布置(单位:m)

Fig.11 The layout of traditional arch bridge(Unit: m)

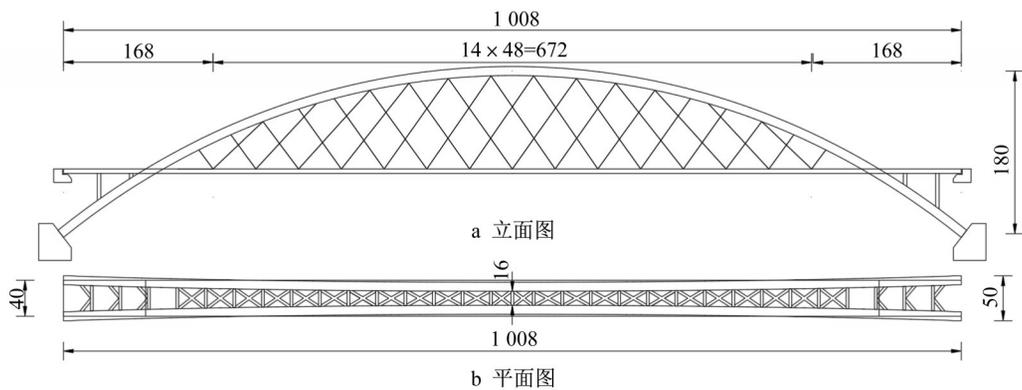


图12 尼尔森体系拱桥结构布置(单位:m)

Fig.12 The layout of arch bridge of Nielsen system (Unit: m)

表2 传统拱桥构件参数及用量

Tab. 2 The member parameter and usage of traditional arch bridge

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	箱型截面	Q345	85.416~157.465	93.601~133.874	1.963~2.283	36 374.000
		C50	/	/	/	31 970.000
拱肋横撑	箱型截面	Q345	0.353	0.469	0.181	2 796.300
主梁	箱型截面	Q345	3.114	7.734	11.550	11 638.900
立柱	箱型截面	Q345	0.283	0.425	0.139	281.100
		C50	/	/	/	1 898.000
吊杆	箱型截面	高强钢丝	$1.018 \times 10^{-5}$	$2.036 \times 10^{-5}$	0.0113	611.900
合计用钢量:51 702.200(1.282t·m <sup>-2</sup> ),混凝土用量:13 547.520m <sup>3</sup> (0.336 m <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> )						

### 2.2.1 有限元模型参数

采用Midas/Civil分别建立本文拱桥方案及传统拱桥方案的有限元模型,本文拱桥全桥共划分为

1 036个单元,790个节点;传统拱桥全桥共划分为666个单元,572个节点;尼尔森体系拱桥全桥共划分为659个单元,568个节点。三个模型均除吊杆采

表3 尼尔森体系拱桥构件参数及用量

Tab. 3 The member parameter and usage of nielsen system

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	箱型截面	Q345	85.416~157.465	93.601~133.874	1.963~2.283	36 374.000
		C50	/	/	/	31 970.000
拱肋横撑	箱型截面	Q345	0.353	0.469	0.181	2 796.300
主梁	箱型截面	Q345	3.114	7.734	11.550	11 638.900
立柱	箱型截面	Q345	0.283	0.425	0.139	281.100
		C50	/	/	/	1 898.000
吊杆	箱型截面	高强钢丝	$1.018 \times 10^{-5}$	$2.036 \times 10^{-5}$	0.0113	645.600
合计用钢量:51 735.900(1.283·m <sup>-2</sup> ),混凝土用量:13 547.520m <sup>3</sup> (0.336 m <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> )						

用桁架单元模拟,其余采用梁单元模拟,两者的有限元模型分别如图13~图15所示。

边界条件均设置为:主梁与桥台连接设置为弹性支撑,拱脚与拱座固结。

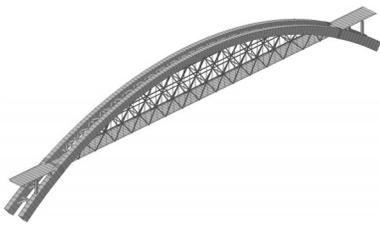


图13 本文拱桥有限元模型

Fig.13 Finite element model of the presented arch bridge

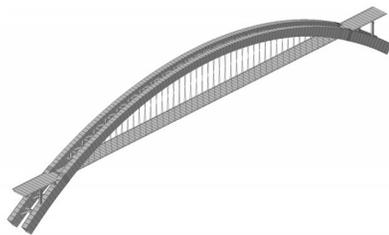


图14 传统中承式拱桥有限元模型

Fig.14 Finite element model of the traditional arch bridge



图15 尼尔森体系拱桥有限元模型

Fig.15 Finite element model of arch bridge of the nielsen system

### 2.2.2 结构强度及温度响应分析

据规范<sup>[26-27]</sup>要求,考虑4个荷载组合对结构进行强度及温度响应分析:①工况Ⅰ,1.2×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;④工况Ⅳ:整体降温。其中,汽车荷载等级为公路-I级,设计车道为双向10车道;二期恒载为200 kN·m<sup>-1</sup>的线均布荷载;考虑整体升温、降温10℃。计算结果见表4。

在工况Ⅰ作用下,拱桥拱肋最大应力为-193.5 MPa,传统拱桥为-184.8 MPa,尼尔森体系拱桥为-178.4 MPa,主要是前者拱肋截面较后两者减小,故其拱肋应力相对大。

但在工况Ⅱ作用下,本文拱桥拱肋最大应力小于传统拱桥,其主要原因是本文拱桥的刚度大,移动荷载引起的变形相对减小;本文拱桥拱肋应力略大于尼尔森体系拱桥,但本文拱桥吊杆及主梁最大应力均远小于尼尔森体系拱桥。且在移动荷载作用下,本文拱桥应力幅值为107.7 MPa,较传统拱桥及尼尔森体系拱桥分别减小了1.37%、22.96%。

在工况Ⅳ作用下,由于拱桥增加了超静定次数,使其在温度作用下拱肋最大应力较传统拱桥及尼尔森体系拱桥高。但在工况Ⅲ作用下,三者应力差值不大,均在限制以内。

表4 各工况下构件的最大应力

Tab. 4 The maximum stress of members under different working conditions

工况	拱桥	主拱肋	吊杆	腹杆		主梁	
				拉	压	拉	压
工况Ⅰ	本文拱桥	-193.5	281.6	118.9	-117.4	34.9	-32.1
	传统拱桥	-184.8	282.9	/	/	35.7	-30.2
	尼尔森体系	-178.4	612.8	/	/	119.6	-135.6
工况Ⅱ	本文拱桥	-208.3	410.7	156.9	-132.2	54.8	-48.4
	传统拱桥	-210.4	413.6	/	/	56.1	-49.1
	尼尔森体系	-193.6	808.1	/	/	166.1	-173.2
工况Ⅲ	本文拱桥	-209.2	411.4	169	-116.3	61	-47.8
	传统拱桥	-215.9	415.4	/	/	56.9	-48.8
	尼尔森体系	-200.5	854.4	/	/	166.6	-172.1
工况Ⅳ	本文拱桥	18.5	21.8	29.6	-52.2	11.2	/
	传统拱桥	-11.5	1.8	/	/	2.5	/
	尼尔森体系	12.5	44.1	/	/	6.7	/

注:“-”表示受压。

### 2.2.3 结构刚度分析

本文拱桥、传统拱桥及尼尔森体系拱桥最大下挠均发生于主梁1/4点处,如图16所示,由该点位移影响线可知,本文拱桥位移下挠峰值(0.006mm)较传统拱桥(0.023mm)、尼尔森体系拱桥(0.020mm)分别减少73.913%、70.000%;上挠峰值(0.002mm)较传统拱桥(0.009mm)、尼尔森体系拱桥(0.003mm)分别减少77.778%、33.333%。此外,从三者位移影响线与坐标轴围成面积还可看出,本文拱桥面积明显小于后两者拱桥,初步可见拱桥刚

度的优越性。再而,计算主梁在汽车活载作用下的挠度(结果见表5),计算结果表明:在汽车活载作用下,本文拱桥主梁上下挠度绝对值之和为110.0mm,传统拱桥为297.4mm,尼尔森体系拱桥为208.5mm,前者较后两者分别减少63.0%和47.2%。此外,三者主梁的位移包络图如图17所示,传统拱桥及尼尔森体系拱桥的上下挠包络图均呈“W”型,峰值较大,而本文拱桥则呈“扁平波浪”型,峰值相对较小。

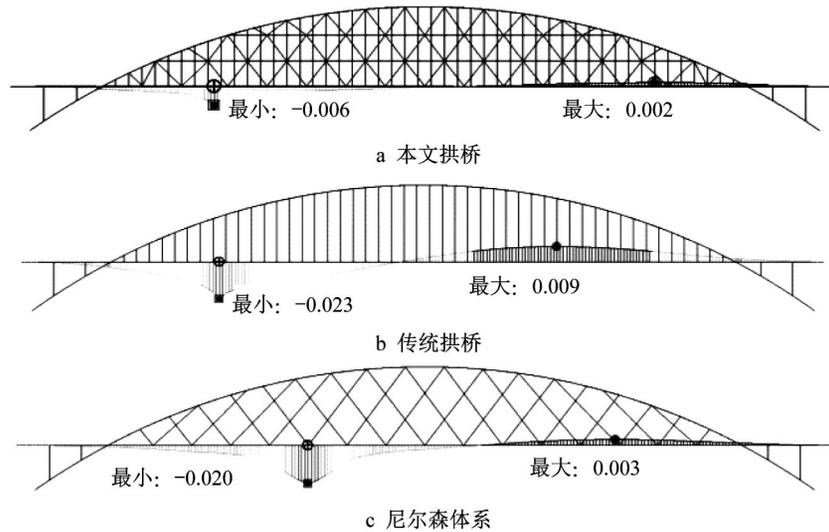


图16 主梁1/4点位移影响线(单位:mm)

Fig.16 Displacement influence line of main girder in 1/4 point (unit: mm)

表5 结构位移

Tab.5 Vertical displacement of structure

荷载	构件挠度类型	本文拱桥	传统拱桥	尼尔森体系	变化率/%
汽车活载	主梁最大下挠度/mm	80.5	183.8	159.1	-56.2,-49.4
汽车活载	主梁最大上挠度/mm	29.5	113.6	49.4	-74.0,-40.3
汽车活载	主梁上下挠度绝对值之和/mm	110.0	297.4	208.5	-63.0,-47.2

注:表中变化率计算公式:“ $100 \times (\text{本文拱桥} - \text{传统拱桥}) / \text{传统拱桥}$ ”,“ $100 \times (\text{本文拱桥} - \text{尼尔森体系}) / \text{尼尔森体系}$ ”。

由此可见,在结构用钢量相同时,在汽车活载作用下,本文拱桥主梁最大挠度远小于传统拱桥及尼尔森体系拱桥,同时,据规范<sup>[27]</sup>可知本文拱桥挠度远小于规范规定的限值要求。因此,本文做法对提高中承式拱桥的刚度是非常有效的,尤其适用于大跨度桥梁。

### 2.2.4 结构动力特性分析

结构频率计算结果见表6,振型图如图18~图19所示。本文拱桥基频为0.1513,传统拱桥为0.1323,尼尔森体系拱桥为0.1172,均为面外正对称振动,可见前者基频较后两者分别提高了14.4%、29.1%。本文拱桥首次发生面内振动的频率为0.3719,传统

拱桥为0.2226,尼尔森体系拱桥为0.3071,相比后两者,前者面内振动频率分别提高了67.1%、21.1%。由此可见,本文拱桥方案可同时提高面内、面外刚度,使结构的动力特性得到有效改善。

### 2.2.5 稳定性分析

#### (1) 一类稳定性分析

考虑恒载及活载同时作用,进行一类稳定性分析,其结果见表7。结果表明,传统拱桥的拱肋失稳临界系数为7.64,为拱肋面内压溃失稳;尼尔森体系拱桥的拱肋失稳临界系数为12.39,为面外失稳,且当失稳系数达到14.95时,发生拱肋面内压溃失稳;

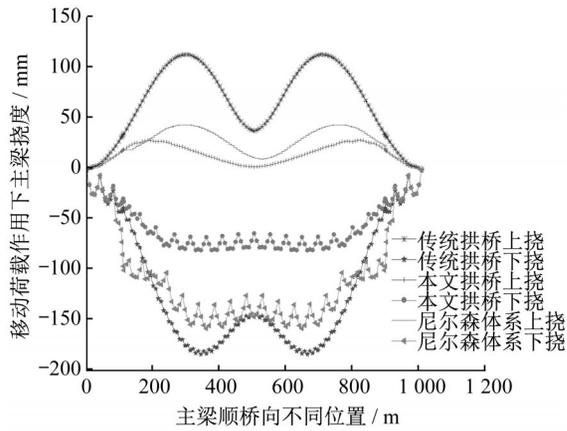


图 17 主梁的位移包络图

Fig.17 Displacement envelope of main beam

表 6 动力特性计算结果

Tab. 6 The results of dynamic characteristics

阶数	本文拱桥模态	本文拱桥	传统拱桥模态	传统拱桥	Hz	
					尼尔森体系模态	尼尔森体系
1	面外正对称	0.151 3	面外正对称	0.132 3	面外正对称	0.117 2
2	面外正对称	0.273 8	面内	0.222 6	面外正对称	0.237 7
3	面外反对称	0.341 6	面外正对称	0.235 3	面外反对称	0.296 7
4	面内	0.371 9	面内	0.263 9	面内	0.307 1

本文拱桥的拱肋失稳临界系数为 12.10, 为面外失稳, 且当失稳系数达到 38.83 时, 发生拱肋面内压溃失稳。可见, 本文拱桥方案不仅可提高拱肋的面外稳定性, 还大幅提高了拱肋的面内稳定性。

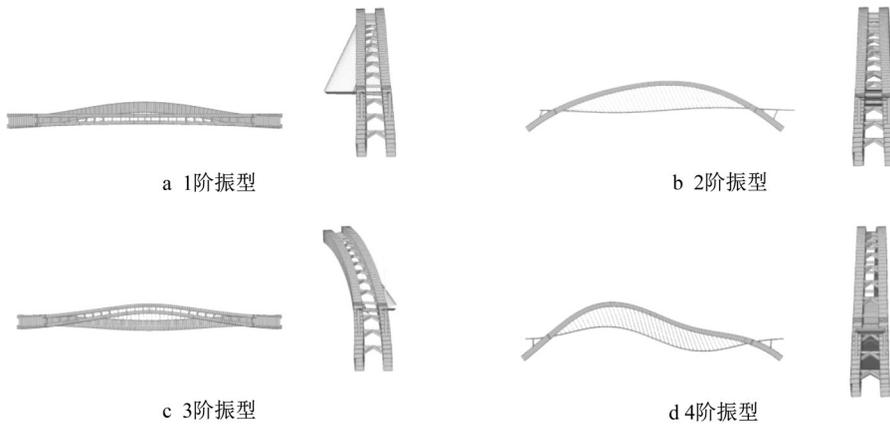


图 18 传统拱桥典型模态

Fig.18 Calculated mode shapes of ordinary arch bridge

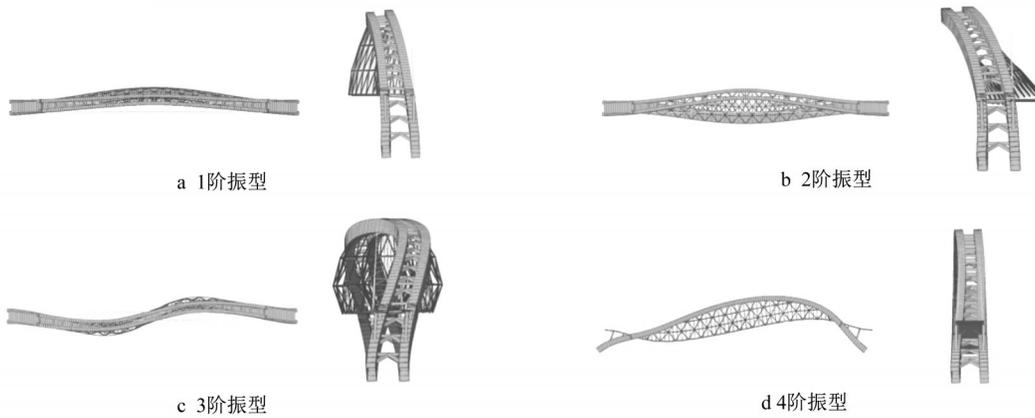


图 19 本文拱桥典型模态

Fig.19 Calculated mode shapes of presented bridge

表 7 一类稳定计算结果

Tab. 7 Calculation results of Category I stability

阶次	传统拱桥失稳模态	传统拱桥失稳系数	尼尔森体系失稳模态	尼尔森体系失稳系数	本文拱桥失稳模态	本文拱桥失稳系数
1	拱肋面内反对称	7.64	拱肋面外正对称	12.39	拱肋面外正对称	12.10
2	拱肋面内正对称	10.98	拱肋面内反对称	14.95	拱肋面外正对称	12.50
3	拱肋面外正对称	11.90	拱肋面外反对称	17.45	拱肋面外反对称	16.68
4	拱肋面外反对称	17.97	拱肋面内正对称	20.57	拱肋面外反对称	17.41

(2) 二类稳定性分析

考虑恒载及活载同时作用,进行二类稳定性分析,阶段/步骤时程图如图20~图22所示,由图中突变位置点的加载系数可知,本文拱桥的荷载系数为11.09,传统拱桥为7.06,尼尔森体系拱桥为11.55。结果表明:在考虑几何非线性的影响下,本文拱桥的二类稳定系数较传统拱桥提高了57.1%,与尼尔森体系拱桥差别不大,具有较好的稳定承载力。

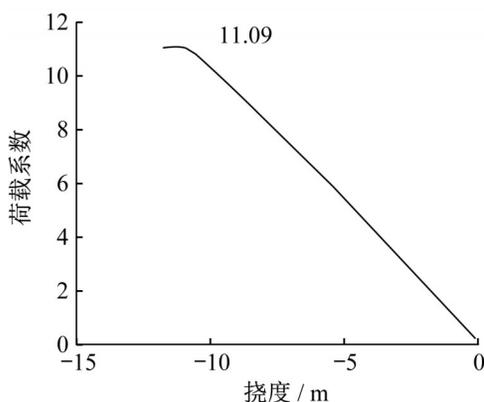


图20 本文拱桥阶段/步骤时程

Fig.20 Stage/step time history presented bridge

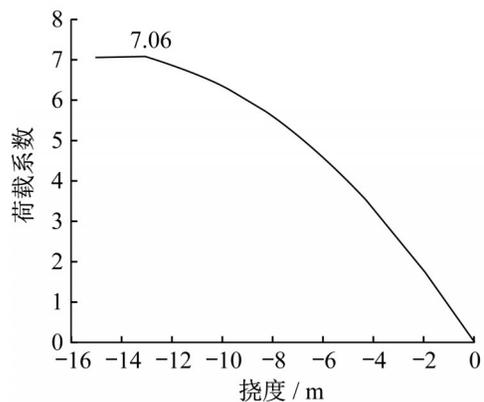


图21 传统拱桥阶段/步骤时程

Fig.21 Stage/step time history ordinary arch bridge

综上可知,传统拱桥稳定性远低于本文拱桥,尼尔森体系拱桥一类面外稳定性、二类稳定性虽较本

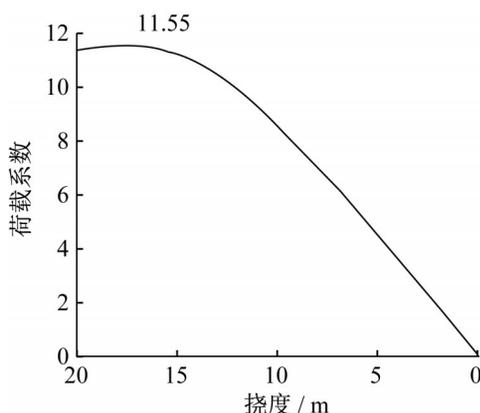


图22 本文拱桥阶段/步骤时程

Fig.22 Stage/step time history arch bridge of nielsen system

文拱桥略高2.39%、4.15%,但其一类面内稳定性较本文拱桥低68.84%。因此,本文拱桥方案既能提高面内稳定性,又能提高面外稳定性。

2.2.6 三角网疲劳分析

依据规范<sup>[27]</sup>对钢结构三角网做疲劳验算,按疲劳荷载计算模型I(采用等效的车道荷载,集中荷载为 $0.7P_k$ ,均布荷载为 $0.3q_k$ , $P_k$ 和 $q_k$ 按公路—I级车道荷载标准取值)计算构件的 $\sigma_{max}$ 、 $\sigma_{min}$ ,结果见表8及图23~图25,并进行验算如下:

$$\gamma_{Ff} \Delta \sigma_p \leq \frac{k_s \Delta \sigma_D}{\gamma_{Mf}} \quad (1)$$

$$\Delta \sigma_p = (1 + \Delta \phi) (\sigma_{pmax} - \sigma_{pmin}) \quad (2)$$

式中: $\gamma_{Ff}$ 为疲劳荷载分项系数,取1.0; $\gamma_{Mf}$ 为疲劳抗力分项系数,取1.35; $k_s$ 为尺寸效应折减系数,取1.0; $\Delta \sigma_p$ 为按疲劳荷载计算模型I计算得到的正应力幅(MPa); $\Delta \phi$ 为放大系数,取0; $\Delta \sigma_D$ 为正应力常幅疲劳极限(MPa); $\Delta \sigma_{pmax}$ 、 $\Delta \sigma_{pmin}$ 为将疲劳模型按最不利情况加载于影响线(以11号杆件为例说明:杆件1/2点应力影响线如图26所示,荷载图示布置时,应力最大)得出的最大和最小正应力(MPa)。

结果表明,构件最大应力幅为81.1Mpa,在限值以内。

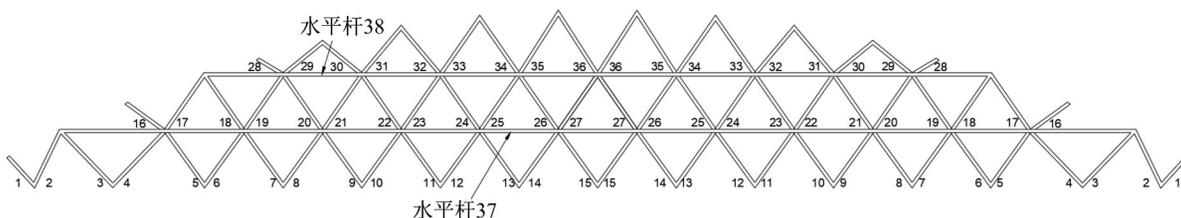


图23 三角网杆件编号

Fig.23 The numbering of members

表8 构件应力和应力幅验算结果

Tab. 8 The results of stress and stress amplitudes

杆件编号	$\sigma_{max}/\text{Mpa}$	$\sigma_{min}/\text{Mpa}$	$(\sigma_{max} - \sigma_{min})/\text{Mpa}$	杆件编号	$\sigma_{max}/\text{Mpa}$	$\sigma_{min}/\text{Mpa}$	$(\sigma_{max} - \sigma_{min})/\text{Mpa}$
1	32.6	-48.5	81.1	20	21.7	-13.0	34.7
2	49.7	-26.4	76.1	21	18.7	-14.9	33.6
3	29.6	-14.5	44.1	22	21.8	-13.7	35.5
4	19.2	-16.7	35.9	23	19.9	-14.4	34.3
5	24.4	-11.4	35.8	24	21.8	-13.8	35.6
6	20.1	-15.7	35.8	25	20.4	-14.2	34.6
7	25.4	-12.6	38.0	26	21.4	-13.9	35.3
8	21.7	-16.8	38.5	27	20.9	-14.0	34.9
9	25.2	-14.3	39.5	28	18.6	-10.4	29.0
10	23.6	-16.5	40.1	29	12.1	-9.0	21.1
11	25.7	-15.4	41.1	30	17.7	-11.8	29.5
12	24.7	-16.5	41.2	31	14.9	-10.9	25.8
13	26.0	-15.9	41.9	32	18.9	-12.7	31.6
14	25.4	-16.5	41.9	33	17.2	-12.8	30.0
15	25.8	-16.3	42.1	34	19.3	-13.5	32.8
16	22.7	-11.6	34.3	35	18.5	-13.7	32.2
17	14.7	-10.8	25.5	36	19.2	-13.9	33.1
18	23.2	-10.8	34.0	37	2.7	-8.4	11.1
19	15.8	-15.0	30.8	38	6.5	-10.7	17.2

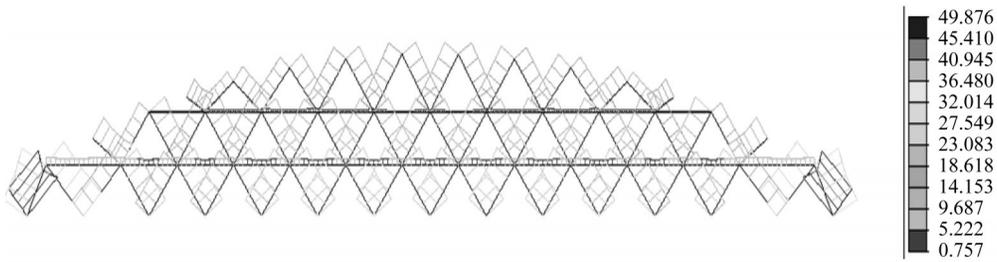


图24  $\sigma_{max}$  云图(单位: Mpa)

Fig.24 The nephogram of  $\sigma_{max}$ (Unit: Mpa)

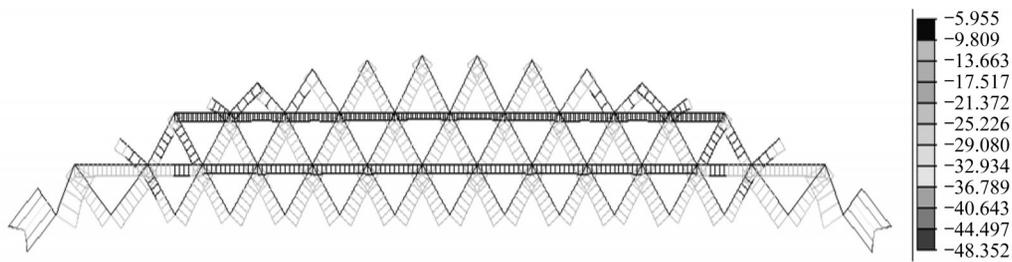


图25  $\sigma_{min}$  云图(单位: Mpa)

Fig.25 The nephogram of  $\sigma_{min}$ (Unit: Mpa)

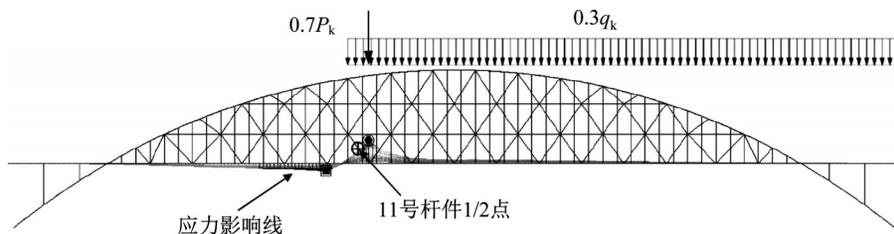


图26 加载示意图

Fig.26 Schematic diagram of loading

### 3 结论

提出一种拱桥方案,阐述了其结构形式及力学原理,并对1 008m跨径中承式拱桥进行试设计,得出以下结论:

(1)具有良好的经济性和可行性。平均每平米用钢量为 $1.282\text{ t}\cdot\text{m}^{-2}$ ,;每平米混凝土用量为 $0.313\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}$ ,每平米自重为 $2.065\text{ t}\cdot\text{m}^{-2}$ ,仅为文献[25]中跨径800mUHPC组合桁式拱桥( $2.904\text{ t}\cdot\text{m}^{-2}$ )的71.1%左右。

(2)强度承载力满足要求。经恒载、活载、温度等荷载组合后,本文拱桥最大应力为209.2MPa,满足规范要求。

(3)结构整体刚度大。在汽车活载作用下,本文拱桥主梁上下挠度绝对值之和为110.0mm,传统拱桥为297.4mm,尼尔森体系拱桥为208.5mm,前者较后两者分别减少63.0%、47.2%。此外,由两者主梁的位移包络图可知,传统拱桥及尼尔森体系拱桥的上下挠包络图均呈“W”型,峰值较大,而本文拱桥则呈“扁平多波浪”型,峰值相对较小。

(4)结构稳定性良好,结构动力性得到有效改善。结构一类稳定分析:本文拱桥失稳临界系数为12.10,为面外失稳,且前200阶振型中未见其面内失稳,可见本文拱桥稳定性良好。结构二类稳定分析:本文拱桥的稳定系数(11.09)比对传统拱桥(7.06)得到大幅度提高,与尼尔森体系拱桥(11.55)差别不大,具有较好的稳定承载力。

(5)本文拱桥、传统拱桥及尼尔森体系拱桥的基频分别为0.1513、0.1323、0.1172,均为面外正对称振动,可见前者较后两者基频分别提高了14.4%、29.1%。三者首次发生面内振动的频率分别为0.3719、0.2226、0.3071,相比后两者,前者面内振动频率提高了67.1%、21.1%,可见结构动力性得到了有效改善。

(6)疲劳幅值满足规范要求。疲劳验算表明,钢结构三角网最大应力幅为81.1MPa,满足规范(JTG D64—2015)规定的疲劳容许应力幅。

(7)采用整体式节点,简化结构构造,并采用预制拼装方法,施工方便。本文拱桥三角网节点为米字型节点,且全桥节点数量多,为简化结构构造,采用整体式节点。施工上,整体式节点板及杆件于工厂预制加工,再运至现场拼装,施工方便快捷。本方案三角网的具体设计细节,如节点设计、三角网刚度设置等将另文研究。

综上所述,跨径达到1 000m时,传统拱桥稳定性

问题突出、刚度下降很快,而尼尔森体系拱桥刚度虽略优于传统拱桥,但是吊杆应力幅值较大、面内稳定系数仍较低。与之相比,本文所提出的拱桥方案不仅面内、外稳定性得到提高,且刚度远超过尼尔森体系,同时吊杆的应力幅值比尼尔森体系拱桥低约23%,不容易出现疲劳问题。因此,在以刚度及稳定性控制为主的千米级跨度拱桥设计中,本文拱桥方案具有可行性。

#### 作者贡献说明:

谢肖礼:论文研究的主要构思者及负责人,指导数据分析及论文写作。

杨创捷:本论文的主要撰写人,完成数据分析及论文初稿的写作。

邱辰:指导数据分析及论文写作,完成论文投稿及修改。

苏浩林:参与数据收集与分析及文献资料收集与整理。

#### 参考文献:

- [1] 肖汝诚.桥梁结构体系[M].北京:人民交通出版社,2013.  
XIAO Rucheng. Bridge structural systems[M]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [2] 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.  
XIE Xiaoli, QIN Xia, OUYANG Ping, et al. An effective method to improve the stiffness of arch-beam fixed arch bridges[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2019, 47(6): 747.
- [3] 王睿.高原山区大跨度铁路拱桥施工关键技术[J].桥梁建设,2020,50(1):105.  
WANG Rui. Key construction techniques for long-span railway arch bridge in mountainous region of plateau [J]. Bridge Construction, 2020, 50(1): 105.
- [4] 李杰.600m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 600m super-span reinforced concrete arch bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2015.
- [5] 陈宝春,刘君平.世界拱桥建设与技术发展综述[J].交通运输工程学报,2020,20(1):27.  
CHEN Baochun, LIU Junping. Review of construction and technology development of arch bridges in the world[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(1): 27.
- [6] CHENG Jin, JIN Hui. Reliability-based optimization of steel truss arch bridges[J]. International Journal of Steel Structures, 2017, 17(4): 1415.
- [7] 刘盼,陈雁云.钢桁架拱桥主拱提升系统的设计[J].公路交通科技,2018,35(S1):110.  
LIU Pan, CHEN Yanyun. Designing of lifting system for main arch of steel truss arch bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(S1): 110.

- [8] CHEN Qiang, ZHANG Yun, XIANG Huawei, *et al.* Construction control techniques of long-span steel truss arch bridges [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2015, 9(1): 35.
- [9] 汤生虎,陈爱东,许成明,等.重庆朝天门长江大桥高强度螺栓群栓试验研究[J].*中国港湾建设*,2012(2):25.  
TANG Shenghu, CHEN Aidong, XU Chengming, *et al.* Experiment and study of high-strength cluster bolts for yangtze river bridge at chaotianmen, chongqing [J]. *China Harbour Engineering*, 2012(2): 25.
- [10] 范亮,龚尚龙,陈思甜.特大跨径钢管拱桥施工过程模型试验[J].*西南交通大学学报*,2010,45(4):502.  
FAN Liang, GONG Shanglong, CEHN Sitian. Model experiment of construction process of long-span steel truss bridge[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2010, 45(4): 502.
- [11] LI Yan, QIN Lihui, LI Zhao, *et al.* Dynamic performance of strengthened concrete-filled steel tubular arch bridge due to moving vehicles[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2019, 32(1).
- [12] LIU Changyong, WANG Yuyin, Wu Xinrong, *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] WU Di, GAO Wei, Sawekchai Tangaramvong . Time-dependent buckling analysis of concrete-filled steel tubular arch with interval viscoelastic effects[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2017, 143(7): 04017055.
- [14] ZHENG Jieliang, WANG Jianjun. Concrete-filled steel tube arch bridges in China[J]. *Engineering*, 2018, 4(1): 306.
- [15] 欧阳平,林增海,米德才,等.平南三桥桥型方案设计研究[J].*中外公路*,2020,40(3):177.  
OUYANG Ping, LIN Zenghai, MI Decai, *et al.* Study on bridge scheme design of the third nanning bridge[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2020, 40(3): 177.
- [16] 韩玉,杜海龙,秦大燕,等.平南三桥施工重难点及关键技术研发[J].*公路*,2019,64(10):140.  
HAN Yu, DU Hailong, QIN Dayan, *et al.* Research and development of key construction points and key technologies of the Third Nanning Bridge[J]. *Highway*, 2019, 64(10): 140.
- [17] 郑皆连,王建军,牵廷敏,等.700m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.  
ZHENG Jieliang, WANG Jianjun, MOU Tingmin, *et al.* Feasibility study on design and construction of concrete filled steel tubular arch bridge with a span of 700m [J]. *Engineering Science*, 2014, 16(8): 33.
- [18] 杨国静,徐勇,黄毅.大跨度劲性骨架拱桥外包混凝土方案优化[J].*铁道工程学报*,2017,34(10):50.  
YANG Guojing, XU Yong, HUANG Yi. The outer-covered concrete construction scheme optimization of the long-span concrete arch bridge with stiff skeleton [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2017, 34(10): 50.
- [19] 姚国文,晁阳,吴海军,等.中承式钢管混凝土劲性骨架拱桥拱肋吊装施工控制[J].*桥梁建设*,2017,47(5):107.  
YAO Guowen, CHAO Yang, WU Hai-jun, *et al.* Construction control of hoisting and installation of arch rib of a half-through cfst stiff skeleton arch bridge [J]. *Bridge Construction*, 2017, 47(5): 107.
- [20] 赵人达,张正阳.我国钢管混凝土劲性骨架拱桥发展综述[J].*桥梁建设*,2016,46(6):45.  
ZHAO Renda, ZHANG Zhengyang. A Summary of development of concrete-filled steel tube framed arch bridges in china[J]. *Bridge Construction*, 2016, 46(6): 45.
- [21] 吕梁,钟汉清,辜友平,谢海清,赵雷.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.  
LÜ Liang, ZHONG Hanqing, GU Youping, *et al.* Nonlinear stability assessment of main arch ring during the whole construction process of beipan river super major bridge on Shanghai-Kunming high speed railway [J]. *Railway Standard Design*, 2020, 64(2): 101.
- [22] 郑益新,张鸿昆.沪昆客专北盘江特大桥劲性骨架施工控制研究[J].*铁道科学与工程学报*,2015,12(3):496.  
ZHENG Yixin, ZHANG Hongkun. Study on construction control of the stiff skeleton of Beipanjiang long span bridge on Shanghai-Kunming high-speed railway[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2015, 12(3): 496.
- [23] 闫瑾,上官兴.600m拉索钢管拱桥设计新思维[J].*公路*,2012(6):69.  
YAN Jin, SHANGGUAN Xing. New thinking of 600m cable steel tube arch bridge design[J]. *Highway*, 2012(6): 69.
- [24] 谢肖礼,付元杰,邓年春.700m级中承式缆拱桥设计[J].*西南交通大学学报*,2019,54(6):1162.  
XIE Xiaoli, FU Yuanjie, DENG Nianchun. Design of half-through cable-arch bridge with 700 m main span[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2019, 54(6): 1162.
- [25] 邵旭东,何广.800m级钢-UHPC组合桁式拱桥概念设计与可行性研究[J].*中国公路学报*,2020,33(2):73.  
SHAO Xudong, HE Guang. Conceptual design and feasibility study of an 800m scale steel-UHPC composite truss arch bridge [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(2): 73.
- [26] 中交公路规划设计院.公路桥涵设计通用规范: JTG D60-2015 [S].北京:人民交通出版社,2015.  
CCCC Highway Consultants. General specifications for design of highway bridge and culverts: JTG D60-2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [27] 中交公路规划设计院.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.  
CCCC Highway Consultants. Specifications for design of highway steel bridge: JTG D64-2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.