

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.09.018

济南市历阳湖人行钢桁拱桥设计与施工

付祖良, 张强强

(山东省城建设计院, 山东 济南 250101)

摘要: 济南市历阳湖人行钢桁拱桥桥位处地形条件复杂, 生态环境保护要求较高, 施工场地受限。桥型设计通过方案比选后采用钢桁拱桥方案, 拱脚水平推力利于现状道路边坡的稳定; 施工采用大型起重机先整体吊装钢桁拱下弦拱圈、后吊装拱上杆件及桥面系的施工方法, 解决了施工场地受限的问题; 通过设置斜撑杆来取代山体侧桥台, 避免了对山坡裸露岩体的破坏。特定条件下钢桁拱桥的一些设计与施工措施, 可为类似桥梁设计与施工提供一些借鉴与参考。

关键词: 钢桁拱桥; 无铰拱; 竖向自振频率; 人行桥; 铰支轴向受压杆

中图分类号: U448.22

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)09-0075-03

0 引言

为加快济南市生态文明建设, 完善旅游要素配套和公共服务设施, 济南市先后在广场东沟河谷内建设了多处谷坊, 形成了历阳湖内的景观水面。为扩大市民休闲步行空间, 在湖岸新建了景观游步道。修建历阳湖人行钢桁拱桥, 旨在连接两岸游步道, 方便湖区休闲游憩, 为市民提供一个良好的游览健身休闲的场所, 提升历阳湖周边片区的城市环境。

1 工程概况

历阳湖人行钢桁拱桥位于济南市市中区旅游路与历阳大街交叉口北侧, 桥梁跨越广场东沟, 南向连接历阳大街, 北向连接金鸡岭山体游步道。桥梁全长 55.28 m, 桥面全宽 4.5 m。上部结构为上承式钢桁拱桥。下部结构南侧采用承台群桩基础, 北侧桥墩采用扩大基础。

2 结构设计

2.1 上部结构

桥梁全长 55.28 m, 桥梁全宽 4.5 m, 净宽 4.1 m, 主跨为上承式双主桁钢桁拱, 钢桁拱下弦拱计算跨径为 35 m, 计算矢高 5 m, 计算矢跨比为 1/7, 拱圈为高 60 cm、宽 50 cm 焊接箱型杆件, 拱轴线为二次抛物线。桥梁桥面纵向为双向 1.5% 的纵坡接半径 $R=500$ m 的凸竖曲线。为增加桥梁外立面的轮廓层

次感, 主桁拱外侧均设置 0.5 m 的悬臂。桥面系在每个节点及两节点中间位置均设置横梁, 梁高 0.4 m, 间距为 1.5 ~ 2.25 m。桥面纵肋采用钢板加劲肋, 间距为 50 cm。桥梁总体布置见图 1。

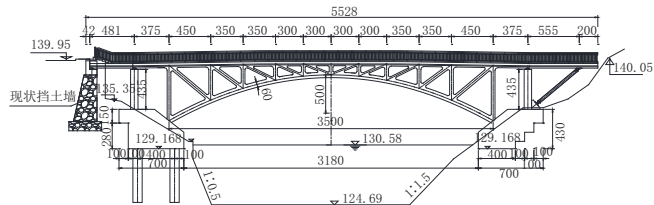


图 1 桥梁立面图(高程单位:m;尺寸单位:cm)

钢桁拱共设置 3 处横向联结系, 分别位于拱脚及跨中位置, 分别见图 2 和图 3。

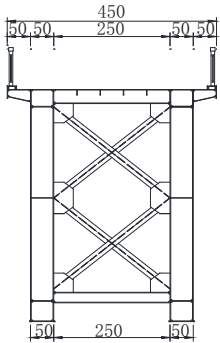


图 2 钢桁拱拱脚横断面(单位:cm)

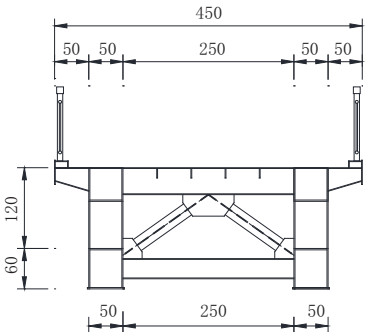


图 3 钢桁拱跨中横断面(单位:cm)

收稿日期: 2021-10-26

作者简介: 付祖良(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事道路桥梁设计工作。

桥面铺装采用钢龙骨固定室外用环保复合木塑地板,栏杆采用采用 SUS304 不锈钢杆件 + 钢化夹胶玻璃的形式。桥梁设置了节能型 LED 灯夜景照明。

2.2 下部结构

下部结构因地制宜,南岸采用承台群桩基础,在历阳大街现状挡土墙顶设置帽梁支承钢梁;北岸桥台山体岩石裸露采用扩大基础,为避免桥台基础施工破坏裸露岩体,保护自然环境,设置斜撑挑台与山体游步道衔接,见图 4 和图 5。

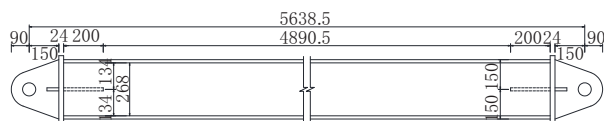


图 4 边跨斜撑杆(单位:cm)



图 5 边跨斜撑杆照片

3 计算分析

桥梁结构采用 Midas Civil 2020 有限元软件进行建模计算,弦杆、腹杆及纵横梁均采用梁单元模拟,桥面板采用平面应力板单元模拟,对桥梁结构进行纵、横向计算分析、验算。建立模型见图 6。

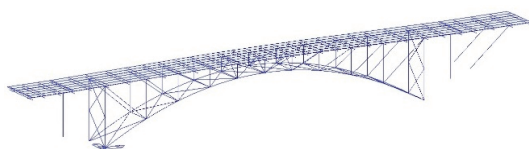


图 6 计算模型

3.1 计算荷载

(1)结构自重:钢材容重采用 78.5 kN/m^3 , 钢筋混凝土容重采用 26 kN/m^3 。

(2)二期恒载:包括桥面铺装、人行护栏和管线等。桥面铺装按 2.0 kN/m^2 考虑;人行护栏按每侧 2 kN/m 考虑。

(3)基础变位作用:桥台基础竖向最大不均匀沉降差 10 mm 。

(4)设计人群荷载:取 4.5 kPa ;桥面板局部构件按标准值 5.0 kPa 的均布荷载或者 1.5 kN 的集中力进行计算。

(5)风荷载:按济南风压 100 a 一遇考虑,风压为

0.5 kN/m^2 。

(6)温度作用:整体升降温:体系升温按 $+25^\circ\text{C}$ 考虑,体系降温按 -25°C 考虑。温度梯度:取 $T_1=20^\circ\text{C}$, $T_2=6.7^\circ\text{C}$ 。

(7)地震作用:按《中国地震动参数区划图》GB 18306—2015,抗震设防烈度为 6 度,设计基本地震加速度值为 $0.05g$,桥梁抗震设防分类为丁类。根据《山东省建设工程抗震设防条例》规定,场地抗震设防烈度提高一度,抗震设防烈度按 7 度考虑,设计基本地震动峰值加速度值为 $0.10g$,桥梁抗震设计方法选用 B 类,应进行 E1 地震作用下的抗震分析和抗震验算,并应满足相关构造和抗震措施的要求。

3.2 计算分析

3.2.1 杆件内力与应力计算

杆件内力计算主要考虑杆件在各荷载最不利组合下的最大、最小轴力与弯矩。经计算分析,结构杆件最大轴向力为 1529.5 kN ,位于拱圈跨中位置下弦杆。结构杆件最大弯矩为 546.1 kN/m ,位于拱圈跨脚位置。结构杆件最大应力为 98.9 N/mm^2 ,位于拱圈跨脚位置,见图 7。



图 7 梁单元应力图(单位:MPa)

3.2.2 杆件稳定性分析

在假定钢桁节点刚结的条件下,对全桥进行构件整体稳定分析,主桁弦杆平面内和平面外的计算长度均取 l_0 ;腹杆平面内的计算长度取 $0.8 l_0$,平面外的计算长度取 l_0 。

主桁焊接箱形弦杆屈曲曲线类型均为 b 类,焊接 I 形腹杆屈曲曲线类型 y 轴屈曲方向为 b 类,z 轴屈曲方向为 c 类^[1]。腹杆轴心受压构件整体稳定折减系数 χ 最小值为 0.76 ;弦杆轴心受压构件整体稳定折减系数 χ 最小值为 0.95 。经检算,全部构件的强度及整体稳定均满足规范要求。

3.2.3 竖向自振频率计算

根据计算,钢桁拱竖向自振模态见图 8,竖向自振频率为 10.75 Hz ,满足《城市人行天桥与人行地道技术规范》2.5.4 条要求的上部结构竖向自振频率不小于 3 Hz 的要求^[2]。根据计算结果可知,桥梁上部结构竖向刚度较大。

3.2.4 位移计算

根据结构计算,跨中最大向上竖向变形度为

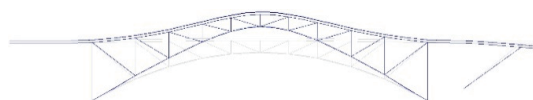


图 8 结构竖向自振模态

19 mm,跨中最大向下竖向挠度为 5.4 mm,均小于跨度的 1/1 600,桥梁不设置预拱度。

3.2.5 整体稳定性分析

采用 MIDAS Civil 进行结构的静力稳定性计算,其中恒载包括结构自重和二期恒载,营运荷载中,人群荷载按 4.5 kN/m^2 取值。在假定钢桁节点刚结的条件下,对全桥进行静力稳定分析,所得一阶屈曲安全系数为 221,其失稳形式为端腹杆面外失稳,见图 9,计算结果满足拱桥的整体弹性稳定系数 K 大于 4.0 的要求^[3]。

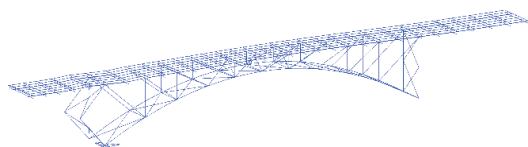


图 9 一阶屈曲模态

4 桥梁施工

桥位处南岸旅游路现状边坡为上下两级衡重式毛石挡土墙,现状旅游路人行道至河底高差约 15.26 m;北岸为外露岩石山体边坡,河道下游 7m 位置设有 5.8 m 落差的谷坊。桥位无施工作业空间,两侧基础落地场地条件复杂。基础施工对现状挡土墙稳定具有一定的影响。桥梁设计需综合考虑高挡土墙边坡、施工需求、场地条件与环境保护、交通影响等。

桥梁南侧采用承台群桩基础,在上下两级挡土墙中间人工挖孔成孔,工程施工对现状挡土墙整体稳定性影响小,避免了对现状边坡的大挖大填的破坏性施工。桩基础将重力传至挡土墙下岩层。

下部结构施工完成后,吊装上部结构。桥梁主拱圈下弦构件工厂制作焊接后,运输至旅游路侧平放置,采用三台大型起重机协同作业,整体吊装主跨钢桁拱下弦,主拱圈下弦先吊起一定高度后空中翻转、后旋转平移、整体吊装钢拱圈就位,实现了拱圈无支架无拼装焊接作业,见图 10。

上部结构采用上承式钢桁架拱,桁架拱结构自重相对较轻,刚度大且跨越能力大,便于整体吊装安装,通过调整矢跨比与拱轴线,合理设置桥面高程,桥外立面设置小悬臂挑檐,结构层次错落有致,整体外形简洁优美,如垂虹卧波;拱上钢结构均采用工厂



图 10 现场吊装照片

制造,大型起重机吊装拼装焊接。

5 结 语

(1)历阳湖人行景观桥选址科学合理,桥位地质条件好、视觉角度好、河道水面宽度相对较小,从旅游路东西向或历阳大街南北向远观,视觉效果均较好。桥梁设计方案通过精心比选与调整优化,减少了工程量,节省了工程投资,实现了桥梁与场地环境的有机结合。

对于地面与水面高差大、地质条件好的位置,选用钢桁拱桥方案是适宜的;合理开发利用环境,新建工程尽量减少对原有地形地貌的破坏,桥梁建筑与周围自然环境和谐统一。历阳湖桥梁整体造型优美,在施工期间就广受关注,竣工投入使用后,得到了市民、建设单位与新闻媒体的肯定与赞扬,项目产生了良好的经济效益、社会效益和环境效益。竣工后实景见图 11。



图 11 竣工后实景

(2)桥梁结构选择钢桁桥方案,钢桁拱桥结构自重相对较轻,刚度大,整体外形美观。钢结构现场施工工期短,对周边交通影响时间短。桥梁上部钢结构采用整体吊装安装方案,不但施工不影响河道泄洪,而且解决了桥位处场地条件受限,无作业空间的难题,实现了设计与施工的良好结合。

(3)桥梁北侧设置铰轴斜撑悬臂梁,避免了因设置桥台而开挖山体大块岩石,保护了自然景观,降低了施工难度,节约了工程成本。铰轴连接的轴向受力斜杆支承,是特定条件下适宜的方案。桥梁拱脚的水平推力有利于现状挡土墙及边坡的稳定。

(下转第 94 页)

4.3 计算结果与桩基比选

通过对计算结果主墩立剖面竖向应力的比较(见图5),虽然本桥主墩较高,但支反力经墩身传递后仍集中作用于支座整下方区域,支座正下方桩顶中心竖向压应力 5.4 MPa、中间桩 3.7 MPa。综合考虑施工过程中承台需单独承受桥墩恒载,同时桩基在钢围堰抗浮设计中发挥有利作用^[3](见表3),结合嵌岩桩单桩承载力及桩身承载力,最终确定主墩采用 20 根 2.2 m 钻孔桩,桩基集中布置于支座正下方区域,左右各 9 根,承台中心设置 2 根,支座正下方桩顶中心竖向压应力 4.8 MPa、中间桩 4.6 MPa。

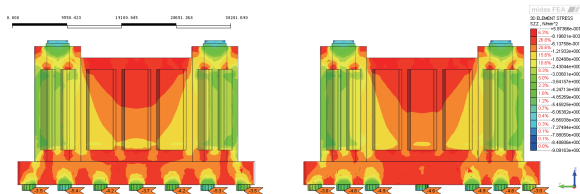


图5 主墩立剖面竖向应力对比(单位:MPa)

表3 主墩钢围堰抗浮安全系数比较

安全系数	1.8 m 桩径	2.0 m 桩径	2.2 m 桩径
18 根桩	0.97	0.99	1.02
20 根桩	0.99	1.02	1.05
22 根桩	1.02	1.05	1.09

注:围堰设计水深 20.5 m,钢围堰自重按 4 kN/m²计,桩基钢护筒与封底粘结力按 0.1 MPa 取值。

4.4 桥墩构造与施工措施

主桥施工拟在主桥三角区支架安装后,进行拱肋、边跨钢桁架吊装,边墩采取临时预降,北岸桁架梁主墩支座往主跨预偏 600 mm^[4]。在后续施工流程吊装拱肋时,逐步在梁端进行配重^[5]。针对这两项关键施工工艺,主墩支座平台设置局部扩头构造,预留施工过程中支座的顺桥向滑动预偏值和施工设备操作空间。边墩系梁端部作局部加强处理,可供施工过程中作为张拉锚点传递临时压重。

在施工图设计阶段充分考虑施工临时措施、钢围堰等主要施工工艺,在永久结构设计中作适当处理,可以进一步提高工程全过程的经济性并降低实施过程中的风险^[6]。

5 结 语

通过对清水塘大桥主桥下部结构设计方法的介绍,为今后类似特大跨径桥梁设计中总结了如下经验:

(1)水位落差较大时,水中桥墩设计应综合考虑基础冲刷、阻水率、桥梁景观、施工方法等限制要求,建议将承台埋入河床底,并可在洪水水位以上丰富外形设计,减少对泄洪的影响;

(2)三级及以上等级的内河航道船舶撞击作用设计值《公规》并未给出,可参考 AASHTO 规范中的计算方法确定顺桥向撞击力,横桥向撞击力可根据规范经验折减取值;

(3)大吨位支座反力在桥墩中并不一定均匀扩散至承台底,桩基布置方案应根据传力路径合理选取。此外桥墩构造细节应充分考虑特大桥的施工过程,永久构造若能为施工临时措施提供便利将进一步提高全过程的经济性。

参考文献:

- [1] 蒋建军.深水库区大跨径连续刚构桥梁主墩基础设计[J].四川建筑,2019,39,188(4):178-180.
- [2] 王新丰.松花江特大桥深水围堰施工方案比选[J].工程建设与设计,2012,291(7):184-186.
- [3] 杨红,任回兴,贺茂生,等.苏通大桥承台封底混凝土与钢护筒间握裹力的试验研究与应用[J].公路,2008(10):8-13.
- [4] 刘丹,程多云,王元鑫.大跨钢桁拱桥施工技术与创新[J].中国港湾建设,2015,35,214(12):57-61,70.
- [5] 谭康荣.武广铁路客运专线东平水道桥三主桁钢桁拱架设的技术创新[J].铁道建筑,2010,431(1):71-74.
- [6] 蔡梦非.桥梁工程设计师终身责任风险及职业责任保险的研究[D].上海:同济大学,2020.

(上接第 77 页)

(4)桥梁采用先整体吊装钢拱圈,后现浇拱脚混凝土固定拱脚的施工工法,避免了先固定拱脚钢拱圈后拼装对接困难的问题。

(5)钢拱脚埋入混凝土部分焊接 ML15 材质的 M22 × 200 圆柱头焊钉,并设置多层钢筋网局部加强,保障了拱脚局部应力较大情况的受力安全与良

好固接。

参考文献:

- [1] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [2] CJJ 69—95,城市人行天桥与人行地道技术规范[S].
- [3] TB 10002—2017,铁路桥涵设计规范[S].