

外倾式多跨矮塔斜拉桥方案设计和受力研究

刘畅

[上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200125]

摘要: 矮塔斜拉桥是一种介于连续梁桥和斜拉桥之间的新型桥梁结构,兼具这两种桥型的受力特点;而倾斜索面既提高了结构的抗扭特性,也优化了桥梁的景观效果。湍河大桥位于河南省南阳市内乡县,连接内乡主干路迎宾路,跨径布置为50 m+80 m+80 m+50 m,考虑城市景观方面的要求,采用外倾式矮塔斜拉桥方案。通过介绍和分析内乡县湍河大桥,对外倾式多跨矮塔斜拉桥的结构方案设计和受力特性展开研究,对比了桥塔竖直以及外倾角度对结构受力的影响,为类似工程的设计提供借鉴。

关键词: 矮塔斜拉桥;外倾式;组合梁;方案设计;受力性能

中图分类号: U448.27

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)06-0105-04

Scheme Design and Stress Research of Outer-inclined Multi-span Low-pylon Cable-stayed Bridge

LIU Chang

[Shanghai Urban Construction Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China]

Abstract: The low-pylon cable-stayed bridge is a new bridge structure between the continuous beam bridge and the cable-stayed bridge, and has the stress characteristics of these two bridges. The inclined cable plane not only improves the torsional characteristics of the structure, but also optimizes the landscape effect of the bridge. The Tuan River Bridge is located in Neixiang County, Nanyang City, Henan Province, which connects the arterial road Yingbin Road in Neixiang County. The span layout is 50 m+80 m+80 m+50 m. Considering the requirements of urban landscape, an outer-inclined low-pylon cable-stayed bridge scheme is adopted. Based on the introduction and analysis of Tuan River Bridge in Neixiang County, the research is conducted on the structural scheme and stress performance of outer-inclined multi-span low-pylon cable-stayed bridge. The influence of the vertical and outward leaning angles of the bridge pylon on the structural stress is compared, which can provide references for the design of similar projects.

Keywords: low-pylon cable-stayed bridge; outer-inclined; composite beam; scheme design; stress performance

0 引言

矮塔斜拉桥作为一种组合体系桥梁,其主要受力结构由塔、梁、索组成,相对于常规的斜拉桥,其特点为塔矮、梁刚、索集中^[1]。随着桥梁技术的发展,桥梁应用的两大趋势是十分明显的,即轻型化和组合化^[2]。相对于传统桥型,矮塔斜拉桥的优势十分明显,不仅可以提高桥梁刚度,而且还满足了城市桥梁的景观要求^[3]。

矮塔斜拉桥通常为竖直桥塔,桥塔结构受力较为简单。而外倾式矮塔斜拉桥是一种空间结构,从受力角度看,倾斜索面提高了拉索的非保向力效应,

更增强了主梁扭转、横向抗弯等性能^[4];从景观角度看,倾斜索面增强桥梁结构的层次空间感,上塔柱的景观效果尤为显著,拓宽了行车及人行角度的视野,提升了桥梁整体美观效果。

桥梁结构的力学性能与其支承体系、结构尺寸、构造设计等因素有关,外倾式桥塔为空间受力,其力学性能更应关注^[5]。基于对内乡县湍河大桥外倾式多跨矮塔斜拉桥的分析,对竖直桥塔和不同外倾角度桥塔的矮塔斜拉桥结构的受力特性进行比较,可为同类桥梁的设计提供参考。

1 工程概况

内乡县是河南省南阳市下辖县,湍河从北向南贯穿全境,是内乡县的母亲河,见证了内乡的发展,孕育着豫文化的精华^[6]。拟建桥梁连接内乡主干路

收稿日期: 2024-11-21

作者简介: 刘畅(1992—),女,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

迎宾路,跨越湍河为非通航河道,河口宽约520 m。拟建桥梁主桥采用外倾式多跨矮塔斜拉桥,跨径布置为50 m+80 m+80 m+50 m,主桥总长260 m,桥宽40 m,塔梁采用铰接。该桥总体布置见图1。

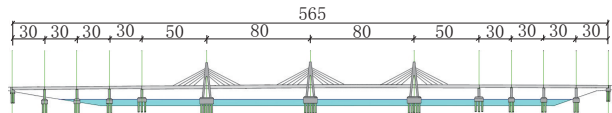


图1 湍河大桥总体布置图(单位:m)

2 桥型方案选择

湍河,古称湍水,因上游穿峡切割而下,水流湍急,故得“湍河”之名。湍河见证了内乡的发展,孕育着豫文化的精华,辽阔、坦荡、视野开阔。然而,内乡县跨湍河主要桥梁均为功能性常规梁桥,景观性较差,缺乏体现内乡特点的标志性桥梁。湍河沿线桥梁以宝天曼大桥为例(见图2)。



图2 湍河沿线桥梁

拟建桥梁连接内乡主干路迎宾路,贯通东西,处于内乡的门户位置,其整体定位等级就两侧桥梁而言更为凸出和重要。空间形态上,桥梁所处的城市天际线较为平整,缺乏有景观亮点的构筑物。因此,在此处打造一座具有景观效果的、视觉凸出的标志性桥梁建筑,对于打造城市区域地标、提高城市整体形象、沉淀内乡桥梁文化有着十分重要的意义。

鉴于桥位处无通航要求,确定桥梁跨径及桥型时,重点考虑景观效果的标志性和方案功能的合理性。矮塔斜拉桥结合了连续梁桥和斜拉桥的受力特点,桥梁荷载部分由拉索承受,部分由主梁承受^[7-8],与连续梁桥相比,提高结构刚度,满足城市桥梁的景观需求,与常规斜拉桥相比,施工简便,经济性好。

外倾桥塔的形态像张开的双手,拥抱蓝天,迎接美好;桥塔上的弧线和倒角设计使桥塔更具立体感。桥梁整体造型比例协调,呈现出一种包容、展开、欢迎的形态。采用外倾式矮塔斜拉桥结构方案,既提升了地区形象,又扩展了城市空间的多样性。湍河

大桥结构三维示意图3。

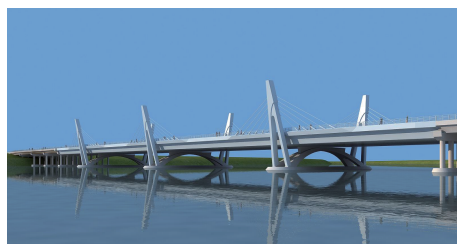


图3 湍河大桥结构三维示意图

3 结构设计

湍河大桥总长565 m,其中主桥长度260 m,为外倾式多跨双索面矮塔斜拉桥,跨径组合50 m+80 m+80 m+50 m,塔梁采用铰接。

3.1 支承体系

桥梁结构采用半漂浮体系,塔墩固结、塔梁分离,塔墩处主梁下方设置支座,保证了主梁的伸缩,同时限制了主梁的竖向位移,支承体系接近主梁有弹性支承的连续梁结构体系^[9-10]。

3.2 主梁设计

上部结构主梁采用单箱多室的等高钢-混凝土组合箱梁截面,梁高3 m,截面宽度为40 m。结构采用等高设计,既方便施工,又可以获得较好的景观效果。桥面板采用C50混凝土,板厚250~300 mm;钢结构材料采用结构钢Q345qD。梁上塔根处无索区长度20 m,跨中无索区长度28 m,拉索区长度16 m,横隔板间距4 m。

3.3 主塔设计

塔柱为外倾式钢筋混凝土桥塔,立面为人字形,塔下设提篮拱式横梁。桥塔总高23 m,桥面以上塔高16.8 m,塔柱顺桥向尺寸1.5~3.5 m,横桥向尺寸2~2.5 m。考虑到整体协调性以及景观效果,主塔外倾角度为14°。湍河大桥主桥立面及断面见图4、图5。

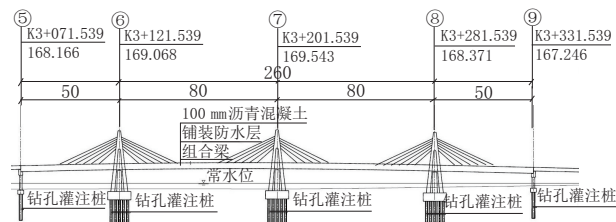


图4 湍河大桥主桥立面图(单位:m)

3.4 斜拉索设计

斜拉索采用高强镀锌平行钢丝束以及冷铸锚,钢丝标准强度 $R_{yb}=1\ 670\ \text{MPa}$ 。斜拉索采用双索面扇形布置,主梁上标准索距4 m,塔上索距1.5 m。考虑

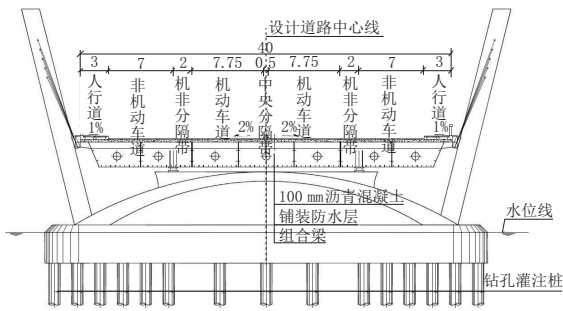


图5 湍河大桥横断面图(单位:m)

到预留张拉斜拉索的施工空间,以及后期养护、更换斜拉索所需的操作空间,主梁上的锚固区设置在外侧腹板位置^[11]。

4 结构计算分析

4.1 主要技术标准

设计使用年限为 100 a;设计安全等级为一级;重要性系数 $\gamma_0=1.1$;桥梁设计荷载取城—A 级;结构混凝土耐久性设计环境类别为 I 类环境类别;抗震设防烈度为 7 度,地震动峰值加速度为 0.1g;该桥位处湍河无通航要求。

4.2 模型建立

利用桥梁博士 V4.4 建立空间有限元模型进行计算分析。主梁、桥塔均采用梁单元模拟,边墩采用一般弹性支撑,施工过程按一次落架考虑。建立外倾式矮塔斜拉桥的主桥结构模型(见图 6)及竖直桥塔、30°外倾桥塔的矮塔斜拉桥的比较模型(见图 7、图 8)。

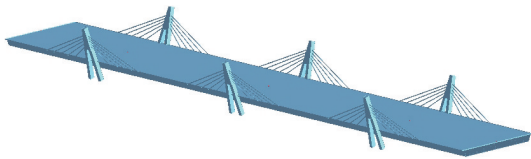


图6 外倾桥塔计算模型(14°)

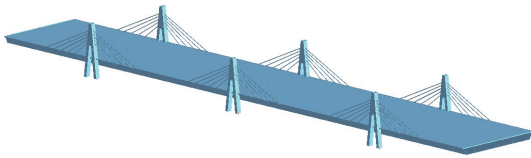


图7 竖直桥塔计算模型

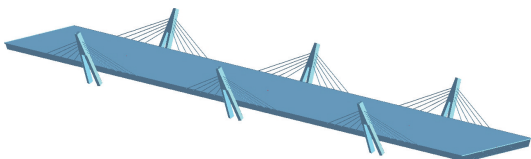


图8 外倾桥塔计算模型(30°)

4.3 静力分析

从结构受力来看,连续梁桥的受力形式为主梁受弯,斜拉桥的受力形式为主梁受压和斜拉索受拉,

而矮塔斜拉桥的受力形式则是主梁受弯、受压以及斜拉索受拉,共同组成的^[12-13]。外倾式矮塔斜拉桥在恒载及汽车荷载作用下,主梁的弯矩见图 9 至图 11。



图9 恒载主梁弯矩图(单位:kN·m)

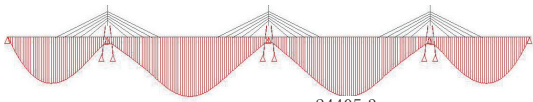


图10 汽车荷载主梁最大弯矩图(单位:kN·m)

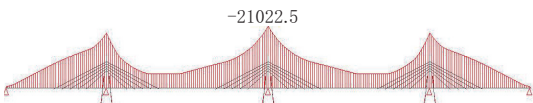


图11 汽车荷载主梁最小弯矩图(单位:kN·m)

从主梁的弯矩图可以看出,矮塔斜拉桥的支点与跨中弯矩变化较大,其受力形式更接近于连续梁桥^[14]。这是由于本桥宽度较大,由于横向受力控制,梁高较高,而跨径相对于常规矮塔斜拉桥相对较小,主梁的刚度较大,因此,总体的受力状态更接近于连续梁桥。

对比不同角度外倾桥塔和竖直桥塔的矮塔斜拉桥,恒活载作用下,主梁的弯矩计算结果见表 1。

表 1 主梁计算结果		单位:kN·m		
荷载类型	桥塔形式	恒载	汽车荷载	人群荷载
最大跨中正弯矩	竖直桥塔	127 214	23 999	7 040
	14°外倾桥塔	128 503	24 405	7 193
	30°外倾桥塔	130 640	25 026	7 425
最大支点负弯矩	竖直桥塔	226 304	20 580	9 404
	14°外倾桥塔	229 658	21 022	9 611
	30°外倾桥塔	236 459	22 181	10 146

通过外倾桥塔和竖直桥塔的弯矩对比可知,在恒载及活载作用下,随着桥塔外倾角度增加,结构内力有所增加,但差异不大,约 2%~8%。但由于桥塔外倾,塔身为空间受力,其受力性能复杂,塔身倾斜角度不宜过大。

4.4 动力分析

动力性能是结构的固有特性,可以通过自振频率和振型来表达。研究结构的动力性能可以从总体上分析得出桥梁设计的合理性^[15]。对结构自振特性进行计算,提取不同外倾角度桥塔及竖直桥塔的矮塔斜拉桥前 5 阶自振频率、振型特征见表 2。

从表 2 中外倾桥塔(14°)矮塔斜拉桥的自振频率及振型性可以看出,外倾式矮塔斜拉桥主桥成桥

表2 结构自振特性

振型 阶数	竖直桥塔矮塔斜拉桥		外倾桥塔(14°)矮塔斜拉桥		外倾桥塔(30°)矮塔斜拉桥	
	频率 <i>f</i> /Hz	振型特性	频率 <i>f</i> /Hz	振型特性	频率 <i>f</i> /Hz	振型特性
1	1.45	主梁反对称竖弯+主塔纵弯	1.42	主梁反对称竖弯+主塔纵弯+次中墩 桥塔横弯	1.39	主梁反对称竖弯+主塔纵弯+次中 墩桥塔横弯
2	1.91	主梁对称竖弯+次中墩桥塔纵弯	1.89	主梁对称竖弯+次中墩桥塔纵弯+中 墩桥塔横弯	1.84	主梁对称竖弯+次中墩桥塔纵弯+ 中墩桥塔横弯
3	2.59	桥塔横弯(中墩为主)	2.40	桥塔横弯(次中墩为主)	2.30	桥塔对称横弯
4	2.59	桥塔横弯(次中墩为主)	2.40	桥塔横弯(次中墩为主)	2.30	桥塔反横弯(次中墩为主)
5	2.59	桥塔横弯(次中墩为主)	2.40	桥塔横弯(中墩为主)	2.31	桥塔反对称横弯

状态下,结构纵向刚度小于横向刚度,结构一阶振型表现为主梁纵弯及主塔竖弯。通过提取桥梁前十阶振型,均未发生主梁横弯及扭转,说明主梁横向刚度及抗扭刚度较大,主要是由于桥梁较宽,横向稳定性较好。为了达到整体的景观效果,桥塔尺寸较小,使得各阶振型均发生了桥塔的纵弯或横弯,应重视桥塔刚度设计。

从表2中外倾桥塔和竖直桥塔的对比可以看出,外倾桥塔的自振频率相对于竖直桥塔相对较小,减小幅度3%~12%。桥塔外倾使得桥梁自振频率降低,自振周期增大,结构刚度降低,对结构受力较为不利。

5 结 语

本文基于内乡县湍河大桥,对外倾式多跨矮塔斜拉桥结构方案和受力性能进行研究,得出以下结论。

- (1)外倾式矮塔斜拉桥,将主塔设计成为向外倾斜的状态,使桥型结构的美学效果得到提升,桥梁结构空间受力复杂,对该桥型结构进行受力分析很有必要。
- (2)矮塔斜拉桥主梁的横向刚度及抗扭刚度较大,总体的受力状态更接近于连续梁桥。
- (3)桥塔外倾角度会影响结构的受力特性,综合考虑景观效果、静动力特性,外倾角度不宜过大。

参考文献:

[1] 王奎涛,关伟,宋磊.基于影响矩阵法的外倾式矮塔斜拉桥索力优化[J].山东交通科技,2024(2):6-9.

[2] 陈从春,周海智,肖汝诚.矮塔斜拉桥研究的新进展[J].世界桥梁,2006(1):70-73.

[3] 温雅军.外倾式矮塔斜拉桥临时体外索施工阶段力学分析[D].西安:长安大学,2021.

[4] 李春.外倾式矮塔斜拉桥墩塔设计实践[J].中外公路,2019,39(3):147-150.

[5] 关伟,王奎涛,宋磊.基于有限元的外倾式双索面矮塔斜拉桥动力特性参数敏感性分析[J].兰州工业学院学报,2023,30(4):34-37.

[6] 程赓,朱浩记,赵彩霞.五彩缤纷湍河——内乡县人大助推母亲河生态工程建设纪实[J].河南水利与南水北调,2020(4):8-9.

[7] Kim K S, Lee H S. Analysis of target configurations under dead loads for cable-supported bridges[J]. Computers & Structures, 2001(79): 2681-2692.

[8] 吴祖根.矮塔斜拉桥设计综述[J].市政技术,2010(1):73-76.

[9] 吴清伟.矮塔斜拉桥构造设计与关键力学特性研究[D].北京:北京建筑大学,2012.

[10] 毕洪涛.矮塔斜拉桥主梁受力分析与优化[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.

[11] 陈斌.宽幅预应力混凝土矮塔斜拉桥设计[J].上海公路,2017(2):53-57.

[12] 楼旦丰,蔡金标,李鹏昊.不对称矮塔斜拉桥设计参数分析[J].低温建筑技术,2015,37(5):55-57.

[13] 黎璟.矮塔斜拉桥墩顶水平力计算及宽幅箱梁空间效应研究[D].杭州:浙江工业大学,2020.

[14] 薛玉香.开封黄河桥七塔部分斜拉桥力学性能分析[J].交通运输研究,2012(2):105-109.

[15] 周翔.矮塔斜拉桥结构行为研究与设计实践[D].成都:西南交通大学,2009.