

多主桁空腹拱形桁架钢桥设计

崔 宏

(沈阳铁道勘察设计院有限公司, 辽宁 沈阳 110013)

摘 要: 主要介绍多主桁空腹拱形桁架钢桥结构设计特点。以长春市西安桥改造为工程背景, 介绍其总体布置和结构设计, 并采用空间有限元程序 MIDAS Civil 建立总体计算模型, 对四主桁下承式简支空腹拱形桁架结构进行了计算分析, 研究其空间力学行为。结果表明: 四主桁结构受力空间效应明显, 空腹拱形桁架整体受力性能和失稳模态均接近于系杆拱。计算分析表明, 设计方案合理, 多主桁结构满足城市宽幅多车道的桥梁布置要求, 为同类型结构设计和方案比较提供了理论依据和实践经验。

关键词: 空腹桁架; 拱形桁架; 钢桥; 多主桁

中图分类号: U442.5*3

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)06-0161-04

Design of Multi-main Truss Open-web Arched Truss Steel Bridge

CUI Hong

(Shenyang Railway Survey and Design Institute Co., Ltd., Shenyang 110013, China)

Abstract: The design characteristics of multi-main truss open-web arched truss steel structural bridge are mainly introduced. Taking the reconstruction of Xi'an Bridge in Changchun as the engineering background, its overall layout and structural design are introduced, and the spatial finite element software MIDAS/Civil is used to establish the overall calculation model for the calculation and analysis of four-main truss through simple-supported open-web arched truss structure. Its spatial mechanical behavior is studied. The results show that the force-bearing spatial effect of four-main truss structure is obvious. The overall force-bearing feature and the instability mode of open-web arched truss are close to that of bowstring arch. The calculation and analysis show that the design of this bridge is reasonable, and the multi-main truss structure meets the layout requirements of the urban wide multi-lane bridges, which provides the theoretical basis and practical experience for the design and scheme comparison of the similar structures.

Keywords: open-web truss; arched truss; steel bridge; multi-main truss

0 引 言

钢桥是大跨度桥梁的主要形式, 具有强度高、自重轻、施工便利和节省工期等诸多优势。一般当桥梁跨度大于 40 m 时, 采用钢桁梁结构比较经济^[1], 当桥下净空受限时, 下承式钢桁梁桥更是得到了广泛应用。一般钢桁梁桥采用最多的是双桁结构, 然而随着城市交通量的增加, 为满足多车道运行要求, 桥梁宽度越来越大, 为减少城市占地, 降低材料用量, 三桁、多桁结构在桥梁设计中的应用越来越普遍。主桁架是钢桁梁桥的主要组成部分, 对于城市桥梁, 考虑其与周边环境相协调的美观问题, 空腹拱形桁架刚劲的骨架与优美的曲线相结合, 造型上刚柔并

济, 加之空腹桁架与普通桁架相比, 空腹桁架没有设置斜腹杆, 增加了结构的通透性。多主桁空腹拱形钢桁架造型简洁美观, 力学性能优异, 应用在城市桥梁建设中, 可以取得较好的景观效果和经济价值。

1 结构设计特点

1.1 多主桁结构

与双桁结构相比, 多桁结构受力更为复杂, 空间效应较为明显, 桥面荷载在中主桁和边主桁之间不是平均分配的。忽略两边桁梁下弦节点刚性的影响, 桥面荷载在主桁间下弦节点上分配的力学模型相当于支点不均匀沉降的多跨连续梁。假设主桁间竖向位移相同, 在均布荷载作用下, 3 片主桁在均布荷载作用下分配的荷载比为 3:10:3, 4 片主桁在均布荷载作用下分配的荷载比为 4:11:11:4。实际上, 由于中主桁比边主桁的挠度大, 并且由于桥面刚度和横向连接的作用, 实际受力会使得中主桁和边

收稿日期: 2024-04-20

作者简介: 崔宏(1980—), 男, 学士, 高级工程师, 从事桥梁工程设计工作。

主桁的挠度差趋近一致,即桥面荷载通过桥面板和横向连接在主桁间进行了二次重分配,从而降低中主桁与边主桁之间的受力差别。但是,在多桁结构设计中,桥面荷载在主桁之间分配的不均匀性必定导致主桁间结构内力存在差异,其内力横向分配和位移协调主要靠横向联结系的刚度来保证^[2]。对这类多桁结构须采用结构仿真软件进行空间受力分析,以验算结构设计的安全性。

1.2 空腹拱形桁架结构

空腹桁架与一般桁架相比,空腹桁架没有斜腹杆,各节点均为刚接,可以承受弯矩,因此它的受力特性实为刚架,兼有桁架的受力特性^[3]。将空腹桁架的上弦节点布置在拱形曲线上,主桁受力后的弯矩图和拱形桁架的二次抛物线外形趋于一致,可使得弦杆受力均匀,并且主要承受轴向力,因此结构便具有了系杆拱的受力特性。计算表明,采用拱形桁架结构,腹杆和弦杆承受的弯曲应力很小,主要是轴向力起控制作用,即使设置斜腹杆,其所受内力也是很小的。据此,采用没有斜腹杆的空腹拱形桁架结构,各节点设置为刚接,使其能够承受一定程度的弯矩作用。这种结构型式既有桁架的受力特性,又具有了刚性吊杆系杆拱的受力特征,竖腹杆相当于刚性吊杆。与带斜杆的拱形桁架相比,空腹拱形桁架结构受力更为合理,其杆件总数减少1/4,节省钢材10%~16%^[4]。

2 工程概况

西安桥改造工程是长春市重点项目。该工程位于市区西安大路安达街一翔运街段,上跨京哈铁路和长春轻轨3号线,地理位置复杂、交通流量大。根据长春市的总体规划和既有桥状况,拟对旧桥拆除原位重建。综合考虑桥梁跨越铁路及行车道宽度等外部条件,新建西安桥上部设计采用1孔60 m简支下承式空腹拱形钢桁架,共设4片主桁,每相邻2片主桁间距16.2 m,最外两侧主桁间横向中心距48.6 m,结构全宽49.6 m。主桁采用空腹拱形桁架,分3幅桥面,设置4片主桁,矢高12.0 m,主桁中心距3×16.2 m,节间长10 m。主桁上、下弦杆采用箱型截面,竖杆采用工字形截面。边主桁上弦杆全高656 mm,内宽600 mm,竖板及水平板均厚26 mm,节点板厚30 mm;中主桁上弦杆全高656 mm,内宽600 mm,竖板厚36 mm,水平板厚28 mm,节点板厚40 mm。边主桁下弦杆内高1 000 mm,内宽600 mm,竖板厚26 mm,节点板厚30 mm,顶板宽1 300 mm,顶

板厚20 mm,底板宽1 200 mm,底板厚26 mm;中主桁下弦杆内高1 000 mm,内宽600 mm,竖板厚40 mm,节点板厚44 mm,顶板宽1 300 mm,顶板厚24 mm,底板宽1 200 mm,底板厚32 mm。边桁和中桁对应位置采用相同的腹杆,腹杆内宽600 mm,腹板厚20 mm,竖杆翼板宽400~500 mm,翼板均厚28 mm。桥面系采用正交异性整体钢桥面板,桥面板除防撞护栏底部设单板加劲肋外,中间部位均设U形加劲肋。桥面板厚18 mm,U肋加劲肋高280 mm,U肋加劲肋板厚8 mm,U肋间距600 mm。桥面板横桥向设横梁,横梁纵向间距2.5 m。在主桁节点设横撑,横撑采用外直径600 mm的圆管截面。桥面板与拱架系梁组合受力,主梁立面及横断面如图1、图2所示。

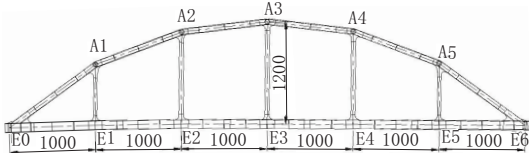


图1 主梁立面图(单位:cm)

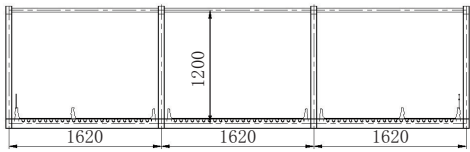


图2 主梁横断面图(单位:cm)

3 结构计算分析

3.1 主要材料

拱架杆件、桥面系及联结系采用Q 345qENH钢材,根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015),其主要力学性能见表1。

表1 结构钢材性能表

弹性模量 E/MPa	剪切模量 G/MPa	泊松比 γ
206 000	79 000	0.31
抗拉、抗压和抗弯 f_d/MPa	抗剪 f_{vd}/MPa	热膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}$
275(板厚 $\leq 16\text{ mm}$)	160(板厚 $\leq 16\text{ mm}$)	0.000 012
270(板厚16~40 mm)	155(板厚16~40 mm)	

3.2 计算荷载

(1)恒载

结构自重根据容重系数和钢材容重换算,由程序根据截面自动计算。

容重系数:拱架杆件取1.25,桥面系、联结系数数取1.15。

钢材容重:78.5 kN/m³。

(2)活载

汽车荷载:城-A级,横向按双向8车道进行加

载,按照相关规范活载取城-A 荷载的 1.3 倍。

(3)温度荷载

钢梁整体升降温按+36℃和-29℃考虑。

(4)风荷载

桥址处设计基本风速为 28.6 m/s,地表类别为 B 类,按桥面风速 25 m/s 计。

(5)疲劳荷载

疲劳荷载采用疲劳荷载计算模型 I。

为研究结构的受力性能,对上述各种荷载,按以下组合进行受力分析:

- a. 恒载+活载;
- b. 恒载+活载+风力+温度+制动力。

取最不利组合进行各杆件的强度、稳定和疲劳验算。

3.3 计算模型

采用空间有限元程序(MIDAS Civil)建立总体计算模型,拱架、横梁、联结系采用梁单元,桥面板采用板单元。结构计算模型见图 3。

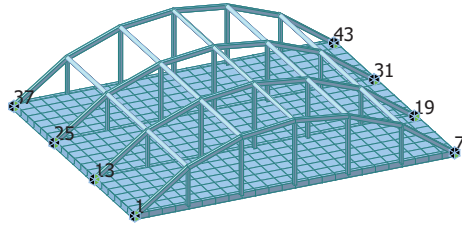


图3 MIDAS Civil 有限元模型图

3.4 结构受力性能分析

(1)支座反力

恒载、汽车荷载(计入冲击系数)及风力引起的支座反力见表 2。

表2 支反力表(单侧 4 个支座) 单位:kN

支座节点号	恒载	活载	标准组合最大值
1, 7	2 122	983	3 121
13, 19	3 846	2 723	6 571
25, 31	3 847	2 726	6 573
37, 43	2 122	975	3 111

(2)结构刚度

结构自振频率:主梁结构自振频率见表 3。

表3 自振频率表

模式号	频率/Hz	周期/s	主要振型描述
1	1.625	0.615	桥面竖向整波
2	1.796	0.557	桥面竖向整波(横向反对称)
3	2.407	0.416	主桁横向半波
4	2.794	0.358	桥面竖向横向 3/2 波
5	2.800	0.357	桥面竖向整波(横向对称)

(3)挠度

在汽车荷载作用下,简支钢桁梁主桁跨中竖向挠

度为 40 mm,小于计算跨度的 1/500,即 60 000 m/500=120 mm,挠跨比为 1/1 500,主桁竖向刚度满足规范要求。

(4)结构内力计算

在最不利组合工况下,结构主桁上弦杆主要受压,下弦杆主要受拉和受弯,腹杆主要受拉。边主桁上弦杆最大轴力(压)6 668 kN,中主桁上弦杆最大轴力(压)11 351 kN;边主桁下弦杆最大轴力(拉)5 209 kN,最大弯矩 1 801 kNm,中主桁下弦杆最大轴力(拉)8 836 kN,最大弯矩 3 682 kNm;边主桁腹杆最大轴力(拉)1 477 kN,中主桁腹杆最大轴力(拉)2 925 kN。由结构受力分析可以看出,结构上弦杆主要以受压为主,腹杆主要以受拉为主,两种杆件在靠近节点板的端部存在一定弯矩,但数值不大。下弦杆受桥面板和腹杆影响,受力接近于连续梁,轴力和弯矩都比较大。结构整体受力接近于系杆拱桥。横向比较边主桁与中主桁各对应杆件内力,其比值近似为 0.5~0.6,多桁结构横向分配荷载比为 6:10:10:6,其空间效应较为明显。

(5)整体稳定分析

取以下工况对结构进行稳定分析:

- a. 工况 1:恒荷载;
- b. 工况 2:恒荷载+全桥活荷载;
- c. 工况 3:恒荷载+半桥活荷载;
- d. 工况 4:恒荷载+全桥活荷载+风荷载+温度作用。

在工况 1 荷载组合下结构前两阶失稳模态见图 4 至图 7。

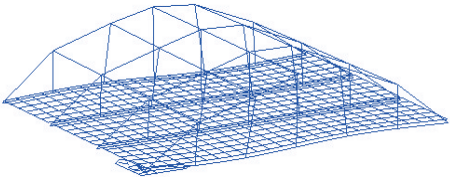


图4 工况 1 荷载作用下一阶失稳模态(三维)

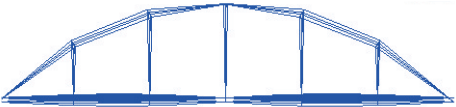


图5 工况 1 荷载作用下一阶失稳模态(正立面)

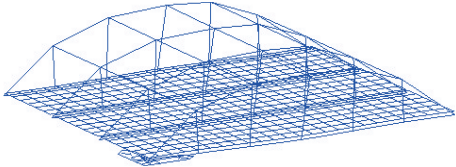


图6 工况 1 荷载作用下二阶失稳模态(三维)

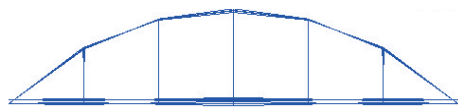


图7 工况1荷载作用下二阶失稳模态(正立面)

各工况下结构前两阶一类稳定系数见表4。

表4 各工况下结构稳定系数

荷载工况	失稳模态	稳定系数	失稳形式
1	1阶	15.070 8	上弦反对称面外失稳
	2阶	15.385 8	上弦对称面外失稳
2	1阶	8.851 7	上弦反对称面外失稳
	2阶	9.064 3	上弦对称面外失稳
3	1阶	11.154 4	上弦反对称面外失稳
	2阶	11.409 9	上弦对称面外失稳
4	1阶	8.851 4	上弦反对称面外失稳
	2阶	9.064 2	上弦对称面外失稳

整体稳定安全系数大于4,满足规范要求。

另外,通过表4可以看出,该桥活荷载加载对结构的稳定影响较明显,这主要是因为考虑8车道的汽车荷载、满布人群荷载和非机动车荷载,活载占比对结构的稳定影响相对较大。

4 结 语

本文总结了多主桁空腹拱形桁架钢桥的结构特点,并以长春市西安桥为工程实例,针对四主桁下承式简支空腹拱形桁架钢桥进行了计算分析,研究其空间力学行为,得出主要结论如下。

(1)经空间有限元程序模拟分析,四主桁结构空间受力复杂,桥面荷载在主桁之间横向分配主要

受主桁、横联竖向刚度影响。以该工程实例计算,4片主桁在桥面荷载作用下分配的荷载比近似为6:10:10:6。

(2)通过结构静力分析,得到了在荷载作用下空腹拱形桁架结构的受力状况:结构上弦杆主要以受压为主,腹杆主要以受拉为主,下弦杆轴力和弯矩都比较大。结构整体受力性能接近于刚性系杆刚性拱。

(3)通过结构稳定性分析,各工况整体稳定安全系数均满足规范要求,并且该桥活荷载加载对结构的稳定影响较明显。这主要是因为考虑8车道的汽车荷载、满布人群荷载和非机动车荷载,活载占比对结构的稳定影响相对较大。

(4)根据结构受力计算结果,主桁上、下弦杆采用箱型截面,竖杆采用工字形截面,桥面系采用正交异性整体钢桥面板。全桥用钢量1 289.31 t,折合桥面用钢量433.2 kg/m²。桥型轻巧美观、受力合理、用料节省、整体性好,便于采用现场拼装后顶推就位的施工工艺。

参考文献:

[1] 吴冲.现代钢桥[M].北京:人民交通出版社,2006.
[2] 尹一平.大跨度三主桁高速铁路桥梁静力特性分析[D].武汉:华中科技大学,2004.
[3] 周朋,张哲,黄才良,等.空腹桁架拱钢桥的稳定性分析[J].武汉理工大学学报,2010,32(15):44-46.
[4] 大连工学院工程力学系钢桥设计组.全焊空腹桁架钢桥[M].北京:人民交通出版社,1982.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

