

怀化鸭嘴岩大桥主桥设计方案研究

孙文峰,程应刚

(中铁大桥勘测设计院集团有限公司,湖北 武汉 430056)

摘 要: 怀化鸭嘴岩大桥主桥为(200+74+45)m 曲线独塔双索面混合梁斜拉桥,对大桥的结构体系、主塔结构型式、主跨主梁结构型式及主梁压重设置等进行研究,并建立了空间有限元模型对结构进行分析。结果表明:采用斜腿与主梁固结,主塔处设置支座的新型组合式刚构体系,显著优化结构整体受力;主塔采用钢-混混合结构,主梁采用混合梁结构,可提高结构的耐久性,同时减少工程造价;主梁压重设置在腿梁固结处,有利于减少塔底不平衡弯矩,改善斜腿及基础的受力。

关键词: 斜拉桥;曲线桥塔;结构体系;混合梁;有限元;桥梁设计

中图分类号: U442.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)10-0065-05

1 概 述

怀化鸭嘴岩大桥位于怀化市中心偏西南方向,横跨溇水河,北接经开区规划舞阳大道,南连中方县规划南湖路,是加快经开区与中方县融合,推进鹤中芷一体化的重要工程。

为打造独特的桥梁景观,实现历史、文化和美学价值的建设目标,对该桥开展了专项的景观概念设计,景观效果图见图 1 所示。桥塔整体造型为“鹤”型,曲线轻盈优美,造型新颖独特,形似溇水河边翩翩起舞的仙鹤,寓意怀化的古称“鹤州”与别名“鹤城”,体现了功能、技术、经济、美观和历史文化和谐统一。



图 1 景观设计效果图

水河是沅水上游一级支流,桥位处常水位下河道宽约 207 m。规划航道等级为内河Ⅳ级航道,单向通航孔净宽不小于 45 m,双向通航孔净宽不小于 90 m,通航净高不小于 8.0 m。桥位处平均气温 16.4℃,极

端最高气温为 38℃,极端最低气温为 -4℃。桥址处两岸地形起伏不大,右岸地形坡度 15°~20°,左岸除河岸岸坡处地形坡度达 40°左右外,其余地段变化不大。桥位处下伏基岩主要为白云质灰岩,并发育有溶洞。

综合考虑景观设计、规划航道的适应性和行洪评估要求,大桥采用主跨 200 m 独塔斜拉桥方案。

2 结构特性分析

近年来随着经济发展和桥梁景观的要求不断提高,涌现出一系列造型新颖独特的斜塔斜拉桥,如塞维利亚阿拉米略桥^[1]、荷兰鹿特丹港 Erasmus 桥^[2]、西班牙 Ebro 河桥^[3]、长沙洪山桥^[4]等。

常规斜塔斜拉桥的桥塔均向岸侧倾斜,除去美观上的需要之外,也体现了结构受力上的合理性。桥塔的受力表现为在斜拉索索力和其自身重力作用下的悬臂梁,向岸侧倾斜的桥塔依靠塔身的自重力矩,抵抗主跨桥面荷载通过拉索传递的倾覆力矩,可大幅减少边跨斜拉索的用量,甚至做到无背索结构^[5-6],塔身自重对结构整体受力有利。

对该桥而言,由于景观造型的需要,曲线型桥塔向河心倾斜(偏心距达 15 m),塔身自重成为结构受力的负担。在塔身自重 W_t 和拉索竖向分力 F_{sv} 共同作用下,塔底会产生不利的向河心侧倾覆弯矩 M_t [$M_t=(F_{sv}+M_t)l_t$],因此边跨侧拉索水平分力 $F_{sh边}$ 除需平衡主跨侧拉索水平分力 $F_{sh主}$ 外,还需要提供额外的水平力 $F'_{sh边}$ 来平衡主塔倾覆弯矩 M_t ,从而引起该桥主跨主梁水平力 $F_{dh主}(=F_{sh主})$ 和边跨主梁水平力

收稿日期: 2022-12-01

作者简介: 孙文峰(1987—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁工程设计工作。

$F_{dH\text{边}} (=F_{sH\text{边}})$ 的不平衡。

基于结构特性分析,塔底不平衡弯矩与桥塔重量和中跨主梁重量正相关,故该桥设计思路为减轻桥塔和主跨主梁自重,从而减小塔底倾覆弯矩和基础的规模;同时增加边跨主梁重量,以避免边跨支座出现负反力(见图2)。

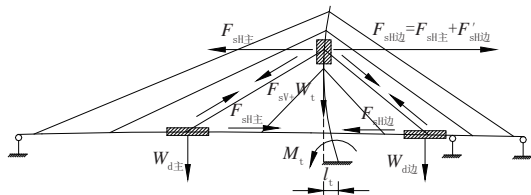


图2 结构受力特性示意图

3 结构体系

斜拉桥主要分为漂浮体系,半漂浮(支承)体系,塔梁固结体系,刚构体系等4种结构体系^[7-8]。

通过结构特性分析,该桥主塔两侧主跨主梁水平力 $F_{dH\text{主}}$ 和边跨主梁水平力 $F_{dH\text{边}}$ 并不平衡,分别等同于主跨侧拉索水平分力 $F_{sH\text{主}}$ 和边跨侧拉索水平分力 $F_{sH\text{边}}$,若主梁在纵桥向无约束,主梁会在不平衡水平力 $F'_{sv\text{边}}$ 作用下,向主跨方向偏移,因此该桥不能采用漂浮体系和半漂浮体系。

常规独塔斜拉桥多采用刚构体系,刚构体系塔、梁、墩固结,具有结构刚度大、主梁和塔柱挠度小、避免设置较大吨位支座等优点,且传力较为直接,不平衡水平力在固结处即可实现平衡。

考虑到该桥结构布置特殊性,为使结构整体受力最优,拟定三种刚构体系方案进行比选,结构体系方案见图3所示。

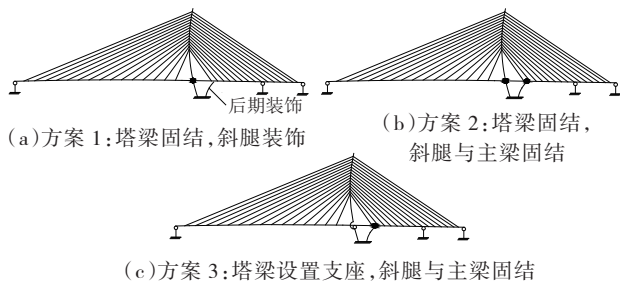


图3 结构体系示意图

方案1和方案2中,均采用塔梁固结体系。但由于本桥主塔在纵、横两个方向均弯曲倾斜,塔柱呈现空间扭转曲线,为满足受力需要,下塔柱需采用较大的截面尺寸。采用塔梁固定体系,下塔柱与主梁横梁形成横桥向刚架结构,由于下塔柱横向刚度较大,在固结处活载、温度及横向预应力等荷载作用下,下塔柱产生较大的次内力,无法满足受力要求。方案3中,斜腿与主梁固结,由于斜腿截面和横向刚度相对

较小,横向框架满足要求,主梁边、主跨不平衡水平力通过斜腿传递至承台,与边、主跨斜拉索不平衡水平分力在塔柱上产生的水平剪力,在承台顶面处实现平衡。

该桥采用的结构体系为:斜腿与主梁固结;主塔、辅助墩及两侧边墩均采用双向活动支座;横向设置抗风支座。

4 结构设计

4.1 主塔结构

由于钢材具有良好的受力性能和可焊接性,能满足主塔各种造型的需要,近年来在异形斜拉桥中钢制主塔得到了越来越多的应用。

常规的斜塔斜拉桥,直线桥塔多采用混凝土结构,折线塔和曲线塔采用钢结构或钢-混组合结构,如荷兰Erasmus桥等。对于该桥,由于桥塔在纵、横向曲率均较大,上塔柱尺寸相对较小,考虑到斜拉索锚固等因素,上塔柱采用混凝土结构并不适合。

设计中对主塔进行了钢结构和钢-混混合结构两种方案的研究比选,见表1所列。

表1 主塔方案分析比较表

项目	钢结构	钢-混混合结构
塔底弯矩	$7.621 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}$	$1.045 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}$
塔顶位移	92.4 mm	76.1 mm
主跨挠度	373.2 mm/(L/536)	301.3 mm/(L/664)
工程数量	钢材:3 000 t	钢材:2 400 t; 混凝土:1 303 m ³
工程造价	4 619.5 万元	3 999.5 万元

两种结构型式受力均能满足要求,且工程实例均较多,施工工艺成熟,钢桥塔方案经济性稍差。由于钢桥塔方案塔柱底部钢混结合面位于常水位以下,钢结构易产生腐蚀,耐久性较差。基于降低工程造价和提高耐久性方面的考虑,采用钢-混混合桥塔方案,桥面以上塔柱为钢结构,桥面以下塔柱为混凝土结构。桥塔构造图见图4所示。

4.2 主梁结构

结合概念设计景观方案和桥址处建设条件,跨径布置拟采用200+74+45(m)。由于该桥边跨过短,边中跨比例较小,并结合结构特性分析,主跨主梁重量应减轻,边跨主梁重量宜增加的思路,主梁总体设计方案为采用混合梁结构型式:边跨主梁采用混凝土主梁(可适当压重),减少造价同时增加边跨平衡重,保证边墩支座不出现负反力;主跨主梁采用钢梁

由于该桥采用混合梁结构,通过对计算分析,边跨梁端支座最小反力为:3 591.4 kN(单个),支座并未出现负反力。但是在主梁不平衡水平力作用下,斜腿下缘受拉,因此该桥压重设置在斜腿与主梁固结处,压重布置见图7所示。主梁压重的作用主要体现在以下两点:

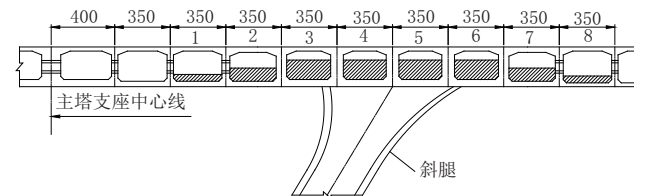


图7 主梁压重示意图

(1)该桥边、主跨主梁存在约1 335.4 t的不平衡水平力,通过斜腿传递至承台顶,与主塔水平剪力相平衡。在主梁不平衡水平力和拉索竖向力的作用下,斜腿下缘处于受拉状态,斜腿底部产生顺桥向弯矩,斜腿顶主梁压重可产生相反的弯矩与之相平衡,极大改善斜腿的轴向受力。

(2)斜腿顶主梁压重可以对主塔底产生向河岸侧的弯矩,使结构重心向边跨侧偏移,从而有效减少主塔底向河心侧倾覆弯矩,优化主塔和基础的受力状态(见图7)。

主梁压重重量以恒载作用下斜腿全截面均匀受压为标准,斜腿仅承担活载及附加荷载的弯矩作用,经计算压重总重量为1 720 t,采用铁砂混凝土压重,主塔塔底弯矩可减少约335 400 kN·m。

5 总体布置

通过方案分析研究,优化了该桥的结构布置和构造细节,主桥采用曲线独塔双索面斜拉桥,跨径布置为200+74+45(m),桥面宽36 m。主塔采用钢-混凝土混合结构,总高度为100 m;下塔柱高15 m,采用混凝土结构,上塔柱高85 m,采用钢结构,交界面处设置钢-混结合段。主梁采用混合梁结构,边跨采用预应力混凝土箱梁,主跨采用钢箱梁,钢-混凝土结合面设置在伸入主跨9 m处。斜腿采用预应力混凝土箱型结构。斜拉索采用平行钢丝斜拉索,塔上索间距为3 m,主跨索间距为12 m,边跨索间距为7 m。主塔墩采用中间设系梁的分离式承台、钻孔灌注桩基础^[10]。主桥总体布置见图8所示。

6 结构计算分析

对通过方案比选确定的推荐方案进行试设计研究,并进行了静、动力计算分析。

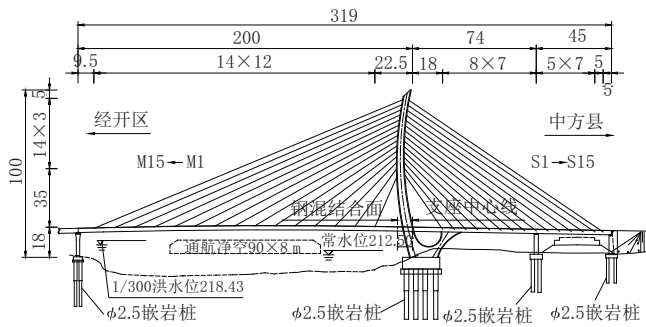


图8 主桥总体布置图(单位:m)

6.1 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9)。主梁、主塔和斜腿均采用空间梁单元模拟;拉索采用桁架单元模拟。边界条件为:主梁与主塔纵向活动、竖向及横向约束;主梁与斜腿固结;主梁与辅助墩、交界墩及边墩为纵向活动、竖向及横向约束;斜腿底和塔底采用固结。

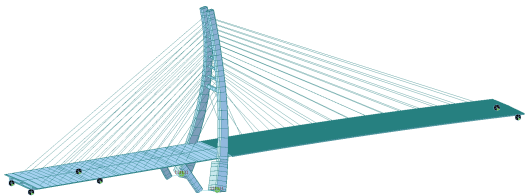


图9 空间有限元模型

计算结果表明:运营阶段,主跨钢箱梁最大压应力113.0 MPa,最大拉应力-76 MPa;边跨混凝土梁最大压应力为15.3 MPa,上下缘均未出现拉应力;主塔钢结构最大压应力120 MPa,最大拉应力-30 MPa;混凝土下塔柱最大压应力为10 MPa,塔底最大拉应力-0.7 MPa;斜腿最大压应力为12.6 MPa,最大拉应力0.13 MPa;钢横撑最大压应力为79 MPa。

活载作用下主跨主梁最大向下位移-297.6 mm,向上位移3.7 mm,挠跨比为1/663.8,结构刚度满足1/400的规范要求。

6.2 动力特性及抗震分析

采用空间有限元软件 Midas Civil 对该桥进行了结构动力分析,结构动力特性见表3所列。

表3 结构动力特性一览表

模态	振型特征	自振频率 f /Hz	自振周期 T /s
1	主梁竖弯	0.514 0	1.945 6
2	主塔侧弯	0.851 0	1.175 1
3	主梁竖弯	0.921 9	1.084 7
4	主梁竖弯	1.056 4	0.946 6
5	主梁扭转	1.160 8	0.861 5
6	主梁横弯	1.175 5	0.850 7

由结果可知,该桥一阶为主梁竖弯失稳,二阶为主塔侧弯失稳,三~六阶均为主梁失稳,A型桥塔和空间双索面布置,为大桥提供了较好的竖向刚度和扭转刚度

根据《城市桥梁抗震设计规范》,该桥属于A类桥梁,采用反应谱法进行抗震计算。结果表明,在E1地震作用下,桥墩、主塔和桩基弯矩最不利截面弯矩均小于截面初始屈服弯矩,均保持在弹性范围之内;在E2地震作用下,桥墩、主塔和桩基弯矩安全系数均大于1,桥墩、主塔和桩基构件只发生可修复损伤,满足抗震性能要求。

7 结 语

怀化鸭嘴岩大桥采用主跨200m曲线独塔混合梁斜拉桥方案,桥塔呈“鹤”形,凸显了桥梁景观,又完美契合了当地的历史文化,实现了使用功能、结构受力和桥梁景观的和谐统一,为以后类似桥梁设计提供了有益的思路和借鉴。本文介绍了该曲线塔斜拉桥的设计研究过程,选择了合理的结构体系及主梁、主塔构造,并建立了空间有限元模型进行了计算分析,确保了结构的安全性。主要有以下结论:

(1)采用斜腿与主梁固结的新型组合式刚构体系,有别于独塔斜拉桥常采用的墩塔梁固结体系,优化了结构整体受力。

(2)主塔采用钢-混凝土混合结构,上塔柱采用

钢结构,满足了结构造型的需要,同时减轻了上塔柱自重;下塔柱采用混凝土结构,提高了塔柱的耐久性,同时减少了造价。

(3)主梁采用混合梁结构,主跨主梁采用钢箱梁,减轻了主梁自重,优化了塔柱和基础受力;边跨主梁采用现浇混凝土箱梁,减少造价同时增加边跨平衡重。

(4)主梁压重设置在斜腿顶处,优化了斜腿的受力,减少塔底不平衡弯矩,改善了主塔及基础的受力。

参考文献:

- [1] 朱勤.塞维利亚阿拉米略桥的建造[J].国外桥梁,1996(2):7-10.
- [2] Reusink,Kuijpers. Designing the Erasmus Bridge,Rotterdam [J]. Structural Engineering International,1998,8(4):275-277
- [3] 王伯惠.斜拉桥结构发展和中国经验(上册)[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [4] 邵旭东,李立峰,赵华,等.长沙市洪山桥竖琴式斜拉桥的设计[J].湖南大学学报(自然科学版),2001,28(4):88-93.
- [5] 陈爱军,邵旭东.无背索竖琴式斜拉桥混凝土斜塔柱合理结构型式分析[J].公路工程,2007,32(4):130-135.
- [6] 项海帆等著.桥梁概念设计[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [7] 林元培.斜拉桥[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [8] 刘士林,王似舜.斜拉桥设计[M].北京:人民交通出版社,2006.
- [9] 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.
- [10] 中铁大桥勘测设计院集团有限公司.怀化市鸭嘴岩大桥工程初步设计[Z].武汉:中铁大桥勘测设计院集团有限公司,2016.

(上接第50页)

4 结 论

高快速路往往存在通过性强、对地方服务弱等特点,如何充分发挥其对地方经济的支撑和服务作用,是需要深入探讨研究的问题。关键思路如下:

(1)优化高快速路线位布局,避免对城市造成严重分割,制约城市发展边界。

(2)强化地方衔接道路交通功能,提升骨架路网通行能力。

(3)优化高快速路节点布局及节点形式,强化地

方道路与高快速路的衔接。

参考文献:

- [1] GB/T 51328—2018,城市综合交通体系规划标准[S].
- [2] 张宁.大城市高速公路和快速路一体化布局规划研究[D].南京:东南大学,2016.
- [3] 吴利金,赵国锋.广佛同城化区域交通一体化规划实践[J].西部交通科技,2011(4):85-89,94.
- [4] 涂圣文,过秀成,刘海强.干线公路与大型城市结点的系统衔接模式[J].规划师,2013,29(7):97-100.
- [5] 汪勇,杨凯健,王啸君.组团城市快速通道体系研究—以太仓市为例[J].城市道桥与防洪,2022(3):16-19,23.