

文章编号: 1674—8247(2019)02—0067—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.02.014

## 高速铁路低高度系杆拱桥设计研究

王俊杰

(中国铁路设计集团有限公司, 天津 300142)

**摘要:**为解决高速铁路在跨度及高度同时受限情况下,跨越既有建筑物的难题,文章结合津秦客运专线戴河桥设计实例,对跨度56 m、梁高1.4 m的低高度简支系杆拱,在结构选择、变形刚度、系梁强度、拱肋强度、吊杆强度、动力仿真适应能力等方面进行了研究,研究结果表明结构可满足高速铁路运营要求。同时解决了低高度结构在箱梁截面矮梁高、小吊杆间距密情况下的横梁施工难题,梁端预应力张拉空间受限问题以及无砟轨道相邻梁端横向变形控制等问题。建议在高速、大跨条件下,桥梁可采用更加实用的低高度结构进行设计。

**关键词:**低高度系杆拱; 横向限位; 竖向挠度; 动力; 响应; 特性

**中图分类号:**U442.5

**文献标志码:**A

## Design and Research on Low-height Tied Arch Bridge in High-speed Railway

WANG Junjie

(China Railway Design Corporation, Tianjin 300142, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of high-speed railway crossing over buildings under both span and height constraints, based on the design example of Daihe railway bridge on Tianjin-Qinhuangdao Passenger Dedicated Line, this paper studies structure selection, deformation rigidity, tie beam strength, arch rib strength, suspender strength and dynamic simulation adaptability of the low-height simply-supported tied arch bridge with a span of 56 m and a girder height of 1.4 m. The results show that the structure can meet operation requirements of high speed railway. Simultaneously it resolves beam construction of low-height structure under the condition of high short girder and close spacing between small suspenders in girder cross section, the limitation of prestressed tension space at the end of beam and lateral deformation control of adjacent beams of ballastless track. It is suggested that under the condition of high speed and large span, the bridge can be designed with more practical low height structure.

**Key words:** low-height tied arch bridge; lateral spacing; vertical deflection; dynamic; response; property

为了降低桥梁结构高度,可采用的桥梁类型主要有系杆拱桥、槽型梁、斜拉桥等结构形式。本文研究的工点位于北戴河站附近,对于景观要求较高。槽型梁与系杆拱桥相比,外形美学效果略差。斜拉桥景观效果略好,但是在相同跨度、相同梁高的情况下,刚度低

于系杆拱桥,无法满足高速铁路的刚度要求。经过分析,选用系杆拱桥的结构形式较为合理。

系杆拱桥是由拱、系杆、吊杆和桥面系梁等协同工作的组合结构体系组成,以系杆承受拱脚的水平推力为主要特征,是一种具有良好发展前景的大跨度桥梁

收稿日期:2017-11-27

作者简介:王俊杰(1971-),男,高级工程师。

引文格式:王俊杰. 高速铁路低高度系杆拱桥设计研究[J]. 高速铁路技术,2019,10(2):67-71.

WANG Junjie. Design and Research on Low-height Tied Arch Bridge in High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(2): 67-71.

结构形式。与其他的桥型比较,系杆拱桥具有跨越能力大、建筑高度小、美观经济等优点,在已建高速铁路、轨道交通、公路等方面均得到了广泛应用。特别是当高架线路斜交跨越城市干道、高速公路等需要桥梁跨度较大、梁部结构建筑高度要求较小时,采用该桥型具有较大的优势。

本文根据津秦客运专线跨越戴河的实际需要,选用高度低于常规设计的系杆拱进行研究,对高速铁路中跨度较大但是梁高较低的结构形式进行分析,对高速铁路的结构进行有益的补充。

1 工程概况

1.1 工程概况

津秦客运专线为连接东北、华北的重要通道,联通了京沪高速铁路与秦沈客运专线,沿线经过天津、唐山、秦皇岛等城市。设计主要标准为 ZK 活载,时速 350 km 的无砟轨道。

津秦客运专线在北戴河站在既有京秦铁路车站基础上进行改造,跨越戴河时既有线采用半穿式钢桁梁,轨底至梁底仅有 1.25 m,津秦客运专线防洪评价要求采用 2 孔 56 m 的结构跨越戴河,梁底受戴河设计水位的控制,为了保障新旧车站的站坪高度尽量一致,要求戴河桥桥梁结构高度不大于 1.4 m。

1.2 桥式方案设计

根据综合比选,采用简支系杆拱桥,考虑防洪评价要求,确定采用 2 孔 56 m 系杆拱桥,如图 1 所示。

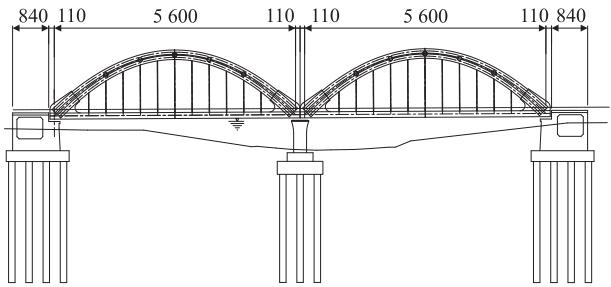


图 1 结构示意图(cm)

2 荷载标准

活载采用 ZK 活载;二期恒载按 113 kN/m 计算;单支座不均匀沉降按 5 mm 考虑;温度效应考虑整体升降温、日照温差等作用。

3 方案研究

3.1 降低梁高所采取的措施

高速铁路无砟轨道桥梁对桥梁的竖向刚度和徐变

上拱度要求较高,根据以往桥梁的设计经验,拱肋刚度  $EI_1$  和系杆(梁)刚度  $EI_2$  的相对刚度比  $EI_1/EI_2$  的合理的比值为 1:2<sup>[4]</sup>,若满足该刚度要求,56 m 简支拱系梁高度应该在 1.9 m 左右,本次设计梁高不能大于 1.4 m,拱梁相对刚度比值仅为 1:1.5,受梁高限制,系梁刚度明显偏弱。需研究提高系杆刚度的有效措施,来满足高速铁路的各项技术要求。增加系梁刚度主要有加大拱肋截面尺寸、减小吊杆间距和减轻系梁自重等措施,本文从以上几个方面入手,对桥梁结构的静动力性能进行分析研究。

3.2 系梁截面的选择

一般中小跨度拱桥系梁截面采用纵横梁体系,纵梁厚度为 1.4 m,纵向加劲肋厚度 0.35 m,横梁厚度 0.3 m,横梁纵向间距 4.0 m,纵横梁体系与箱梁截面各控制参数对比,如表 1 所示。

表 1 纵横梁体系与箱梁截面控制参数对比表

项目	箱型截面	纵横梁体系	容许值
列车竖向静活载 + 0.5 倍温度作用梁体竖向挠度/mm	13.04	23.01	29.5
0.63 倍列车竖向静活载作用 + 全部温度梁体竖向挠度/mm	10.05	21.32	29.5
ZK 活载静力作用下,梁端竖向转角(rad)/‰	0.78	1.5	1.0
运营阶段列车摇摆力、风力及温度作用下横向最大位移/mm	5.9	5.99	14
竖向自振频率/Hz	2.95	2.47	2.18

3.3 吊杆间距的选择

为确定吊杆间距的影响,对吊杆间距为 4.0 m 和吊杆间距 5.0 m 计算结果进行对比,比较结果如表 2 所示。

表 2 不同吊杆间距控制参数对比表

项目	吊杆 4 m 间距	吊杆 5 m 间距	容许值
列车竖向静活载 + 0.5 倍温度作用梁体竖向挠度/mm	13.04	14.45	29.5
0.63 倍列车竖向静活载作用 + 全部温度梁体竖向挠度/mm	10.05	12.36	29.5
ZK 活载静力作用下,梁端竖向转角(rad)/‰	0.78	0.83	1.0
运营阶段列车摇摆力、风力及温度作用下横向最大位移/mm	5.9	5.9	14
竖向自振频率/Hz	2.95	2.81	2.18

3.4 拱肋直径的选择

为确定拱肋直径对计算结果的影响,对拱肋直径 1.0 m 和拱肋直径 0.8 m 进行对比,比较结果如表 3 所示。

表 3 不同拱肋直径控制参数对比表

项目	拱肋 1.0 m	拱肋 0.8 m	容许值
列车竖向静活载 + 0.5 倍温度作用梁体竖向挠度/mm	13.04	13.56	29.5
0.63 倍列车竖向静活载作用 + 全部温度梁体竖向挠度/mm	10.05	11.96	29.5
ZK 活载静力作用下, 梁端竖向转角 (rad)/‰	0.78	0.94	1.0
运营阶段列车摇摆力、风力及温度作用下横向最大位移/mm	5.9	6.11	14
竖向自振频率/Hz	2.95	2.91	2.18

3.5 方案研究的结论

不同拱管直径和吊杆间距对桥梁的自振频率影响不大,对竖向刚度和梁端转角影响较大;系梁截面形式对其竖向刚度、自振频率和转角影响最明显,箱梁比纵横梁结构刚度大一倍,而增加拱管直径可以有效提高梁拱组合结构的整体刚度,1 m 管径比 0.8 m 管径减小梁端竖向转角约 20%,减小吊杆间距可以提高系梁的竖向刚度约 10%。

根据方案研究比选结论,确定系梁采用箱形截面,拱管直径采用 1.0 m,吊杆间距采用 4 m。

4 结构设计

4.1 结构尺寸拟定

梁部全长 58 m,为降低系梁自重,采用单箱五室预应力混凝土箱形截面,梁高 1.4 m。系梁断面图,如图 2 所示。

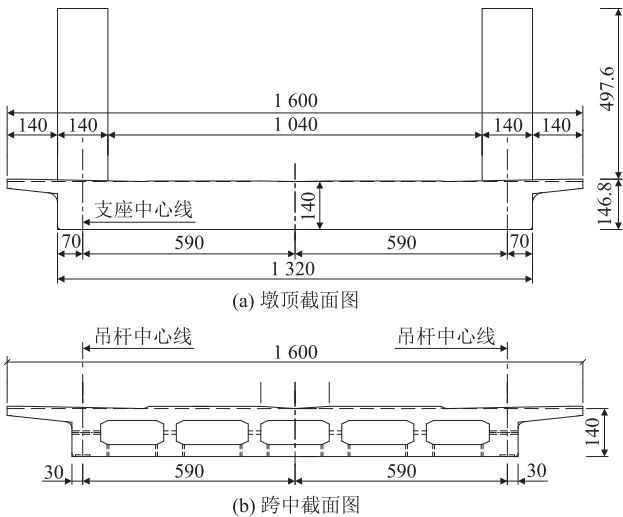


图 2 系梁断面示意图 (mm)

吊杆采用平行布置,为了增加梁部刚度,尽量减小吊杆间距,间距采用 4 m,全桥共设 11 对吊杆。

拱肋横断面采用哑铃型钢管混凝土变截面,拱顶

截面高度  $h = 2.2\text{ m}$ ,拱脚截面高度  $h = 2.8\text{ m}$ ,钢管直径为 1 m,由厚 14 mm 的钢板卷制而成,每根拱肋的两钢管之间用  $\delta = 14\text{ mm}$  的腹板连接,如图 3 所示。

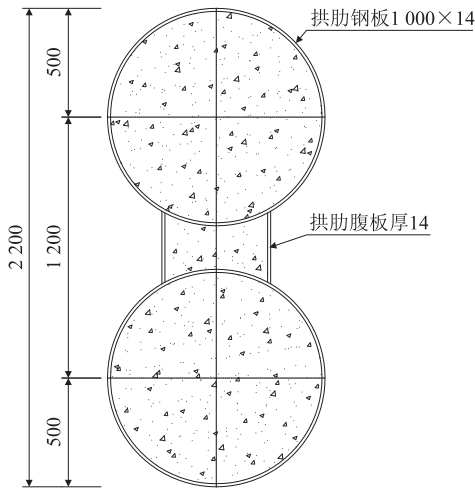


图 3 拱肋截面示意图 (mm)

桥面宽度:防护墙内侧净宽 8.8 m,桥面板宽 16 m。

4.2 结构分析

4.2.1 计算模型

整体模型采用空间有限元程序 MIDAS CIVIL 计算。主桥分别采用梁单元和板单元进行分析,梁单元模型主要用于主桥强度分析、系梁配束计算等,板单元模型主要用于主桥刚度、动力特性、考虑剪力滞效应有效宽度计算及拱肋稳定分析<sup>[7]</sup>。

采用梁单元建模时,对于系梁、拱肋及横撑的各杆件采用三维梁单元进行模拟,其截面特性按照实际设计截面定义。拱轴线为二次抛物线,拱肋采用哑铃形截面,钢管和腹杆内均填充混凝土,为变截面,拱高从拱顶 2.2 m 逐渐过渡到拱脚 2.5 m,采用“双单元、共节点”的方法模拟钢管混凝土拱肋。吊索采用桁架单元模拟,仅考虑其轴向的拉伸刚度,梁单元整体模型,如图 4 所示,考虑了有效分布宽度。

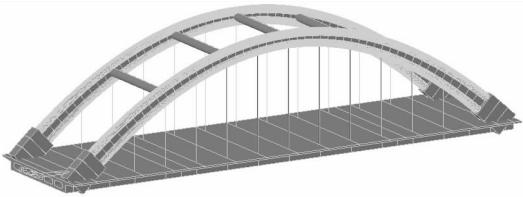


图 4 梁单元模型

采用板单元建模时,系梁采用板单元,以截面顶板、底板和腹板中心线为轴线建立板单元,并分别赋予其相应的板厚,拱肋、横撑和吊杆等构件模拟方法和梁单元模型相同。板单元整体模型,如图 5 所示。

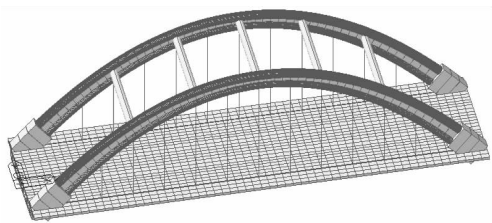


图 5 板单元模型

4.2.2 变形及刚度分析

(1)主梁竖向挠度:列车竖向静活载 + 0.5 倍温度作用下梁体竖向挠度 13.04 mm,0.63 倍列车竖向静活载作用 + 全部温度作用下梁体竖向挠度 10.05 mm,均小于  $56\,000/1\,900=29.4\text{ mm}$ 。

(2)梁端竖向折角控制:在 ZK 活载静力作用下,梁端竖向折角最大值 0.58 ‰rad,满足文献[2]第 7.3.7条,梁部结构在 ZK 活载静力作用下,梁端竖向折角不应大于 1‰的要求。

(3)系梁竖向残余徐变变形为 6.61 mm,满足文献[2]第 7.3.2 条,竖向残余徐变变形不大于  $L/5\,000$ ,即 11.2 mm。

4.2.3 系梁强度分析

强度分析如图 6、图 7 所示。

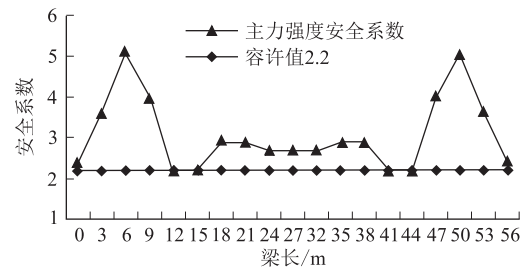


图 6 主力作用下强度安全系数

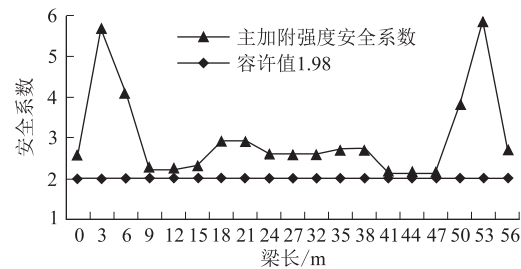


图 7 主加附作用下强度安全系数

4.2.4 拱肋强度分析

拱肋钢管混凝土截面抗压强度结果,如表 4 所示。

表 4 拱肋钢管混凝土截面抗压强度(kN)

节点	主力				主加附			
	$N_s$	$M_s$	$N_{01}$	$N_{01}/\gamma_0 N_s$	$N_s$	$M_s$	$N_{01}$	$N_{01}/\gamma_0 N_s$
左端拱脚	8 520.9	246.5	30 317.4	3.2	11 178.1	148.2	32 338.6	2.6
L/8	6 374.1	103.7	31 328	4.5	9 160.5	10	33 686	3.3
L/4	5 957.5	131.1	31 328	4.8	8 533.9	22.5	33 686	3.6
3L/8	5 668.8	142.3	30 317.4	4.9	8 461.4	54.6	32 338.6	3.5
L/2	5 020.2	14	33 686	6.1	7 839.3	6.6	33 686	3.9
5L/8	5 677.7	144.5	30 317.4	4.9	8 506.2	59.1	32 338.6	3.5
3L/4	6 169	135.4	31 328	4.6	8 807.8	27.7	33 686	3.5
7L/8	8 709.9	270.1	30 317.4	3.2	11 242.4	172.2	31 328	2.5
右端拱脚	8709.9	270.1	30317.4	3.2	11 242.4	172.2	31 328	2.5

在主力组合下  $N_{01}/\gamma_0 N_s$  最小值为 3.2,在主力 + 附加力组合下  $N_{01}/\gamma_0 N_s$  最小值为 2.5,均满足文献[3]第 5.2.4 条  $\gamma_0 N_s \leq N_{01}$  的要求。

4.2.5 吊杆验算

吊杆的内力计算直接考虑施工二期后,拆除临时墩由于结构自重形成的吊杆内力,并与成桥阶段荷载引起的内力进行组合,保证吊杆的安全系数  $n \geq 2.5$ 。吊杆最大应力幅为 109.3 MPa,满足规范要求。按不中断行车更换一对吊杆工况检算,更换受力最大的 D8 吊杆时,本桥吊杆最小安全系数为 2.59,满足要求。

4.2.6 动力特性及列车走行性分析

动力仿真结论及建议:戴河桥设计方案具有良好的动力特性及列车走行性,当国产高速、法国 TGV、德

国 ICE、日本 500 系以不超过 420 km/h 速度通过桥梁时,桥梁动力响应及各车的车体竖、横向振动加速度满足限值要求,列车行车安全性满足要求;当车速不超过该桥设计速度 350 km/h 时,列车的乘坐舒适度均达到“良好”以上,当速度不超过 420 km/h 时,列车的乘坐舒适度达到“合格”标准。

5 关键技术研究

5.1 箱梁截面矮梁高、小吊杆间距密等横梁施工难题

为了降低梁高及减少梁重,梁部截面采用高度仅 1.4 m 高箱梁,箱内高度仅 0.7 m,且吊杆间距较小,4 m 长度就有一道横梁,使得梁内空间纵向也无法贯



通。箱梁内模的选择成为一个制约条件,一般箱内空间较小时可采用橡胶气囊、木模拼装、伞式抽芯内模或者拼装式钢模板作为内模。本文研究的箱梁纵横向均没有拆除模板的通道,模板拆除的话仅能考虑从板顶留进人洞进行模板拆除。

由于采用橡胶气囊模板不能保障结构定位准确,不宜采用。伞式抽芯内模从侧面拆除较为简单,针对本文在顶部开孔较小,而平面尺寸相对较大,研发较困难。拼装式钢模板基本无法拆除,若留在梁内则成本太高。

本桥根据现场实际情况采用木模板拼装较为简单,采用较小的组装单元,在箱梁板顶留有适当工作空间便于拆除内模。

## 5.2 梁端预应力张拉空间受限问题

本文研究的桥梁采用2孔56m简支系杆拱桥,梁缝仅20cm,无法满足张拉空间,若采用较大的后浇段则对拱脚位置受力有不利影响。为保障结构受力更合理,在中间墩位置靠近梁端的钢绞线均采用固定锚具,在另外一侧进行单端张拉。桥台顶部影响梁部张拉的部分考虑在梁部张拉完成后进行浇筑。

## 5.3 无砟轨道相邻梁端横向变形控制

TB 10621-2014《高速铁路设计规范》规定“无砟轨道桥梁相邻梁端两侧的钢轨支点横向相对位移不应大于1mm。”按照常规设计支座布置为一侧固定支座,另一侧为横向活动支座。在整体升温25℃作用下,活动支座一侧轨道的横向位移为2.1mm,不满足规范的要求。为了满足规范需要,在梁部中间设置横向限位装置,限制梁部的横向位移,两侧均设置横向活动支座,如图8所示。在这种支座布置下,支座的横向位移为0.6mm,满足规范需要。

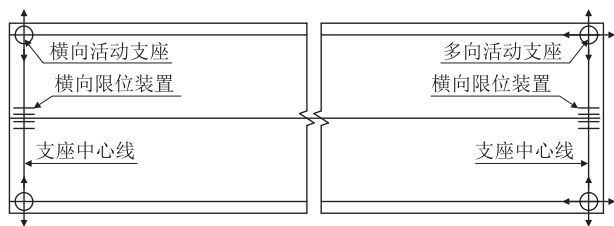


图8 支座布置示意图

## 6 结论

系杆拱结构将部分恒载及活载通过吊杆传至拱肋,由拱肋直接传到主梁根部,因而与同跨度简支梁及连续梁桥相比,有效的降低了主梁高度。当线路跨越

道路和通航河流,桥下净高受到限制,系杆拱是一种较为合适的桥跨结构。经过上述分析研究,系杆拱桥进一步压低结构高度后,静力计算及动力仿真分析显示各方面均可以满足高速铁路运营要求;实际运营没有出现不良表现,可以拓宽高速铁路结构适用范围,适应跨度大结构高度小的实际需要,为铁路桥梁结构应用进行有益的补充。

## 参考文献:

- [1] TB 10002.1-2005 铁路桥涵设计基本规范[S].  
TB 10002.1-2005 Fundamental Code for Design of Railway Bridge and Culvert [S].
- [2] TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S].  
TB 10621-2014 Code for Design of High Speed Railway[S].
- [3] GB 50923-2013 钢管混凝土拱桥技术规范[S].  
GB 50923-2013 Technical Code for Concrete-filled Steel Tube Arch Bridges [S].
- [4] 李小珍,刘德军,朱艳,等. 高速铁路下承式系杆拱桥桥面形式的研究[J]. 钢结构,2007,22(5):31-35.  
LI Xiaozhen, LIU Dejun, ZHU Yan, et al. Study on Deck Type of Through Steel Tied Arch Bridge on High-speed Railway [J]. Steel Construcion, 2007, 22(5): 31-35.
- [5] 李生勇,李凤芹,陈宝春,等. 钢管混凝土拱桥徐变影响分析[J]. 铁道学报, 2011,33(3):100-107.  
LI Shengyong, LI Fengqin, Chen Baochun, et al. Analysis on Creep Effect of Concrete-filled Steel Tubular Arch Bridges [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(3): 100-107.
- [6] 艾宗良,赵长明,鄢勇,等. 1-80m混凝土系杆拱有限元分析研究[J]. 铁道工程学报,2012,29(4):58-65.  
AI Zongliang, ZHAO Changming, YAN Yong, et al. Finite Element Analysis and Research of 1-80 m Prestressed Concrete Tied Arch Bridge [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, 29(4): 58-65.
- [7] 朱敏,王玉珏,杨咏漪,等. 高速铁路系杆拱桥设计研究[J]. 高速铁路技术,2010,1(3):21-26.  
ZHU Min, WANG Yujue, YANG Yongyi, et al. Design of Tie-arch Bridge for High-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2010, 1(3): 21-26.
- [8] 李自林,黄辉,贾建国. 戴河大桥拱肋施工线形控制技术[J]. 施工技术,2011,40(339):78-81.  
LI Zilin, Huang Hui, JIA Jianguo. Linear Control for Arch Rib in Daihe Bridge Construction [J]. Construction Technology, 2011, 40(339): 78-81.
- [9] 何赓余,李小珍,王炎,等. 高速铁路系杆拱之系杆与拱肋刚度比的探讨[J]. 四川建筑,2006,26(5):91-92.  
He Gengyu, Li Xiaozhen, Wang Yan, et al. Discussion on the Stiffness Ratio of the Bar and Arch Ribs of the High-speed Railway [J]. Sichuan Architecture, 2006, 26(5): 91-92.

(编辑:苏玲梅 张红英)