

三跨连续钢箱系杆拱桥的设计与施工

李训祥¹,丁永峰²

(1.苏州交通工程集团有限公司设计分公司,江苏 苏州 215100;2.华设设计集团股份有限公司,江苏 苏州 215000)

摘要:壁虎河大桥复建工程为扬州市重大民生工程。桥梁跨越省级流域性骨干河道壁虎河,该河为淮河入江水道,承担重要泄洪和排涝功能。主桥采用(41+150+41)m三跨连续钢箱系杆拱结构,桥梁采用少支架拼装施工,桥梁布跨和施工方案已充分考虑河道的排泄影响。通过主要介绍跨壁虎河三跨连续钢箱系杆拱桥的总体设计、结构设计、结构计算、施工方案等内容,为类似工程提供参考和借鉴。

关键词:民生工程;跨河桥梁;省级流域性骨干河道;钢箱系杆拱桥;少支架拼装施工

中图分类号:U442.5

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2024)03-0151-05

1 概述

壁虎河大桥复建工程是扬州生态科技新城山河岛出行的唯一通道,是重大民生工程。壁虎河为淮河入江水道起点段,是江苏省流域性骨干河道,是重大的防洪、排涝、调水、航运工程,水利等级较高。项目位于壁虎河弯道处,且河道水域宽度较大,桥梁跨越要求高。壁虎河大桥复建工程跨河道主桥采用(41+150+41)m三跨连续钢箱系杆拱结构,尽量减少水中设墩数量。同时利用拱式桥梁高较低的结构特点,使桥梁在两侧被交道路前尽快落地,有效提升与周边路网的沟通效率。

桥梁施工方案充分结合河道水利等级高、航道等级低(等外级航道)的特点,采用少支架拼装施工,施工避开主汛期。桥梁主跨采用内倾的拱肋造型,新颖美观,与周边环境协调融合,景观效果好。桥梁方案效果详见图1。



图1 跨壁虎河钢箱系杆拱桥

2 设计标准

(1)道路等级:城市支路。

收稿日期:2023-09-28

作者简介:李训祥(1980—),男,本科,高级工程师,从事桥梁设计与管理工作。

(2)设计速度:30 km/h。

(3)大堤及防汛通道净高:原大堤不小于2.5 m,防汛通道不小于4.5 m。

(4)设计荷载:

a. 汽车荷载:城-A级。

b. 人非荷载:按《城市桥梁设计规范》(CJJ 11—2011)(2019年版)第10.0.5、10.0.6条取用。

(5)通航等级及净空尺度:等外级航道,通航净空(12.0×2.5)m,最高、最低通航水位分别为5.83 m和3.33 m。

(6)抗震要求:桥位处地震动峰值加速度为0.15g,地震基本烈度为7度。

(7)安全等级:I级。

(8)100a一遇防洪水位:7.33 m。

(9)环境类别:I类环境。

(10)桥梁设计基准期:100 a。

(11)桥梁设计使用年限:100 a。

3 桥梁总体设计

壁虎河大桥复建工程跨河桥梁方案受区域文化、建设周期、生态环保、建设条件、通行安全、水利航道要求、桥梁景观、泄洪影响等多方面制约,桥梁总体设计针对这些因素,分析与比选情况如下:

(1)壁虎河大桥复建工程是连接扬州市广陵区湾头镇与生态科技新城山河岛的一条生活性道路。项目两端以古镇玉器、生态文旅产业为主,桥梁应与周边环境协调融合。

(2)本工程为老桥复建工程,老桥梁被误入河道

的大型船只撞击损毁。目前在老桥西侧修建临时钢便桥保通。钢便桥设计保通年限 3 a,新建桥梁需在钢便桥设计年限到期前建成并投入运营。因此,新建桥梁施工工期是方案选择的重要考虑因素之一,桥梁结构在满足功能、景观要求的同时,应优先选择施工工期较短的桥型。

(3)桥位处河道属国家级生态红线范围,需尽量减少桥梁建设对生态红线的侵占,故新建跨河桥梁考虑在老桥处原位复建。

(4)道路平面线形受项目起终点、沿线拆迁、古建文物、用地规划等多重因素的影响,跨河桥梁两端均设置了小曲线半径。部分主桥位于小半径超高加宽段落,增加了设计的难度。道路总体平面布置见图 2。

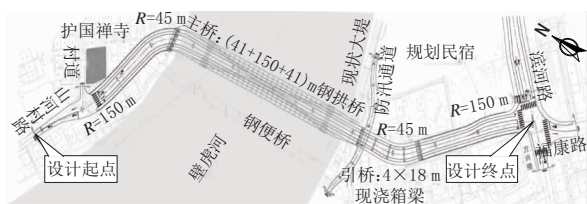


图 2 道路总体平面图

(5)本工程路线长度短,河道两侧被交道路距离较近,上跨桥梁在交叉口落地困难,主桥应尽量采用结构高度较小的桥型方案,以满足道路纵坡要求,保障交叉口通行安全。

(6)壁虎河为省级流域性骨干河道,河道防洪排涝和堤防安全要求高。桥位处水域宽度较大(河口宽大于 200 m),且位于河流弯道上,为减少桥梁河中设墩对河道的阻水影响,桥梁尽量采用大跨径跨越,减少水中设墩数量。河道堤岸兼具防汛通道功能,上跨结构下方应保留不小于 4.5 m 净高。高度不足时,需另设防汛通道。防汛通道净空不得小于 6 m×4.5 m (宽×高),且老堤岸净空应满足人通行的需求,净高不得小于 2.5 m。结合水利主管部门意见,主桥跨径采用 150 m,主跨两个桥墩位于河道中,其余桥墩均位于河岸上,桥跨布置需避开河道堤岸和护坡范围。

(7)壁虎河为等外级航道,桥跨布置及桥下净空需满足等外级航道净空要求,航道通航净空为 12.0 m×2.5 m,最高、最低通航水位分别为 5.83 m 和 3.33 m。

(8)跨河桥梁为主跨 150 m 的大型桥梁,且桥梁位于广陵区湾头古镇和山河岛生态旅游区附近,对桥梁造型和景观效果有较高的要求。同时本着节约的原则,主桥方案经济性也是本工程设计的重要考虑因素。

(9)因河道较宽,跨河桥梁除了主跨桥墩落在水中,其余墩均需上岸,主跨两侧引桥跨径均大于 40 m,且引桥平面位于超高变宽范围,无法选用常规的预制吊装结构。若采用现浇混凝土结构,需在河中搭设支架,对河道防洪排涝有一定影响。因此,考虑主桥采用三跨结构(详见图 3),并将主跨拱肋线形延伸至边跨,进一步提高拱桥的整体景观效果和结构受力性能。

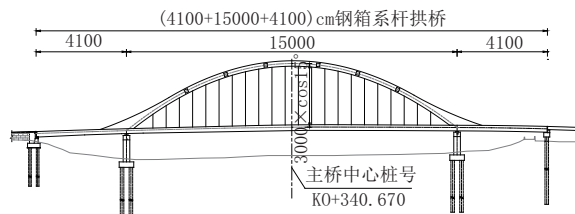


图 3 钢箱系杆拱桥立面图(单位:cm)

综合以上多个控制因素的分析 and 方案比选,确定主桥采用 (41+150+41)m 三跨连续钢箱系杆拱桥方案。主跨桥面标准宽度为 24.6 m,边跨桥面变宽,宽度为 18~24.6 m。下部结构主墩采用框架墩,过渡墩采用圆柱式墩,采用钻孔灌注桩基础。桥梁中心线与壁虎河河道中心线交角为 84°。

4 主桥结构设计

4.1 主桥结构型式的选择

主桥 150 m 跨径,根据国内外已建桥梁的经验 and 各桥型结构受力特点,适合的桥型包括斜拉桥、系杆拱、钢桁架、变高连续梁等。

本工程受平面线形、纵坡及落地条件、桥梁景观效果、造价、河道防洪排涝、施工周期等多重限制。变高连续梁桥纵坡在被交道路处落地困难。斜拉桥跨径组合受平曲线超高变宽限制,且桥梁造价高、施工周期长,对项目经济性和河道排泄影响较大。钢桁架桥景观效果一般,桁架造型与周边湾头古镇环境不协调。因此,本工程主桥推荐采用造型选择丰富、结构高度低、施工周期短、经济性较好的钢结构系杆拱桥型。

4.2 主桥跨径组合的确定

桥位处河道口宽约 210 m,且桥墩布置需避开河道堤岸范围,桥梁一跨过河跨径太大,且河道两侧平面均位于小半径曲线上,桥梁布跨和纵断面落地均较困难。根据水利主管部门要求,河道范围只允许主桥设置水中墩,引桥施工应避免设置水中支架,同时须避开河道主汛期施工。结合跨河桥梁方案航评、洪评评审意见、桥梁施工条件、施工周期等多方面统筹

考虑,主桥采用三跨连续钢箱系杆拱结构,跨越河道范围,主桥跨径组合为 $(41+150+41)\text{m}$,采用少支架拼装施工。

4.3 主桥横断面设计

本桥主跨横断面采用双向两车道人非共板断面,桥梁全宽 24.6m ,采用双拱肋断面。横断面布置考虑景观效果。因此,拱肋采用适当向内倾斜的方式^[1],以增加视觉效果。设计采用两种内倾角度进行比选,详见图4。

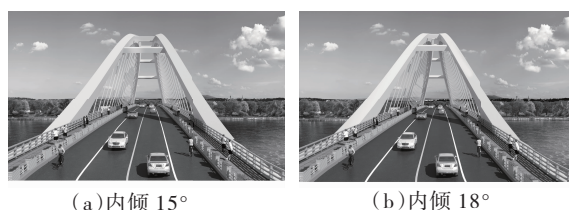


图4 主桥拱肋内倾方案比选

主桥横断面布置方案综合考虑桥梁三维建模实体效果,以及业主、专家的相关意见,推荐采用拱肋内倾 15° 的断面方案,详见图5。

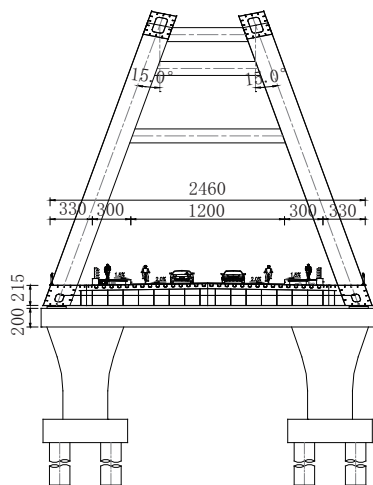


图5 主桥标准横断面(单位:cm)

4.4 吊杆成品索体选择

系杆拱桥吊杆成品索主要有平行钢丝吊索和钢绞线吊索两种。

(1)平行钢丝吊索采用高强度平行钢丝作为索体承重材料。平行钢丝吊索体系是热挤高密度聚乙烯高强钢丝吊索与冷铸墩头锚的组合体系,可以进行工厂制作,产品以锚具和索体结合成一体成品索出厂。索体可以进行整体张拉,张拉吨位明确,索力均匀,调索较为方便。

(2)钢绞线吊索采用高强度钢绞线作为索体承重材料。索体由多股PE防护热镀锌或者环氧涂覆钢绞线组成,两端由夹片式锚具夹持,能够保证吊索可单根穿索、单根张拉。

本桥考虑到钢绞线吊索的防腐性能更好,且钢绞线在安装过程中可根据现场情况对索体进行较小范围的切割调整,故推荐采用钢绞线作为吊索材料。

4.5 主桥桥面系方案

主桥桥面系考虑两种设计方案:正交异性桥面板和钢-混组合梁体系。钢-混组合梁体系为在桥面设置 25cm 厚混凝土预制板,通过在钢板顶设置剪力钉与桥面板通过湿接缝结合而成。该方案混凝土板结构自重大,增加了拱桥结构高度和受力难度,对预制混凝土板和湿接缝混凝土施工工期和收缩徐变控制要求高,施工不到位易引起后期桥面板开裂。因此,推荐桥面系采用正交异性桥面板方案^[2],钢桥面板底部设置纵向U肋和板肋。

4.6 主桥上部结构设计

主桥采用三跨连续钢箱系杆拱结构,为主拱水平力自平衡体系,拱肋依靠钢系梁平衡水平推力;主拱之间设置风撑,保证拱肋面外稳定。

(1)拱肋。主跨计算跨径 150m ,主拱肋轴线线型采用二次抛物线,拱肋铅锤高度 29.0m (拱肋平面内高度 30m ,内倾 15°),拱肋矢跨比 $1/5.17$ 。拱肋均采用箱型截面(详见图6),主拱肋宽 2m ,高 $2.5\sim 3.5\text{m}$,两端局部加长,顶、底板厚 $24\sim 30\text{mm}$,腹板厚 $24\sim 30\text{mm}$,隔板标准间距 1.5m ,厚 $12\sim 24\text{mm}$ 。两拱肋间共设置6道横撑,横撑采用钢箱杆件。

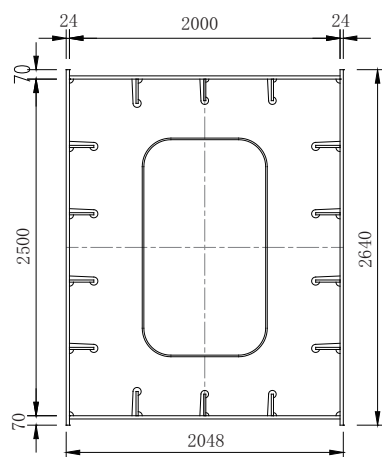


图6 拱肋标准横断面图(单位:mm)

(2)吊杆。采用钢绞线作为吊索材料。吊杆索间距 6m ,采用 $15-10$ 和 $15-12$ 钢绞线,钢绞线抗拉强度标准值为 1860MPa 。

(3)系梁。系杆采用箱型截面(详见图7),标准段高 2.15m ,宽 2.0m ,顶板厚 $24\sim 30\text{mm}$,腹板厚 $20\sim 30\text{mm}$ 。普通隔板 16mm ,吊点处 24mm 。边跨由于超高影响,箱室局部变高。

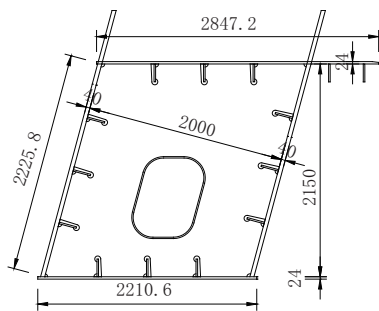


图7 系梁标准横断面图(单位:mm)

(4)桥面系。桥面系采用16 mm正交异性桥面板,钢桥面板底部设纵向U肋、板肋。跨中段横梁标准间距3 m,端、中支点处局部加密。中横梁采用工字钢,支点横梁采用箱型截面,横梁高2.15~2.359 m。端支点箱型截面宽2 m,中支点箱型截面宽4 m。横梁腹板厚16 mm(工字型)、20 mm(箱形),底板厚24 mm。边跨由于超高影响,部分横梁变高。主桥范围桥面铺装采用40 mm高弹改性沥青混凝土(SMA-13)+35 mm浇筑式沥青混凝土(GA-10)。

4.7 主桥主墩结构设计

主墩采用双柱框架墩,墩顶盖梁尺寸26 m(横桥向)×3 m(顺桥向)×2 m(高)。墩柱为矩形断面,柱底尺寸为3.5 m(横桥向)×3 m(顺桥向),墩柱顶部5 m范围尺寸逐渐变大,柱顶尺寸为6.5 m(横桥向)×3 m(顺桥向)。每个墩柱下接矩形承台和群桩基础,承台尺寸6.6 m(横桥向)×6.6 m(顺桥向)×2.5 m(高)。承台底部设4根直径1.6 m钻孔灌注桩基础。

4.8 桥梁抗震设计

本工程主桥为跨径150 m的系杆拱桥梁,主桥采用QZ球型钢支座,引桥采用盆式橡胶支座。按《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166—2011)的抗震设防分类甲类进行验算。桥梁采用两水准设防、两阶段设计,结构按延性抗震体系进行验算。

5 结构计算

5.1 计算模型

主桥上部结构采用midas程序进行计算,主梁按梁单元模拟,分别包括成桥状态下恒载、活载、风荷载、温度变化、支座沉降等作用的计算。计算中按规范要求对各种荷载进行不同的荷载组合,对结构的强度、稳定、刚度和应力等进行验算。全桥结构有限元模型见图8。

5.2 计算结果

(1)拱肋应力。基本组合下,拱肋杆件全截面受压,最大压应力168.6 MPa,小于规范应力限值270 MPa,



图8 钢箱系杆拱桥有限元模型

满足规范要求。

(2)系杆应力。基本组合下,系梁杆件最大拉应力223.3 MPa,最大压应力222.7 MPa,均小于规范应力限值270 MPa,满足规范要求。

(3)横梁应力。基本组合下,横梁杆件最大拉应力119.8 MPa,最大压应力67.3 MPa,均小于规范应力限值270 MPa,满足规范要求。

(4)吊杆索力。最不利荷载组合下,最大吊杆索力为1 010.2 kN,吊杆最大破断力为3 120 kN,吊索综合系数为3.09,大于2.50,满足规范要求。

(5)刚度验算。活载作用下,全桥最大竖向挠度87 mm,挠跨比1/1 724,小于规范要求的1/800,满足规范刚度要求。

(6)整体稳定。按照弹性稳定分析方法,考虑恒载及其他荷载均可变,计算得到第一阶弹性稳定安全系数为15.6,大于4.0,满足规范要求。

5.3 抗震计算

桥梁结构动力计算采用空间梁单元模拟主梁、桥墩、承台、桩基。桩土效应采用土弹簧来进行模拟。上部结构二期恒载等效为线质量均匀加在主梁单元上。动力计算模型见图9。

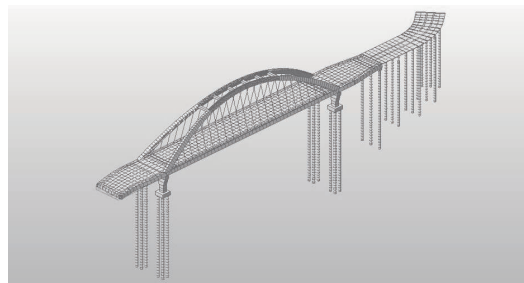


图9 结构动力计算模型

(1)结构动力特性。根据结构模型进行结构动力分析,桥梁结构的基本周期为0.841 5 s。限于篇幅,仅示出桥梁结构前5阶周期和频率,详见表1。

表1 计算模型基本动力特性

阶数	周期/s	频率/Hz
1	0.841 5	1.188 3
2	0.825 3	1.211 7
3	0.666 7	1.500 0
4	0.436 0	2.293 8
5	0.377 7	2.647 7

根据结构在恒载作用和地震作用下的受力,地震沿顺桥向和横桥向桥墩的弯矩和剪力最大值均出现在墩顶和桩顶位置。

(2)地震作用分析结果。

a. E1 地震作用分析结果。采用时程分析方法计算的主墩、过渡墩在 E1 地震作用和永久作用组合下,控制截面内力最大响应,详见表 2。

表 2 桥墩墩身及桩基控制截面内力最大响应

墩号	顺桥向			横桥向		
	位置	剪力 / kN	弯矩 / (kN·m)	位置	剪力 / kN	弯矩 / (kN·m)
1# (主墩)	墩底	1 623.3	13 252.3	墩底	2 431.7	17 254.8
	桩基	865.3	2 257.8	桩基	882.3	1 643.7
2# (主墩)	墩底	1 747.2	21 581.4	墩底	2 712.7	20 273.4
	桩基	876.7	2 172.3	桩基	862.4	1 614.6
3# (过渡墩)	墩底	1 223.5	15 643.1	墩底	2 243.1	18 845.3
	桩基	573.6	1 632.9	桩基	665.5	1 234.8

b. E2 地震作用分析结果。采用时程分析方法计算的主墩、过渡墩在 E2 地震作用和永久作用组合下,控制截面内力最大响应,详见表 3。

表 3 桥墩墩身及桩基控制截面内力最大响应

墩号	顺桥向			横桥向		
	位置	剪力 / kN	弯矩 / (kN·m)	位置	剪力 / kN	弯矩 / (kN·m)
1# (主墩)	墩底	2 422.6	27 124.9	墩底	4 847.8	35 336.6
	桩基	1 265.8	3 036.7	桩基	1 533.5	3 051.3
2# (主墩)	墩底	2 466.3	24 032.6	墩底	4 779.3	34 067.2
	桩基	1 206.1	2 938.5	桩基	1 467.1	2 938.8
3# (过渡墩)	墩底	1 459.5	14 032.6	墩底	3 763.3	30 047.4
	桩基	823.4	1 938.5	桩基	1 028.6	2 438.7

(3)地震作用下支座验算。经计算,主墩支座横桥向最大抗剪 2 655 kN,顺桥向主支座最大抗剪 2 153 kN,支座的水平抗力为 6 000 kN,满足规范要求;过渡墩支座横桥向最大抗剪 556 kN,顺桥向主支座最大抗剪 532 kN,支座的水平抗力为 600 kN,满足规范要求。所以,支座设计满足要求。

6 施工流程

由于本桥梁跨径大、结构复杂、施工难度较大,需结合项目特点和现场施工条件选择合适的施工方案。因主桥两侧平面位于曲线段,两岸不具备支架拼装整体拖拉的条件。该河道防洪排涝标准高、航道等级较低,水中施工和临时设施应避开主汛期,其他时段可进行少支架施工,施工期航道封闭,过往船只通过邻近水域绕行。因此,本工程考虑采用少支架拼装施工方案、先梁后拱^[1]的施工工艺。主要施工流程如下:

(1)先施工水上栈桥和水中围堰,再施工主墩钻孔桩、承台及桥台。

(2)拆除围堰和水上栈桥,满足通航和水利防洪排涝要求的前提下搭设水中临时支墩,下部施工和临时设施避开主汛期。

(3)拼装主桥系梁、桥面板,设置桥面临时支撑,拼装拱肋及风撑等。

(4)逐步拆除临时支撑,安装、张拉拱肋吊杆,直至张拉到位。

(5)完成体系转换,拆除水中临时支墩,施工桥面附属结构。

7 结 语

壁虎河大桥复建工程跨河主桥受多个控制因素影响,采用大跨径连续钢箱系杆拱结构,有效协调解决线位、纵坡、施工、景观、经济、安全等限制条件,使本工程能得以落地和顺利推进。

本文通过对主梁结构形式、跨径组合、横断面形式、吊索类型、桥面系结构等进行分析和比选,对主桥上部结构设计进行详细阐述,希望能给类似工程的设计和施工起到参考和借鉴的作用。

参考文献:

[1] 张璟,郑坤炎.倾斜式提篮拱桥吊杆张拉施工控制研究[J].建筑结构,2023,52(S1):3191-3196.
[2] 孙蕊鑫,折孝明.钢箱梁桥面板加劲肋形式的参数化分析研究[J].公路,2023(7):154-158.
[3] 张涛,王云龙.不同施工方法对系杆拱桥受力状态的影响分析[J].市政技术,2022,40(4):22-25.