

V形桥塔混合梁斜拉桥总体设计

张智然

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 苏州工业园区华池街跨娄江大桥采用(83+28+28.6)m V形桥塔斜拉桥。主跨为钢梁,边跨为混凝土梁,通过钢混结合段连接。横桥向为平行的双塔双索面,每个桥塔在立面上为V形,主塔柱倾角 40° 、副塔柱倾角 35° 。桥塔与主梁固结、塔底设支座。斜拉索分三段布置,采用平行钢丝斜拉索。全桥采用减隔震设计,利用摩擦摆支座降低结构地震响应。该桥西侧紧邻在建的苏州地铁8号线,桥梁采用钻孔灌注桩基础,施工时采用钢护筒,避免对地铁盾构产生影响。该桥采用支架拼装的施工方案。有限元分析结果表明,桥梁各项力学性能均满足规范要求,设计安全可靠。

关键词: 斜拉桥;V形桥塔;混合梁;减隔震体系;有限元

中图分类号: U442.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)09-0078-04

1 概述

华池街跨娄江大桥位于苏州工业园区核心区,北侧紧邻现状娄江快速路高架桥及苏州园区高铁站,西侧紧邻在建地铁8号线,如图1所示。项目建设条件复杂且对桥梁景观要求高。

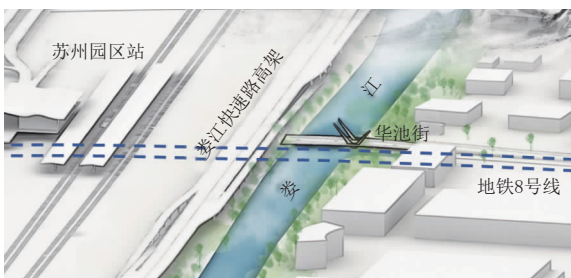


图1 桥梁区位鸟瞰示意图

桥位处娄江水面宽约77 m,规划为内河客运专线1类航道,通航净高要求不小于3.5 m。同时桥面行车净空受到北侧高架桥压制,跨娄江大桥主梁结构总高度需控制在1.6 m。综合通航要求、防洪评价及景观设计,大桥采用主跨83 m跨径方案。由于跨径大、梁高矮,跨娄江大桥宜采用缆索承重体系桥梁。

桥型概念设计采用不对称V形桥塔斜拉桥,三段式斜拉索与高低塔形力与美的平衡,勾勒出灵动的“江畔舞者”,为苏州工业园区的门户打造独特的地标景观,彰显这座城市的活力与律动。

收稿日期: 2024-05-05

作者简介: 张智然(1990—),男,硕士,工程师,从事桥梁工程设计工作。

2 主要技术标准

- (1)道路等级:城市次干路。
- (2)设计车速:30 km/h。
- (3)荷载等级:汽车荷载按城-A级;非机动车及人群荷载按规范取值^[1]。
- (4)抗震设防标准:Ⅶ度,Ⅲ类场地。
- (5)抗震设防分类:甲类。

3 桥梁总体布置

桥梁全长139.6 m,宽41.1 m。跨径布置为(83+28+28.6)m。桥塔为钢结构,主梁为混合梁,主跨为钢梁,边跨为预应力混凝土梁,钢-混凝土结合段设置在伸入边跨15 m处。主跨梁高1.5 m,至塔根附近变高至2.0 m。桥面铺装采用7 cm USFRC 混凝土+4 cm 高黏高弹 SMA-13 改性沥青。全桥共设置38根斜拉索。跨娄江大桥立面及横断面布置如图2所示。

4 结构设计

4.1 结构体系

斜拉桥结构体系主要分为漂浮体系、支承体系、固结体系和刚构体系等4种^[2-3]。该桥受力特性接近独塔斜拉桥,宜采用的结构体系有两种,分别为:(1)塔、墩、梁全固结的刚构体系;(2)塔梁固结、塔底设支座的固结体系。两种结构体系方案如图3所示。

方案1桥塔的转动被限制,结构整体刚度更大,主跨和边跨的不平衡荷载一部分被主塔基础承担,虽

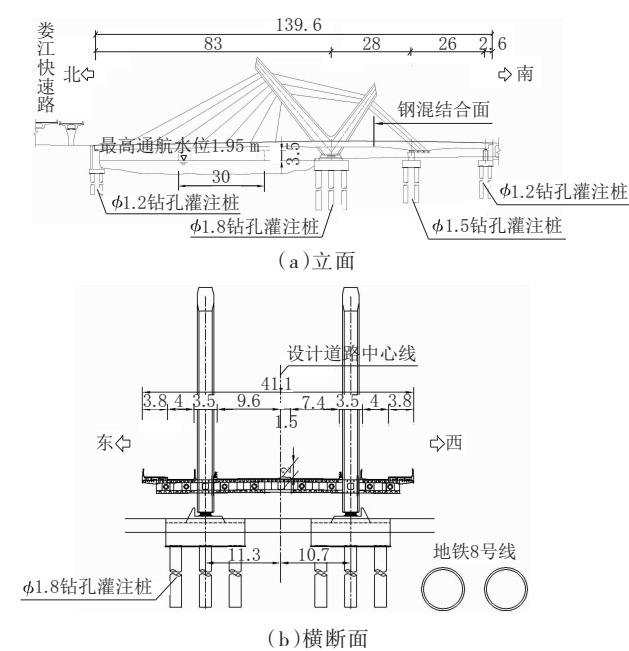


图 2 跨娄江大桥总体布置图(单位:m)

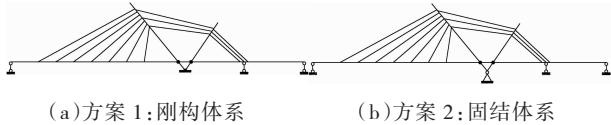


图 3 结构体系示意图

然帮助减小了辅助墩处的负反力,但是对主塔基础受力非常不利,导致主塔基础造价增加。方案 1 需要在桥塔与基础之间设置钢混结合段,构造复杂、施工难度较大,方案 2 虽然需要设置大吨位支座,但是技术成熟、施工简便。两种方案的综合比较结果见表 1 所列,可见方案 1 相比于方案 2 对结构体系受力性能的提升有限,但是施工复杂程度和工程造价显著增加,因此采用方案 2:塔梁固结、塔底设支座的结构体系。

表 1 结构体系方案比较表

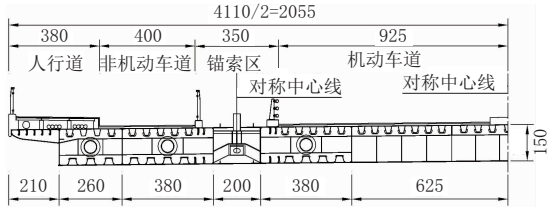
项目	方案 1	方案 2
活载辅助墩负反力 /kN	-13 841	-15 219
塔底基础弯矩 /(kN·m)	95 285	0
主跨跨中活载挠度 /mm	-49	-56
塔底连接构造	钢混结合段	大吨位支座
施工难易程度	较复杂	较简单
基础造价比	1.0	0.85

4.2 主梁结构

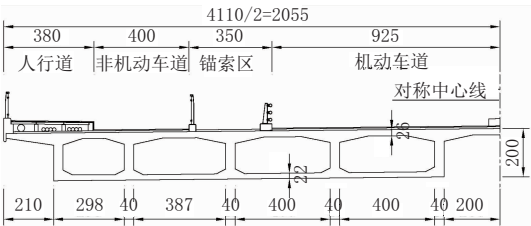
主跨梁高受净空限制,梁高较矮;边跨梁高不受限制,可根据受力需要拟定。该桥边中跨比例较小,为减小恒载作用产生的不平衡弯矩,主跨应尽量采用自重轻的结构型式,同时边跨更多起到锚固、压重

的作用。因此该桥宜采用主跨钢梁、边跨混凝土梁的钢-混凝土混合梁结构^[4],兼顾受力性能及经济性。

主跨钢梁采用双主纵梁型式,主纵梁之间设横梁,桥面板采用正交异性钢桥面板。标准段主纵梁为单箱四室截面,梁高 1.5 m,至塔根附近变高至 2.0 m。标准横梁间距 3 m。主纵梁顶板厚 16~24 mm,底板厚 20~24 mm,腹板厚 14 mm,锚固腹板厚 24 mm,见图 4(a)所示。



(a) 1/2 主跨钢箱梁标准横断面



(b) 1/2 边跨混凝土箱梁标准横断面

图 4 主梁标准横断面图(单位:cm)

边跨混凝土箱梁同样采用双主纵梁,每个主纵梁为单箱四室截面。混凝土主梁顶板厚 26 cm,底板厚度 22~60 cm。腹板厚度 40~65 cm,见图 4(b)所示。混凝土主梁为变高度,标准梁高 2 m,至辅助墩处梁高变化至 3 m。辅助墩处设置双中横梁,以传递斜拉索的锚固力,每道中横梁宽 2 m,见图 5 所示。

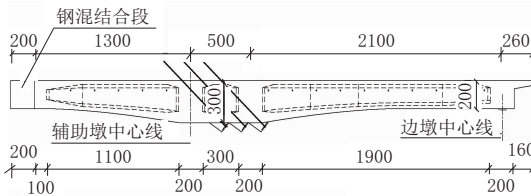


图 5 边跨混凝土箱梁立面图(单位:cm)

主梁钢-混结合段设置于边跨弯矩较小处,长度为 2.0 m。结合段设置钢格室,填充自密实混凝土,钢格室内设置开孔板和剪力钉连接件;混凝土主梁和结合段之间设置承压板,纵向预应力钢束锚固于结合段端面上,以抵抗承压面的拉力荷载,提升钢与混凝土结合的紧密性^[5]。

4.3 桥塔结构

斜拉桥常用的桥塔型式有混凝土塔、钢塔以及混合塔。由于钢材具有良好的受力性能和可加工性,近年来在异形斜拉桥中钢制桥塔得到了越来越多的应用^[6-8]。

该桥桥塔为V形(见图6),若采用混凝土结构,需要搭设斜向支架进行浇筑,施工难度较大。同时桥塔外形尺寸较为纤细,考虑到斜拉索锚固、张拉等因素,塔柱采用混凝土结构并不合适。

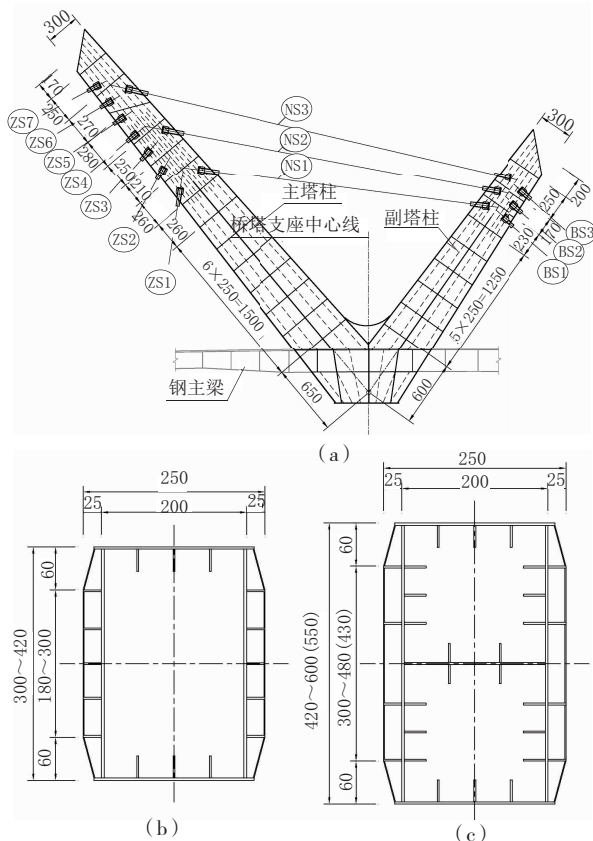


图6 桥塔构造图(单位:cm)

钢-混凝土混合结构通常是兼顾结构受力性能及经济性的桥塔结构型式。对于该桥而言,主梁也为钢-混凝土混合结构,根据主梁受力特点,主梁钢混结合段设置在边跨。在塔梁结合处主梁为钢结构,由此导致此处桥塔也应为钢结构,桥塔的钢混结合段应设置在主梁以下范围。由于主梁以下范围桥塔高度较矮、纵向尺寸较大,采用混凝土结构经济性优势并不明显,但显著增加了桥塔施工的复杂性。因此对于该桥而言,采用钢-混凝土混合结构桥塔并无显著优势。

全钢结构V形桥塔自重轻,对结构抗震有利且施工便利。该桥桥塔基础位于岸上,采用全钢塔也不存在防腐问题。基于以上分析,该桥V形桥塔采用全钢结构。

桥塔在立面上分为主、副塔柱,横桥向布置为平行的双塔双索面。主塔柱倾角 40° ,斜长41 m;副塔柱倾角 35° ,斜长27 m。主、副塔柱均为箱型截面,横桥向总宽度2.5 m,主塔柱截面高度3~6 m变化,副塔柱截面高度3~5.5 m变化。

上塔柱为单箱单室截面,以便于斜拉索锚固。中下塔柱为单箱双室截面。为增大塔内斜拉索锚固区域横向空间,上塔柱段腹板加劲肋设置在外侧,中下塔柱段腹板加劲肋转变为内外双侧布置。

4.4 斜拉索设计

相较于常规斜拉桥,该桥斜拉索分为主跨斜拉索、塔间斜拉索以及边跨尾索。斜拉索采用标准强度1 670 MPa的平行钢丝斜拉索,主跨斜拉索规格PES7-151~187,塔间斜拉索及边跨尾索规格为PES7-223。斜拉索分段较多且桥塔部空间较为受限,因此斜拉索设计时应尤其注意施工操作的便利性。

主跨斜拉索为平行双索面,每侧七根。塔间斜拉索及边跨尾索在立面上均布置三排,为避免斜拉索规格过大,每个塔柱的塔间斜拉索及边跨尾索横向均为双排。主跨斜拉索在梁上索距9 m,塔上索距1.8 m,在梁端张拉;塔间斜拉索在主塔柱侧索距4.9 m,副塔柱侧索距1.6 m,在副塔柱端张拉;边跨尾索在塔上索距1.5 m,梁上索距1.5 m,在梁底张拉。

5 结构计算分析

5.1 整体静力分析

采用有限元软件MIDAS Civil建立空间有限元模型(见图7)。主梁、主塔采用空间梁单元模拟;斜拉索采用桁架单元模拟。边界条件为:主梁与主塔固结;主梁与辅助墩及边墩为纵向活动、竖向及横向约束;塔底采用纵向、竖向及横向约束。



图7 空间有限元模型

计算结果表明:运营阶段,主跨钢箱梁最大应力213 MPa;边跨混凝土梁最大压应力为11.6 MPa,上下缘均未出现拉应力;主塔柱钢结构最大应力110 MPa,副塔柱钢结构最大应力121 MPa。桥塔弹性稳定系数4.86。

活载作用下主跨钢梁最大挠度72 mm,挠跨比为1/1 152.8,结构刚度满足规范要求。

5.2 动力特性及抗震分析

采用空间有限元软件MIDAS Civil进行结构抗震性能分析。结构动力特性见表2所列。

该桥抗震设防分类为甲类,其所遭受的地震影

表 2 结构动力特性一览表			
模态	周期 /s	频率 /Hz	振型特征
1	2.819	0.354	主桥横向扭动
2	2.333	0.429	主桥横向平动
3	2.322	0.430	主桥纵向平动
4	0.548	1.825	主塔横向平动
5	0.243	4.106	副塔横向平动

响应按地震安全性评价确定^[9]。江苏省震灾风险防治中心承担该工程场地地震安全性评价,提供了 E1 和 E2 地震加速度时程曲线。

抗震分析时采用非线性时程分析法,输入 6 组 E2 地震动加速度时程曲线进行计算,取各组计算结果的平均值。地震输入分别考虑纵桥向、横桥向及竖向地震效应;采用 Ritz 向量法计算结构振型,其中振型组合采用 CQC 法。该桥采用摩擦摆式减隔震支座,支座滑动曲面曲率半径选取为 5 m。分析结果表明,在 E2 地震作用下摩擦摆式支座发挥减隔震作用,桥墩、主塔和桩基均保持在弹性范围之内,满足抗震性能要求。

6 施工方法

该桥总体上采用支架法施工,但需要协调好斜拉索张拉、边跨预应力张拉的顺序,以减少斜拉索张拉轮次、保证结构施工期间的安全性以及达到理想的成桥状态。主要施工步骤如表 3 所列。

该桥西侧紧邻苏州市地铁 8 号线,地铁盾构与该桥施工同期实施。桥塔桩基与地铁盾构的净距为 2.12 m,辅助墩桩基与地铁盾构净距为 2.96 m,边墩桩基与地铁盾构的净距为 3.07 m。桥梁桩基施工时采用钢护筒对地铁盾构进行保护。

7 结 语

华池街跨娄江大桥设计时受到桥下通航净空和

表 3 主要施工步骤一览表	
步骤	主要内容
1	下部结构施工;钢结构后场加工
2	满堂支架施工边跨混凝土主梁;支架拼装主跨钢梁
3	施工钢混结合段,张拉第一批纵横向预应力钢束
4	安装钢梁合拢段,主梁合拢
5	支架拼装主塔柱、副塔柱钢结构
6	安装并张拉塔间斜拉索,拆除桥塔支架
7	安装主跨斜拉索、边跨尾索,分级同步张拉
8	张拉边跨主梁第二批预应力钢束,拆除主梁全部支架
9	附属设施施工
10	复测索力,必要时进行调索

桥面行车净空双重限制,选择采用 V 形桥塔斜拉桥既满足了净空及结构受力要求,也充分体现了力与美的平衡、展现了苏州工业园区的现代气质。通过优化设计结构体系、主梁及主塔结构,保证了结构受力的合理性并兼顾了经济性。通过合理的斜拉索体系设计及施工流程设计,确保了方案的可实施性、提升了施工便利性。有限元计算结果表明,华池街跨娄江大桥静力和抗震性能良好。

参考文献:

[1] CJJ-11—2011,城市桥梁设计规范[S].2019 年版.
[2] 林元培.斜拉桥[M].北京:人民交通出版社,2004.
[3] 刘士林,王似舜.斜拉桥设计[M].北京:人民交通出版社,2006.
[4] 徐国平,张喜刚,刘玉擎,等.混合梁斜拉桥[M].北京:人民交通出版社,2013.
[5] 顾超.佛山市海五路西延线工程斜拉桥主桥设计[J].城市道桥与防洪,2020(5):69-72.
[6] 蒋春海.异型钢独塔斜拉桥抗震性能分析[J].城市道桥与防洪,2024(3):63-67.
[7] 孙文峰,程应刚.怀化鸭嘴岩大桥主桥设计方案研究[J].城市道桥与防洪,2023(10):65-69.
[8] 林国伟,董俊,宋晓东.聊城跨徒骇河莲花型单塔大跨斜拉桥结构设计[J].城市道桥与防洪,2023(5):60-64.
[9] CJJ-166-2011,城市桥梁抗震设计规范[S].

《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

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com