

# 提高拱梁固结拱桥刚度的有效方法

谢肖礼, 覃霞, 欧阳平, 喻泽成, 黄扬

(广西大学土木建筑工程学院, 广西南宁 530004)

**摘要:** 拱梁固结拱桥通过主梁作为刚性系杆来平衡拱的推力,但也带来结构刚度下降的不利影响,这使该类拱桥在高速铁路上的应用受到了一定的限制,为了解决这个问题,提出一种新的拱桥加以解决.其做法是,首先在每条拱肋和主梁之间增加 10 根刚性斜杆与拱肋及主梁节段形成 11 个三角形结构,尽可能通过三角形角点对拱肋均匀约束,提高拱肋的线刚度;其次,保证有三角形角点落在原结构拱肋位移包络图的最大位移处及主梁跨中位置处,使主梁或拱肋的薄弱点得到加强,线刚度亦得到提高.研究表明,新型拱桥在材料增加很少甚至相同的条件下,其整体刚度均能大幅度提高.还对疲劳和温度响应作了深入的研究,通过有限元分析表明,该结构对疲劳和温度也有很好的适应性.新型拱桥良好的刚度特性对高速铁路桥特别适用.

**关键词:** 拱梁固结拱桥; 高速铁路; 线刚度; 三角形结构; 刚度; 疲劳

**中图分类号:** U24

**文献标志码:** A

## An Effective Method to Improve the Stiffness of Arch-beam Fixed Arch Bridges

XIE Xiaoli, QIN Xia, OUYANG ping, YU Zecheng, HUANG Yang

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

**Abstract:** The main beam of a Arch-beam fixed arch bridge acts as a rigid tie rod to balance the thrust of arches, but it also has the adverse effect of structural stiffness decrease. This has limited the application of this type of arch bridge on high-speed railways. In order to solve this problem, this paper proposes a new arch bridge. The method is, first of all, to add 10 rigid diagonal bars between each ribs and the main beam to form 11 triangle structures with the main beam and the each ribs segments. As far as possible, the arch ribs and the main beam are equally divided by triangular corner points so that the line stiffness of the arch ribs and the main beam are

improved. Secondly, according to the original structure displacement envelope diagram, it is guaranteed that the triangular corner points fall at the position of maximum displacement and the mid-span of main beam so that the weakness of arch ribs is strengthened. Studies have shown that the overall stiffness of the new arch bridge can be significantly improved under the condition that the material increases little or even the same. In this paper, the fatigue and temperature responses are also discussed in detail, and finite element analysis shows that the structure also has good adaptability to fatigue and temperature. And the superior stiffness characteristics of the new arch bridge are particularly suitable for high-speed railway bridges.

**Key words:** arch-beam fixed arch bridge; high-speed railway; line stiffness; triangle structure; stiffness; fatigue

拱桥<sup>[1-3]</sup>在受力性能方面具有极大优越性,且景观性好,是高速铁路桥梁<sup>[4-5]</sup>中最为常用的桥型.国内著名的如南广铁路西江特大桥<sup>[6]</sup>是目前世界上最大跨度的高速铁路拱桥(图 1),计算跨径达 450 m;武广高铁桥梁中的一座一孔 80 m 下承式推力拱桥是世界高速铁路首座下承式椭圆形钢箱砼推力拱桥;此外还有武广铁路客运专线的汀泗河特大桥<sup>[7-8]</sup>(图 2)、贵广高速铁路的东平水道特大桥<sup>[9]</sup>和京沪高速铁路的南京大胜关长江大桥<sup>[10-11]</sup>等.国外有法国地中海高速铁路线上的栋泽尔桥和 Avignon 桥,布鲁塞尔—德国边界高速铁路线上的 Wisele bridge<sup>[12]</sup>等.

为满足铁路高速行车的要求<sup>[13]</sup>,在拱桥的设计中,需着重关注结构体系的选择和刚度、变形的问题<sup>[14]</sup>.当前高速铁路拱桥首选的结构体系为简支拱桥<sup>[15]</sup>,但对于大跨径的简支拱桥,梁端竖向转角过大对高速行车极为不利.拱梁固结体系<sup>[16]</sup>虽可做到

收稿日期: 2018-08-13

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,博士生导师,工学博士,主要研究方向为桥梁结构新体系. E-mail: xxl2002gxu@sina.com

通信作者: 欧阳平(1973—),男,教授级高工,博士生,主要研究方向为桥梁结构新体系. E-mail: guxixiaoli@126.com

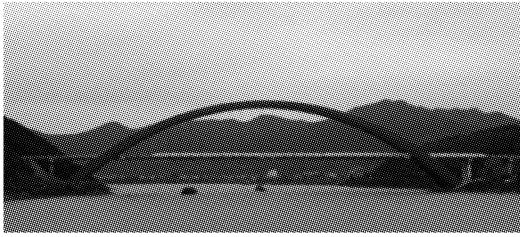


图 1 西江特大桥  
Fig.1 Xijiang Bridge



图 2 汀泗河特大桥  
Fig.2 Dingsi Bridge

无推力且能有效约束梁端竖向转角,但是随着跨径增大、桥宽增加及列车速度越来越快,其结构刚度已远不能满足高铁安全舒适运行的要求,如何使该体系桥梁获得更大的刚度以提高高铁运行速度和行车舒适性已成为近年来学者们研究的重要课题<sup>[17-19]</sup>。

为了解决上述的问题,本文提出一种新的拱桥加以解决,以下简称本文拱桥,如图 3、4 所示。本文主要介绍新型拱桥的结构形式及力学原理,并通过有限元分析其刚度、承载力、稳定性及动力特性的影响,并对疲劳和温度响应作了研究。

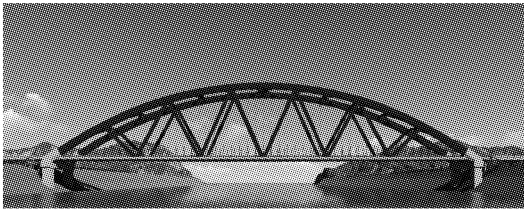


图 3 本文拱桥立面效果图  
Fig.3 The effect drawing of presented bridge

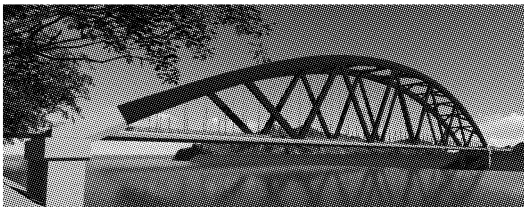


图 4 本文拱桥侧面效果图  
Fig.4 The side view of presented bridge

## 1 提高拱梁固结拱桥刚度的有效方法

为提高拱梁固结拱桥的刚度,扩大其在高速铁

路上的应用范围,本文提出一种有效方法对通常拱桥(以下称对照拱桥)进行改造,其主要由拱肋、主梁、刚性斜杆、柔性吊杆和横撑组成,具体如图 5 所示。现对新结构的力学原理解析如下:

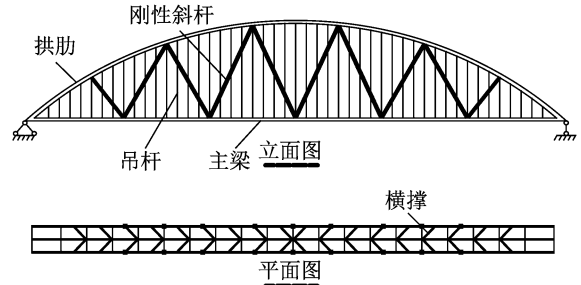


图 5 本文拱桥结构布置  
Fig.5 Structure of presented bridge

### 1.1 引入三角形理念对拱肋及主梁进行有效约束

本文拱桥充分利用了三角形稳定性原理,在拱肋和主梁之间增加 10 根刚性斜杆与拱肋及主梁节段形成 11 个三角形,通过稳定性极好的三角形对拱肋及主梁进行约束,同时提高拱肋及主梁的线刚度,形成一个以拱肋为上弦杆主梁为下弦杆的变高桁架,整体刚度大幅度提高。可见,本文拱桥与传统拱梁固结拱桥在结构上有本质区别,同时拱肋、主梁及柔性吊杆的刚度设置亦与传统组合体系拱桥不同。此外,为保证杆件的局部稳定性,可在两斜杆之间设置横联。

### 1.2 三角形角点的合理布置

在恒载作用下,主梁的位移曲线如图 6 所示( $l$  为跨径),其最大变形位置发生在跨中( $w_{zmax}$  为主梁挠度最大值);拱肋的位移包络图如图 7 所示,其最大位移出现在  $1/4$  及  $3/4$  附近( $w_{gmax}$  为拱肋挠度最大值)。结合结构的变形特征,三角形角点布置的方法是:首先,尽可能通过三角形角点对拱肋均匀约束,提高拱肋的线刚度;其次,保证有约束点落在原结构拱肋位移包络图的最大位移处及主梁跨中位置处,使主梁或拱肋的薄弱处得到加强,线刚度亦得到提高。

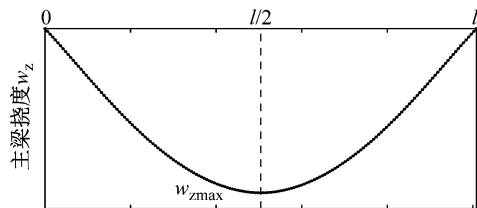


图 6 在恒载作用下主梁位移图  
Fig.6 Deformation of girder under dead load

### 1.3 适时完成体系转换以保留拱结构的优越性

本文拱桥按拱梁固结拱桥成桥后(即上完一期、

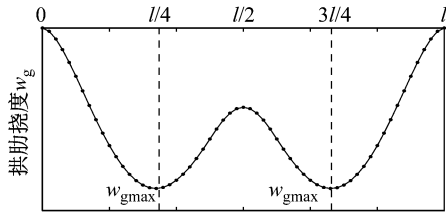


图 7 拱肋位移包络图

Fig.7 Displacement envelope of arch ribs

二期恒载),再安装刚性斜杆及其横联完成体系转换,从而最大限度地保留了拱肋在恒载状态下的优点.刚性斜杆与拱肋及主梁节段所形成的三角形结构参与抵抗活载及其他荷载,并减小结构在移动荷载下的变形.由此可见,本文拱桥保留了传统拱桥的优点,弥补了其不足之处,且未增加施工难度.

## 2 算例分析

为了研究本文改进方法的有效性,以下均以双线高速铁路桥为例,通过有限元建模分析其刚度、强度、稳定性、动力特性、温度响应、构件疲劳等问题.

### 2.1 本文拱桥的刚度分析

以下以三个类型的算例进行研究:一是在对照拱桥上增加刚性斜杆,对比分析结构的刚度;二是两者用钢量相同时对比分析它们的刚度差异;三是验证在不同跨径下本文方法的有效性.

根据规范<sup>[20]</sup>要求,以下算例主要考虑以下三个荷载组合对结构进行刚度分析:

- ① 组合 I,车活载+0.5 倍温度荷载;
- ② 组合 II,0.63 倍列车活载+温度荷载;
- ③ 组合 III,列车活载.其中,列车荷载为双线高速铁路,初始温度为 20℃,升温 20℃,降温 25℃.

#### 2.1.1 在对照拱桥上增加刚性斜杆时结构的刚度变化

以 506 m 跨径为例,矢跨比均为 1/5,拱轴线均采用抛物线,本文拱桥与对照拱桥的有限元模型分

别如图 8 所示.为研究在对照拱桥基础上直接增加刚性斜杆时结构的刚度变化,在对照拱桥每条拱肋中增加 10 根刚性斜杆,该用钢量为 2 044.7 t,占总用钢量 7.75%.拱肋截面如图 9 所示,其余材料参数、截面形式、单元类型、材料具体用量详见表 1.

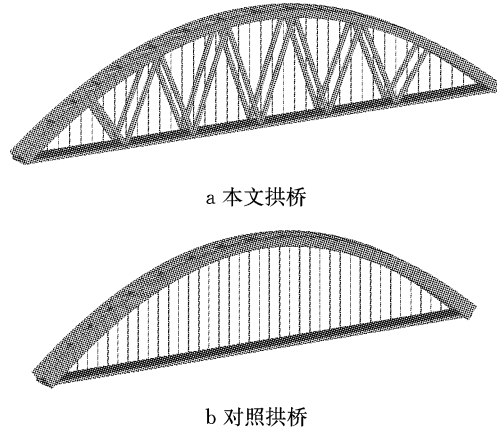


图 8 有限元模型

Fig.8 Finite element model

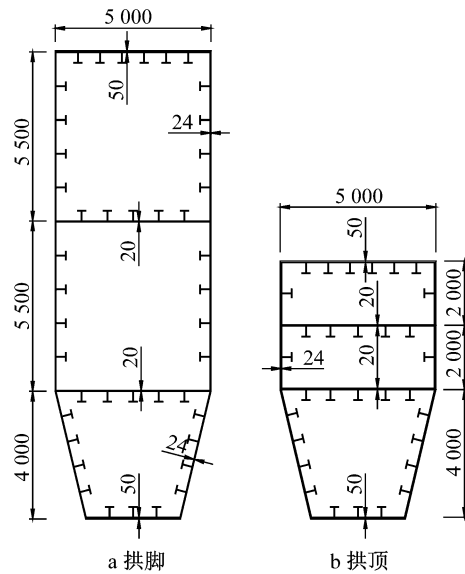


图 9 拱肋截面(单位:mm)

Fig.9 The cross section of arch ribs (unit: mm)

表 1 构件参数及材料用量

Tab.1 Parameters and amount of steel of members

构件	截面形式	材料	单元类型	截面惯性矩/ $m^4$	扭转惯性矩/ $m^4$	截面积/ $m^2$	用量/t
对照拱桥拱肋	箱型	Q420	梁单元	10.784~20.136	8.076~11.494	1.554~1.790	14 617.4
刚性斜杆	箱型	Q420	梁单元	0.159 1~0.180 2	0.127 1~0.152 2	0.127 5~0.175 1	2 044.7
吊杆	圆形	高强钢丝	索单元	$2.552 \times 10^{-5}$	$5.104 \times 10^{-5}$	0.017 9	786.7
主梁	格子梁	Q345	梁单元				6 917.9
横撑	箱型	Q345	梁单元	1.199 8	1.189 5	0.408	2 003.0

在活载作用下,主梁的挠度计算结果见表 2 及图 10.计算结果表明:在荷载组合 I 作用下,本文拱桥主梁最大挠度为 116.6 mm,对照拱桥为 354.2

mm,相比之下前者变形减少了 67.1%;在荷载组合 II 作用下,两者主梁最大挠度分别为 73.9 mm 和 222.8 mm,相比之下前者变形减少 66.8%;在荷载

表 2 2.1.1 节算例的结构挠度

Tab.2 Structural deflection of the example in 2.1.1

组合	构件挠度类别	对照拱桥	本文拱桥	变化率/%	容许值
I	主梁最大挠度/mm	354.6	116.6	-67.1	504
II	主梁最大挠度/mm	222.8	73.9	-67.0	504
III	主梁最大挠度/mm	354.5	116.3	-67.2	504
III	1/4 跨处主梁上下挠度(绝对值)之和/mm	602.0			630

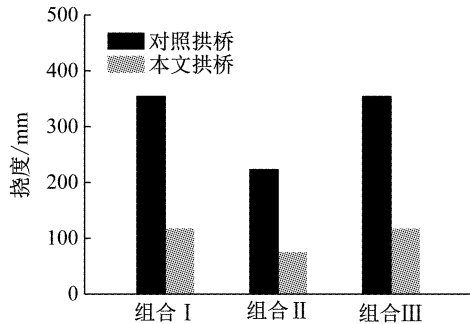


图 10 两者的主梁位移对比

Fig. 10 Comparison of displacement of main beam between presented bridge and contrast bridge

组合 III 作用下,两者主梁最大挠度分别为 116.3 mm 和 354.1 mm,相比之下前者变形减少 67.2%。此外,在荷载组合 III 作用下,对照拱桥 1/4 跨处主梁上下挠度(绝对值)之和为 602 mm,而本文拱桥在最不利的工况下没有翘翘板效应,主梁不存在上挠,故本文拱桥 1/4 跨处主梁上下挠度(绝对值)之和不作统计比较。

分析可知,在用钢量增加不多的情况下,结构的各项位移值均大幅度减少,最高达 3 倍,单位挠度降

表 3 2.1.2 节算例的结构挠度

Tab.3 Structural deflection of the example in 2.1.2

组合	构件挠度类型	对照拱桥	本文拱桥	变化率/%	容许值
I	主梁最大挠度/mm	354.6	122.5	-65.4	504
II	主梁最大挠度/mm	222.8	77.6	-65.2	504
III	主梁最大挠度/mm	354.5	122.2	-65.5	504
III	1/4 跨处主梁上下挠度(绝对值)之和/mm	602.0			630

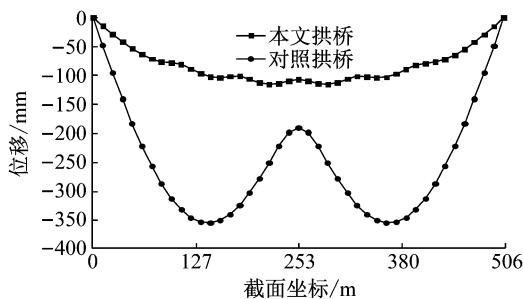


图 11 主梁的位移包络图

Fig. 11 Displacement envelope of main beam

由此可见,结构用钢量相同时,在按规范要求的不同活载组合作用下,本文拱桥主梁最大挠度均远小于原桥,同时远小于规范规定的限值要求。因此,

低量所需用钢量仅约为  $8.5 \text{ t} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。由此可见,本文方法亦可用于改造刚度不足的下承式现役拱桥。

### 2.1.2 用钢量相同时本文拱桥与对照拱桥刚度对比

该算例中本文拱桥和对照拱桥矢跨比均为 1/5,拱轴线均采用抛物线。为保证结构用钢量相同,从对照拱桥拱肋中减少 2 044t 用钢量作为刚性斜杆。本算例中,两者用钢量均约为 2.4 万 t。

在活载作用下,本文拱桥与对照拱桥主梁的挠度计算结果见表 3。计算结果表明:在荷载组合 I 作用下,本文拱桥主梁最大挠度为 122.5 mm,对照拱桥为 354.2 mm,相比之下前者变形减少 65.4%;在荷载组合 II 作用下,两者最大挠度分别为 77.6 mm 和 222.8 mm,前者变形减少 65.2%;在荷载组合 III 作用下,两者最大挠度分别为 122.2 mm 和 354.5 mm,前者变形减少 65.5%。此外,由两者主梁的位移包络图可知,对照拱桥的包络图呈“W”型,峰值非常大,而本文拱桥则呈“扁平多波浪”型,峰值相对较小,具体如图 11 所示。

本文方法对提高拱梁固结拱桥的刚度是非常有效的。

### 2.1.3 不同跨径下本文方法的有效性

为研究跨径逐渐增大时,本文方法对提高拱梁固结拱桥刚度的有效性,在算例 2.1.2 节的基础上通过有限元再建立跨径为 312m 及 408m 的本文拱桥模型,计算其在活载作用下主梁的位移及 1/4 跨处主梁上下挠度(绝对值)之和,并与材料用量相同的对照拱桥进行比较。材料参数、截面形式及单元类型与算例 2.1.2 节相同,材料用量详见表 4。

在活载各组合作用下,主梁的挠度计算结果详见表 5。计算结果表明:当跨径为 312 m 时,在荷载组合 I、II、III 作用下,本文拱桥的刚度较对照拱桥分别

表 4 构件参数及材料用量

**Tab.4 Parameters and amount of steel of members**

构件	408 m 跨径		312 m 跨径	
	截面积/m <sup>2</sup>	用量/t	截面积/m <sup>2</sup>	用量/t
对照拱桥拱肋	1.325~1.972	11 516.5	0.958~1.287	5 976.9
本文拱桥拱肋	1.310~1.760	10 763.5	0.925~1.085	5 370.2
刚性斜杆	0.072	770.8	0.089 6	750.7
吊杆	0.017 9	509.3	0.017 9	291.9
主梁	0.324	5 604.2	0.324	4 290.4
横撑	0.408	833.7	0.408	577.2

表 5 2.1.3 节算例的结构挠度

Tab.5 Structural deflection of the examples in 2.1.3

组合	构件挠度类别	408 m 跨径			312 m 跨径		
		对照拱桥	本文拱桥	变化率/%	对照拱桥	本文拱桥	变化率/%
I	主梁最大挠度/mm	219.8	86.9	-60.5	176.8	62.2	-64.8
II	主梁最大挠度/mm	138.9	55.0	-60.3	111.9	44.7	-60.1
III	主梁最大挠度/mm	219.5	86.8	-60.5	176.6	61.9	-64.9
III	1/4 跨处主梁上下挠度(绝对值)之和/mm	361.2			296.1		

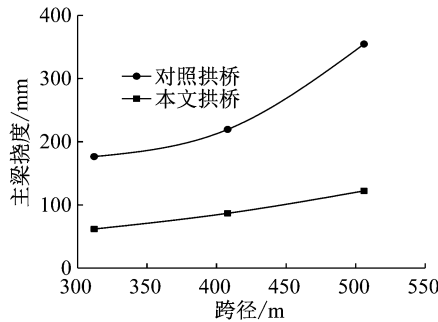


图 12 活载作用下本文拱桥和对照拱桥两者主梁挠度的比较

Fig.12 Comparison of displacement of the main beam between the present bridge and the contrast bridge under live load

由此可见,随着跨径的增大,本文方法可使拱梁固结拱桥的刚度更为显著的提高.

2.2 本文拱桥的强度、温度响应、稳定性、动力特性及疲劳分析

为了进一步研究本文方法对结构强度、温度响应、稳定性、动力特性及构件疲劳的影响,以 2.1.1 节的算例为例,再通过有限元分析提取这几个力学特性的计算结果,并进行以下对比分析.

2.2.1 结构强度及温度响应分析

在成桥状态下,考虑以下 4 个荷载工况对结构进行强度及温度响应分析:

- ① 工况 I,自重+二期;
- ② 工况 II,列车活载;
- ③ 工况 III,自重+二期+列车活载+整体升温;
- ④ 工况 IV,自重+二期+列车活载+整体降温.

本文拱桥与对照拱桥拱肋的应力计算结果见表 6,相应的对比如图 13 所示.结果表明:在恒载作用

提高了 64.8%、60.1%、64.9%;当跨径为 408 m 时,分别为 60.5%、60.3%、60.9%;当跨径为 506 m 时,分别为 65.4%、65.2%、65.5%.另外,由挠度随跨径的变化曲线可知,对照拱桥位移曲线的斜率增加很快,本文拱桥则基本不变,说明随着跨径的增大,相比前者,后者的刚度并没有明显下降,具体如图 12 所示.

下,对照拱桥拱肋最大应力为 93.6 MPa,本文拱桥为 99.9 MPa,较原桥略微增加,主要是增添了刚性斜杆使得结构的恒载有所增加引起;在列车活载作用下,前者拱肋最大应力为 56.0 MPa,本文拱桥仅为 24.2 MPa,减少了 56.8%,其主要原因是本文拱桥的刚度变大,造成移动荷载引起的变形相对减小.

表 6 拱肋最大应力计算结果

Tab.6 The maximum stress of arch ribs

	对照拱桥	本文拱桥	变化率/%
工况 I	93.6	99.9	6.7
工况 II	56.0	24.2	-56.8
工况 III	141.5	118.2	-16.4
工况 IV	141.5	118.2	-16.4

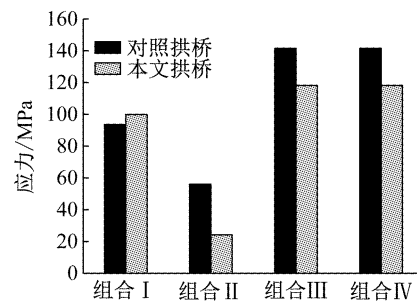


图 13 两者拱肋应力的比较

Fig.13 Comparison of stress of arch ribs

按工况 III 和工况 IV 进行计算,结果表明:由于本文拱桥增加了恒载和超静定次数,使其在恒载和温度作用下拱肋应力较原桥略高,但由于在列车活载作用下拱肋应力远小于对照拱桥,经荷载组合后对照拱桥拱肋最大应力为 141.5 MPa,本文拱桥拱肋最大应力为 118.2 MPa,较前者略小.

2.2.2 稳定性及动力特性分析

考虑恒载及活载同时作用,分别对结构进行一

类稳定和考虑几何非线性的稳定性分析,其结果见表 7、8. 一类稳定分析结果表明,对照拱桥的面外稳定性系数为 13. 98,本文拱桥面外稳定系数为 13. 87,主要是由于刚性斜杆其所增加的恒载略降低了面外稳定性系数. 另外,前者首次一阶面内稳定系数为 31. 31,本文拱桥则为 70. 90,较前者大幅增大. 考虑几何非线性的稳定分析结果表明,前者稳定荷载系数为 12. 29,本文拱桥则为 13. 22,可知后者的稳定承载力亦未下降.

表 7 一类稳定计算结果

**Tab.7 Calculation results of category I stability**

失稳阶数	对照拱桥		本文拱桥	
	失稳模态	面外稳定性系数	失稳模态	面外稳定性系数
1	面外正对称	13. 98	面外正对称	13. 87
2	面外反对称	20. 52	面外反对称	19. 91
3	面外正对称	28. 06	面外正对称	26. 29
4	面外反对称	30. 66	面外反对称	29. 27
5	面内反对称	31. 31	面外正对称	34. 10
6	面外正对称	37. 25	面外反对称	41. 55
7	面内正对称	39. 55	面外正对称	44. 03
8	面外反对称	46. 25	面外反对称	49. 76
9	面内反对称	48. 95	面外正对称	51. 52
10	面外正对称	49. 90	面外反对称	58. 82
11	面外反对称	55. 31	面外正对称	60. 41
12	面外正对称	57. 90	面外反对称	68. 00
13	面内正对称	63. 11	面外正对称	68. 72
14	面外反对称	66. 81	面内反对称	70. 90

表 8 考虑几何非线性的稳定计算结果

**Tab.8 Stable calculation results considering geometric nonlinearity**

对照拱桥	本文拱桥	变化率/%
12. 29	13. 22	7. 5

结构的动力响应按线弹性理论进行分析,结果见表 9. 分析结果表明,对照拱桥基频为 0. 232 5,本文拱桥为 0. 236 1,均为面外正对称振动;后者首次发生面内振动的频率为 0. 655 8,相比前者面内振动频率提高了 123. 3%,可见本文拱桥的动力特性得到有效改善.

表 9 动力特性计算结果

**Tab.9 Results of dynamic characteristics**

阶数	对照拱桥模态	对照拱桥	本文拱桥模态	本文拱桥
1	面外正对称	0. 232 5	面外正对称	0. 236 1
2	面内反对称	0. 293 7	面外正对称	0. 348 8
3	面外正对称	0. 317 2	面内正对称	0. 655 8
4	面内正对称	0. 572 1	面外反对称	0. 668 3

2. 2. 3 刚性斜杆及吊杆的疲劳分析

为研究刚性斜杆及吊杆疲劳问题,在恒载和移动荷载共同作用下,计算构件的最大拉、压应力及疲

劳应力幅值,结果见表 10. 计算结果表明:刚性斜杆的最大拉应力为 63. 2 MPa,出现在其顶部,最大压应力为 42. 6 MPa,出现在边杆件的顶部,具体如图 14 所示. 说明杆件在恒载和移动荷载共同作用下会出现拉、压两种受力状态,但其最大拉、压应力均满足规范要求.

表 10 构件应力和应力幅验算结果

**Tab.10 The results of stress and stress amplitudes**

	刚性斜杆最大拉应力/MPa	刚性斜杆最大压应力/MPa	刚性斜杆应力幅值/MPa
本文拱桥	63. 2	42. 6	74. 8

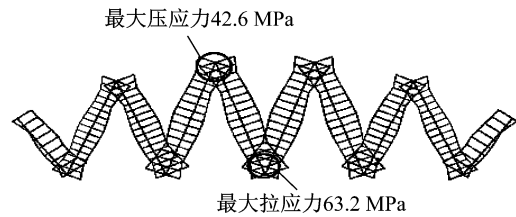


图 14 刚性斜杆应力状态

Fig.14 The stress state of rigid diagonal bars

刚性斜杆疲劳应力幅为 74. 8 MPa,依据 TB 10091—2017 表 3. 2. 7-1,应力幅值满足规范规定的疲劳容许应力幅(109. 6 MPa),故满足疲劳验算要求<sup>[21]</sup>. 此外,除对照拱桥和本文拱桥的短吊杆最大应力幅值分别为 53. 0 和 52. 2 MPa 外,其余吊杆应力幅值皆较对照拱桥大幅减少. 因此,本文拱桥的吊杆面积可适当减少,但为保证更高的安全储备,其截面面积可与传统拱桥相同,即吊杆的刚度设置可不变.

2. 3 刚性斜杆的刚度与主梁挠度的关系

为了进一步研究刚性斜杆的刚度与主梁挠度的关系,改变 2. 1. 1 节算例刚性斜杆的截面刚度,再通过有限元计算主梁挠度的变化趋势,结果详见表 11 及图 15.

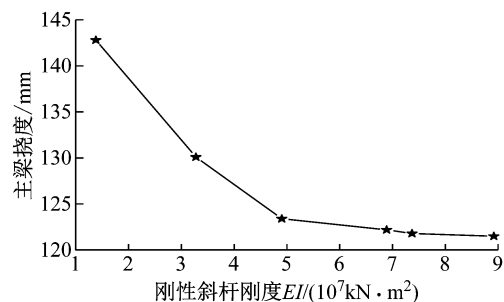


图 15 刚性斜杆的刚度变化时主梁挠度的变化趋势

Fig.15 Trend of deflection of the main beam when stiffness of rigid diagonal bars change

结果表明,随着刚性斜杆的刚度的增大,主梁挠

表 11 刚性斜杆的刚度变化时主梁挠度的变化值

Tab.11 Value of deflection of the main beam when stiffness of rigid diagonal bars change

	刚性斜杆截面刚度/(10 <sup>7</sup> kN·m <sup>2</sup> )					
	8.924	7.377	6.894	4.902	3.277	1.380
刚性斜杆应力幅值/MPa	64.3	68.2	74.8	93.6	128.0	165.4
主梁上下挠度(绝对值)之和/mm	121.5	121.8	122.2	123.4	130.1	142.8

注:2.1.1节算例刚性斜杆的截面刚度为 6.894×10<sup>7</sup> kN·m<sup>2</sup>

度逐渐减小,但是趋势较平缓.这说明当刚性斜杆的用量超过一定程度时,其对结构竖向刚度的影响并不是很大,且还会增加结构的恒载,对结构产生负面影响;当刚性斜杆的用量过少时,其线刚度太小而不能与拱肋、主梁很好协同工作,且强度和局部稳定性不容易满足规范要求.因此综合来看,刚性斜杆的刚度过小时,无法形成桁架结构,刚度过大时会造成材料浪费,当其刚度能与拱肋、主梁恰好相匹配时,材料的利用率最高.

### 3 结论

本文提出了一种提高拱梁固结刚度的有效方法,即在拱肋和主梁之间增加 10 根刚性斜杆与拱肋及主梁节段形成 11 个三角形,拱肋和主梁薄弱处得到加强,并提高拱肋和主梁的线刚度.通过有限元对本拱桥的刚度进行深入分析,同时还对结构的强度、温度响应、稳定性、动力特性及刚性斜杆疲劳等问题进行分析,在原拱桥上额外增加刚性斜杆(约增加总用钢量的 10%)时,按规范要求的不同活载组合作用下展开研究,得出以下几点结论:

(1) 结构的整体刚度大.对照拱桥最大挠度为 354.6 mm,本文拱桥仅为 116.6 mm,较对照拱桥最大值可减小 67.1%.可见,本文提出的改造方法确实有效.

(2) 强度承载力有所提高.在列车活载作用下,由刚性斜杆与拱肋及主梁节段所形成的三角形参与抵抗其变形,本文拱桥拱肋的最大应力减少 56.8%.因此,尽管刚性斜杆增加了结构的恒载和超静定次数,经恒载、活载、温度等荷载组合后,其主拱最大应力仍较对照拱桥小 16.4%,其中前者为 118.2 MPa,后者为 141.5 MPa.

(3) 稳定性有所提高,动力特性也得到一定的改善.两者的面外稳定系数基本相同,但前者的面内稳定系数为 70.90,明显高于面内稳定系数为 31.31 的对照拱桥.动力特性分析表明,两者的基频基本相同,但前者行车面内振动的频率为 0.668 3,而后者则为 0.293 7,相比之下该值增加了 123.3%.

(4) 疲劳幅值能满足规范要求.疲劳验算表明,刚性斜杆疲劳应力幅为 74.8 MPa,依据 TB 10091—2017 表 3.2.7-1,该应力幅值满足规范规定的疲劳容许应力幅.此外,除对照拱桥和本文拱桥的短吊杆最大应力幅值分别为 53.0 和 52.2 MPa 外,其余吊杆应力幅值皆较对照拱桥大幅减少.

(5) 即使两者采用相同的用钢量,按规范要求作不同活载组合,对照拱桥最大挠度值为 354.6 mm,本文拱桥仅为 122.5 mm,可见其刚度提高也十分明显.此外,研究表明随着跨径的增大,其改善效果更为显著.

综上所述,新型拱桥的整体刚度得到大幅度提高,且其稳定性及动力特性等力学特性均得到一定的改善,疲劳验算也满足规范要求,因此对高速铁路拱桥特别适用.

### 参考文献:

- [1] 李亚东,姚昌荣,梁艳.浅论拱桥的技术进步与挑战[J].桥梁建设,2012,42(2):13.  
LI Yadong, YAO Changrong, LIANG Yan. On the technical progress and challenges of arch bridges [J]. Bridge Construction, 2012, 42(2): 13.
- [2] 魏乐永.拱式结构体系研究[D].上海:同济大学,2007.  
WEI Leyong. Research on arch structure system [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [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.  
CHEN Baochun. Review and prospect of arch bridge technology [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2009, 37(1): 94.
- [4] 姚玲森.桥梁工程[M].第2版.北京:人民交通出版社,2008.  
YAO Lingsen. Bridge engineering[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [5] 秦顺权,高宗禹.长跨度高速铁路桥梁技术的发展与展望[J].工程,2017,3(6):787.
- [6] 张华,徐升桥,彭岚平.南广铁路西江特大桥总体设计[J].钢结构,2015,30(4):17.  
ZHANG Hua, XU Shengqiao, PENG Lanping. Overall design of Xijiang Bridge of Nanguang railway[J]. Steel Structure Press, 2015, 30(4): 17.
- [7] 李晓波.汀泗河特大桥 1~140m 钢箱系杆拱施工技术[J].铁道建筑技术,2009(S1):1.

- LI Xiaobo. Construction technology of 1~140 m steel box tied arch of tingyi River Bridge [J]. *Railway Construction Technology*, 2009(S1):1.
- [8] 金福海,文功启,徐勇. 武广铁路客运专线 140m 钢箱系杆拱桥设计及其在高速铁路中的应用[J]. *铁道标准设计*, 2010(1):107.
- JIN Fuhai, WEN Gongqi, XU Yong. Design of 140 m steel box tied arch bridge of wuhan-Guangzhou railway passenger dedicated line and its application in high speed railway [J]. *Railway Standard Design*, 2010(1): 107.
- [9] 张文华. 东平水道特大桥(85+286+85)m 双拱肋钢桁拱设计[J]. *铁道标准设计*, 2015,59(12):40.
- ZHANG Wenhua. Design of double arch rib steel truss arch of Dongping Waterway Super Large Bridge (85+286+85)[J]. *Railway Standard Design*, 2015, 59(12): 40.
- [10] 易伦雄. 南京大胜关长江大桥大跨度钢桁拱桥设计研究[J]. *桥梁建设*, 2009(5):1.
- YI Lunxiong. Research on design of long span steel truss arch bridge of Nanjing Dashengguan Changjiang River Bridge [J]. *Bridge Construction*, 2009(5):1.
- [11] 中铁大桥勘测设计院. 南京大胜关长江大桥初步设计[Z]. [S. l.]: 中铁大桥勘测设计院, 2005.
- China Railway Bridge Survey and Design Institute. Nanjing Dashengguan Yangtze River bridge preliminary design [Z]. [S. l.]: China Railway Bridge Survey and Design Institute, 2005.
- [12] KANG Chongjie, SCHNEIDER S, WENNER M. Development of design and construction of high-speed railway bridges in Germany [J]. *Engineering Structures*, 2018,163:184.
- [13] FRYBA L. A rough assessment of railway bridges for high speed trains [J]. *Engineering Structures*, 2001,23(5):548.
- [14] 严嵩. 拱桥在我国铁路建设中的应用[J]. *四川建筑*, 2016,36(2):97.
- YAN He. Application of arch bridge in railway construction in china [J]. *Sichuan Architecture*, 2016, 36(2): 97.
- [15] 沙培洲. 高速铁路大跨度简支系杆拱桥设计研究[J]. *铁道标准设计*, 2012(7):60.
- SHA Peizhou. Research on design of long-span simply supported tied arch bridge for high speed railway [J]. *Railway Standard Design*, 2012(7): 60
- [16] 肖汝诚. 桥梁结构体系 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- XIAO Yucheng. *Bridge structure system* [M]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [17] 马坤, 向天宇, 赵人达, 等. 高速铁路钢筋混凝土拱桥长期变形的随机分析[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(11):141.
- MA Kun, XIANG Tianyu, ZHAO Renda, *et al.* A stochastic analysis of long-term deformation of high-speed railway reinforced concrete arch bridge [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(11):141.
- [18] 占丽金. 大跨度高速铁路系杆拱桥动力特性及抗震性分析 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
- ZHAN Lijin. *Dynamic characteristics and seismic analysis of long-span high-speed railway tied arch bridge* [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014.
- [19] 高亮, 辛涛, 肖宏, 等. 高速铁路桥上不同轨枕型式动力特性对比[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(1):68.
- GAO Liang, XIN Tao, XIAO Hong, *et al.* Comparison of dynamic characteristics of different sleepers on high speed railway bridges [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2012, 40(1): 68.
- [20] 铁道第三勘察设计院集团有限公司. 铁路桥涵设计规范: TB10002—2017 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- China Railway Sanyuan Survey and Design Group Co., Ltd.. *Design code for railway bridges: TB10002—2017* [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.
- [21] 中铁大桥勘测设计院有限公司. 铁路桥梁钢结构设计规范: TB10091—2017 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- China Railway Major Bridge Reconnaissance Design Institute Co., Ltd.. *Code for design of steel structures for railway bridges: TB10091—2017* [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.