

独塔双层钢桁梁斜拉桥结构设计分析

王继全

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要:独塔双层钢桁梁斜拉桥结构性能优越,双层通车,通行效率高,经济性好。以某工程项目为例,桥梁跨径布置为82 m+138 m+116 m,空间双索面,塔高99 m,主梁采用N形桁,桁高9.5 m,节间长度11.5 m,横向设置三片桁,中心距17.75 m;上下层桥面板均采用14 mm厚正交异性板。主塔采用弧形门式钢-混凝土混合塔,下部为实体混凝土结构,上塔柱为钢结构,中间为钢混结合段。利用有限元软件对结构进行了总体计算分析及局部受力分析,并对施工关键工况下桥塔转体进行了验算分析,保证结构受力安全性和经济性。

关键词:双层钢桁梁斜拉桥;正交异性板;钢混结合段

中图分类号:

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)09-0185-04

Analysis on Structural Design of Single-pylon Double-deck Steel Truss Beam Cable-stayed Bridge

WANG Jiquan

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: The single-pylon double-deck steel truss beam cable-stayed bridge has superior structural performance, double-deck traffic, high traffic efficiency and good economy. Taking a project as an example, the layout of bridge span is 82 m + 138 m + 116 m with the spatial double cable plane, the pylon height is 99 m, the girder is in N-shaped truss, the truss height is 9.5 m, the internode length is 11.5 m, and three trusses are set horizontally with a center distance of 17.75 m. The upper and lower bridge decks are all 14 mm thick orthotropic plates. The main pylon is a curved portal steel-concrete composite pylon. The lower part is a solid concrete structure, the upper pylon column is a steel structure, and the middle part is a steel-concrete composite section. The overall calculation analysis and local stress analysis of the structure are conducted using finite element software, and the verification analysis of the key construction condition, namely the rotation of the bridge pylon, is conducted to ensure the structural stress safety and economy.

Keywords: double-deck steel truss beam cable-stayed bridge; orthotropic plate; steel-concrete composite section

0 引言

在现代交通基础设施建设持续提质升级的背景下,城市及跨水域交通工程对桥梁结构的通行能力、空间利用率、结构性能与经济性提出了愈发严苛的要求。独塔双层钢桁梁斜拉桥作为兼具大跨越能力与高效通行优势的创新桥型,凭借结构受力性能优越、双层分向/分层通车、土地资源利用率高、综合建设与运营经济性良好等核心特点^[1-2],在交通枢纽工程中得到愈发广泛的应用,成为解决复杂地形、高密度交通需求下桥梁建设的优选方案。

为进一步探究该桥型的结构受力特性与设计合

理性,本文以某独塔双层钢桁梁斜拉桥项目为工程依托,分析桥梁复杂的结构体系与关键受力部位,同时聚焦钢混结合段这一核心受力节点进行局部受力研究,通过全面的数值模拟分析验证结构受力安全性,优化结构设计方案,实现结构安全与工程经济性的协同统一,为同类独塔双层钢桁梁斜拉桥的设计、分析与工程实践提供可靠的技术参考与理论支撑。

1 工程概况

自从我国首座全焊接的钢桁架斜拉桥上海市闵浦大桥建成通车以来^[3],双层桁架斜拉桥在国内得到了快速发展。目前更是建成了国内跨径最大,桥面最宽的双层公路钢桁梁斜拉桥——香山大桥^[4],主跨为880 m;以及最大跨径的公铁两用双层钢桁梁斜拉桥——常泰长江大桥^[5],主跨为1 176 m。还有

收稿日期: 2026-04-06

作者简介: 王继全(1985—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

很多其他学者也对钢桁架斜拉桥进行了深入的研究,如葛艳丽等^[6]对一座 90 m+128 m 的单塔双索面双层钢桁梁斜拉桥进行了设计研究;徐伟等^[7]对沪通长江大桥主跨 1 092 m 的钢桁梁斜拉桥进行了设计研究;刘琴等^[8]对牛田洋大桥主跨 468 m 的钢桁梁斜拉桥进行了设计研究;汪剑等^[9]对山区主跨 480 m 的大跨钢桁梁斜拉桥进行了设计研究;黄毅东^[10]对香山大桥主跨 880 m 的钢桁梁斜拉桥进行了设计研究。本文项目为某快速路跨江桥的节点工程,采用独塔双层钢桁梁斜拉桥,跨径布置为 82 m+138 m+116 m,总长 336 m,如图 1 所示。

主要技术标准:上层为城市快速路,双向 8 车道,设计时速 $V=80$ km/h,下层为城市主干路,双向 6 车道加人非,设计速度 $V=50$ km/h;汽车荷载采用城—A 级;Ⅲ级航道。桥梁实景图如图 1 所示。



图 1 桥梁实景图

2 桥梁总体设计

主桥平面位于直线段,主梁纵坡为 2.95%,跨中竖曲线半径 $R=3\,000.000$ m,切线长 $T=88.500$ m,外矢距 $E=1.305$ m;主梁总宽 36.5 m,横断面设置 2.0% 的双向横坡。总体立面图如图 2 所示。

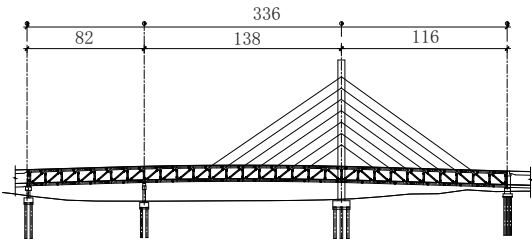


图 2 斜拉桥立面图(单位:m)

3 主桥结构设计

3.1 钢桁梁结构设计

钢桁梁桁式采用 N 形桁,桁高 9.5 m,节间长度 11.5 m,横向设置三片桁,中心距 17.75 m。

上下弦杆采用箱形截面,边桁弦杆宽 1.0 m,高 1.5 m,中桁弦杆宽 1.0 m,高 1.855 m,顺桥向设置横

隔板。钢桁梁标准横断面图如图 3 所示。

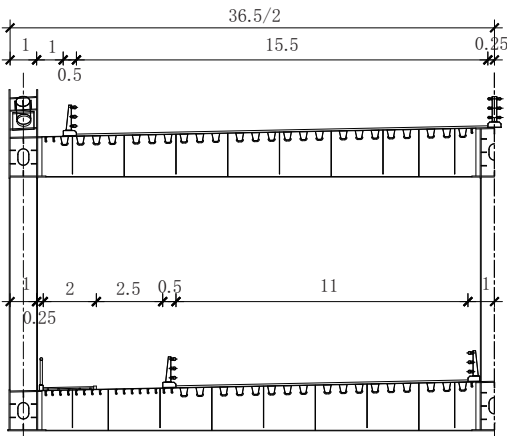


图 3 钢桁梁标准横断面图(单位:m)

竖腹杆采用箱形截面,宽 1.0 m,高 1.0 m,顶底板和腹板上各设一道加劲。

斜腹杆根据受力情况有箱形截面和工字形截面两种,宽 0.8 m,高 1.0 m,箱形截面的顶底板和腹板上各设一道加劲,考虑稳定,在工字形截面的腹板上设置加劲。

钢桁梁采用 Q345qD 钢材,节点板采用 Q370qD 钢材,与横梁相接节点板需采用 Z 向板。

3.2 主塔及基础

主塔采用弧形门式钢-混凝土混合塔,下部为实体混凝土结构,上塔柱(包括上横梁)为钢结构,上塔柱下段和上横梁采用矩形截面,上塔柱上段采用日字形截面,钢塔柱及混凝土塔间为钢混结合段。钢塔柱高 82.044 m(钢混结合段顶部以上),钢混结合段高 4 m,混凝土部分高 12.956 m(承台顶面至钢混结合段底部,含 1.1m 的混凝土塔柱),索塔总高 99 m(承台顶以上)。主塔构造图如图 4 所示。

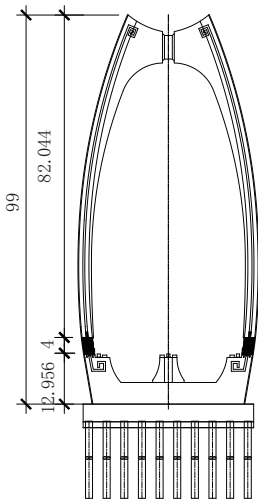


图 4 主塔构造图(单位:m)

钢塔柱横桥向宽 2.600 ~ 13.286 m,顺桥向宽 4.9 m。上横梁尺寸采用 4.9 m×3.0 m(宽×高)。塔柱曲线由三段圆曲线组成,曲线半径从上到下分别为 154.7、197.6、84.3 m。主塔斜拉索采用竖琴式布置,空间向双索面。

钢混结合段长 4.0 m,按有格室前承压板方式布置。施工时,钢混结合段和下部的 2 ~ 3 m 高的混凝土塔段共同施工,后施工段的混凝土和结合段内的填充混凝土采用 C50 低收缩混凝土。

主塔承台采用矩形承台,桩基采用 30 根 1.8 m 的钻孔灌注桩。

3.3 斜拉索

该桥斜拉索采用直径 7 mm 镀锌-铝合金平行钢丝。空间双索面,每个塔柱布置 7 对斜拉索,全桥共 28 根斜拉索,最大斜拉索长度约 106.2 m。斜拉索规格为 PES7-121。拉索在塔内张拉,在梁侧为锚固端。

3.4 结构设计特点

与常规钢桁梁斜拉桥相比,本桥设计具有以下显著特点:

(1)鉴于钢桁梁自身具有较高强度,能够承担显著比例的荷载,本桥在设计过程中基于“索辅梁桥”理念,将其构建为部分斜拉桥体系。在该体系中,钢桁梁承担的恒载比例超过 70%,而斜拉索仅承担不足 30%。相较于常规斜拉桥,本桥桥塔高度可降低约 15%,斜拉索的规模(恒载索力控制在 200 t 以内)可减小约 50%,从而有效降低桥梁整体造价。

(2)主塔采用弧形门式结构,其底部为混凝土结构,上部为钢结构,两者之间设置钢混结合段。设计时对该节段采用应力控制。在使用阶段,钢混结合段产生的拉应力不超过 1 MPa。为确保弧形主塔的施工精度与质量,提出了主塔竖向转体施工方案。该方案避免了布设高耸塔吊,提升了施工安全性,且为桥梁所在地区首次应用于斜拉桥塔的施工方法。

(3)本桥上层桥面采用厚度为 7.0 cm 的 ERS 铺装方案;为适应下层桥面通行重载车辆的需求,采用超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)加磨耗层的铺装方案。这两种铺装体系均为国内近年来针对钢结构桥梁所研发的铺装技术,可有效缓解钢梁铺装层耐久性不足的问题。

4 结构计算

主桥总体计算分析主要验算主塔和主桁梁的受力情况和变形情况,钢混结合段进行局部计算。整

体计算采用空间有限元软件 MIDAS Civil 2025 进行计算分析,采用杆系理论进行分析,计算荷载考虑恒载、活载、不均匀沉降、整体温度、斜拉索与梁温差、塔纵横向温差、日照桥面板温差和风荷载^[11-12]。

4.1 整体计算分析

桥墩墩底采用弹性约束,考虑基础刚度影响;墩梁连接处按照支座实际布置形式模拟,如图 5 所示。

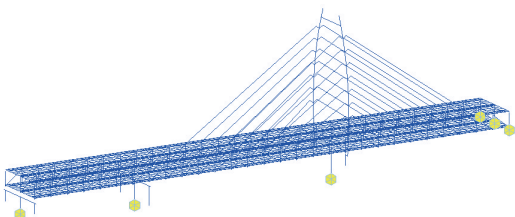


图 5 整体计算分析模型

4.1.1 强度验算

主桥各部位整体计算结果如表 1 所示,基本组合下最大应力为 248 MPa,满足钢结构桥梁设计规范要求^[13]。

表 1 主桥各部位整体计算结果

结构部位	标准组合下 最大应力/MPa	基本组合下 最大应力/MPa	结论
钢桥塔	156	201	满足
边桁弦杆	183	248	满足
中桁弦杆	174	235	满足
边桁竖腹杆	180	243	满足
中桁竖腹杆	176	238	满足
斜腹杆	174	235	满足

斜拉索通过索力优化后^[14],采用直径 7 mm 镀锌-铝合金平行钢丝,钢丝标准强度 1 670 MPa,基本组合下斜拉索最大应力值为 885 MPa,满足强度要求^[15]。

4.1.2 刚度验算

主桥活载作用下主梁和主塔的变形计算结果如表 2 所示,表中位移值主梁为最大上挠和最大下挠之和,主塔为左右最大位移值之和,变形结果满足规范要求。

表 2 变形验算

桥跨	跨径 (塔高)/m	位移/mm	位移/跨径 (塔高)	验算
南边跨	82	28	1/2 928	满足
主跨	138	58	1/2 379	满足
北边跨	116	48	1/2 417	满足
主塔	99	42	1/2 357	满足

4.2 动力特性分析

结构动力分析是进行斜拉桥抗风、抗震分析的

基础,应首先进行成桥状态的动力特性分析。主桥前四阶振型如图6所示。

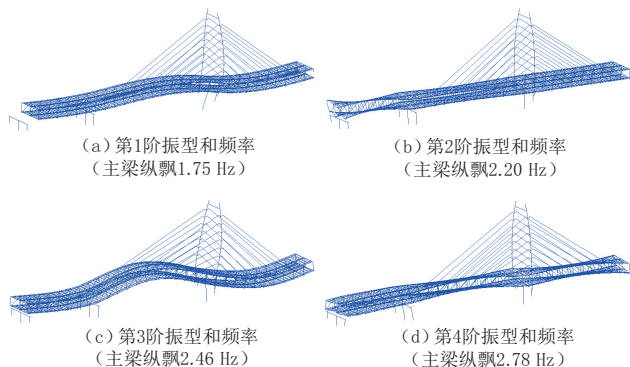


图6 振型图

从振型图来看,边墩和辅助墩对主梁的横向和竖向振动的制约作用比较明显,有利于结构抗风,同时主梁的侧向刚度较大。

4.3 主桥抗震计算

本项目位于7度区(0.1g),采用反应谱法对主桥的顺桥向和横桥向进行地震响应分析,两个方向按最不利包络后的计算结果如图7所示,地震下主梁和主塔应力均满足规范要求,不控制结构设计。

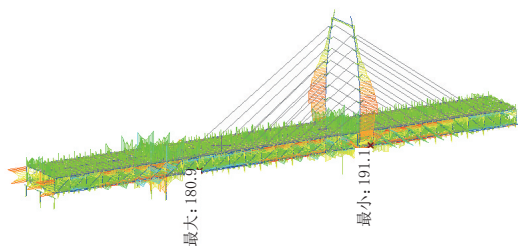


图7 主桥地震分析结果(单位:MPa)

4.4 钢混结合段局部计算

根据整体计算结果,结合段处最大标准组合轴力值为30 620 kN,最大标准组合顺桥向弯矩值为40 700 kN·m,最大标准组合横桥向弯矩值为25 200 kN·m,剪力钉采用 $\phi 20$ mm $\times$ 120 mm,根据计算顺桥向剪力钉所需数量为513个,横桥向为209个,剪力钉按竖向和顺桥向间距15 cm,横桥向间距10 cm布置,满足计算所需剪力钉数量。

结合段底部在预应力作用下未出现拉应力,顺桥向和横桥向压应力最大为14.8 MPa,未超过混凝土设计抗压强度。

5 桥塔转体分析

5.1 转体概况

综合考虑施工安全、线性可控和施工方便等因素,主塔选择整体竖转工艺进行施工,结合本项目结

构特点,采用主塔平躺拖拉竖转的方式。考虑场地条件,选择二层桥面作为主塔竖转的拼装平台,竖转部分塔高73.7 m。竖转过程需要将拼装完成的钢主塔从平躺位置竖转至铅垂位置拉索锚点设置在辅助墩上层弦杆上,整个体系形成一个三角传力结构。桥塔转体重量为1 150 t。桥塔转体示意图如图8所示。



图8 桥塔转体示意图

5.2 计算分析

整体计算采用MIDAS Civil程序的空间杆系有限元方法,主塔、压杆结构采用梁单元,钢绞线采用桁架单元。计算主塔、压杆在提升过程中的内力、变形以及各个铰点内力,并以此对结构的强度和稳定性进行校核。

5.2.1 标准组合下挠度计算

标准组合下挠度计算值如表3所示。

工况	0°	15°	30°	45°	60°	75°
挠度值	47.5	49.3	41.5	29.3	34.2	27.8

5.2.2 基本组合

0°工况下,主塔最大正应力为109.1 MPa,最大剪应力为60.2 MPa;15°工况下,主塔最大正应力为109.3 MPa,最大剪应力为45.9 MPa;30°工况下,主塔最大正应力为102.1 MPa,最大剪应力为33.1 MPa;45°工况下,主塔最大正应力为87.7 MPa,最大剪应力为21.9 MPa;60°工况下,主塔最大正应力为77.2 MPa,最大剪应力为12.9 MPa;75°工况下,主塔最大正应力为78.0 MPa,最大剪应力为7.4 MPa。满足规范要求。

6 结 语

本文桥梁目前已建设完成并投入使用,运营状况良好,极大地改善了当地繁忙的交通需求,独特的桥梁造型也构筑起了当地的靓丽风景线地标。本文桥梁结构设计新颖,施工方案先进、经济指标较低、双层通行效率较高,造型独特美观,可作为未来类似双层桁架斜拉桥的设计参考依据。

参考文献:

- [1] 吴冲.现代钢桥[M].北京:人民交通出版社,2006.
- [2] 裴伯永,盛兴.桥梁工程[M].北京:中国铁道出版社,2001.

(下转第217页)