

宿迁运河湾半岛玻璃人行斜拉桥设计要点分析

史松磊, 孙谷雨, 王 斌

(中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 江苏 南京 210008)

摘要: 随着社会发展, 公众对美的要求越来越高。以功能为主、兼顾美观的传统桥梁设计原则逐渐转向功能与美观并重。以宿迁运河湾半岛玻璃人行斜拉桥为例, 介绍了前倾式独塔玻璃人行斜拉桥建筑造型特点、结构方案、构造细节与施工方案。桥梁跨径布置为135 m+35.5 m, 桥塔、主梁均采用钢结构, 结构采用塔台固结、梁台固结、塔梁分离体系, 拉索采用双索面布置, 桥梁主跨跨中设置8组玻璃桥面。建立桥梁空间有限元模型, 经验算, 桥梁结构受力满足规范要求。目前该桥运营状况良好, 达到预期目标。

关键词: 斜拉桥; 前倾曲线桥塔; 异形桥塔; 人行桥; 玻璃桥; 有限元计算; 桥梁设计

中图分类号: U448.27

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)08-0171-04

Analysis on Design Essentials of Glass Pedestrian Cable-stayed Bridge on Canal Bay Peninsula in Suqian

SHI Songlei, SUN Guyu, WANG Bin

(China South Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210008, China)

Abstract: With the development of society, the public's demands for beauty are getting higher and higher. The traditional bridge design principles that prioritize functionality and aesthetics are gradually shifting towards a balance between functionality and aesthetics. Taking the glass pedestrian cable-stayed bridge on the Suqian Canal Bay Peninsula as an example, the architectural modeling features, structural scheme, construction details and construction schemes of the forward-leaning single-pylon glass pedestrian cable-stayed bridge are introduced. The layout of bridge span is 135 m+35.5 m. The bridge pylon and girder are all steel structures. The structure is composed of the pylon and abutment concretion, the beam and abutment concretion, and pylon and girder separation system. The double-plane layout is used for the stayed cable. Eight sets of glass bridge decks are set at the middle of the main span. By establishing a finite element model of the bridge space, the calculation shows that the force of the bridge structure meets the requirements of the code. At present, the operation of this bridge is in good condition and the expected goal has been reached.

Keywords: cable-stayed bridge; forward leaning curved bridge pylon; special-shaped bridge pylon; pedestrian bridge; glass bridge; finite element calculation; bridge design

1 工程概况

宿迁运河湾半岛人行桥又称鸿运桥, 位于宿迁市宿城区与宿豫区交会地带。桥梁跨越京杭大运河中运河段, 南连运河湾公园, 北接运河湾半岛, 是运河湾公园与运河湾半岛的重要人行通道。

2 桥型方案设计

2.1 桥型方案构思

运河湾半岛人行桥是运河湾公园与运河湾半岛

公园重要人行通道, 桥梁除满足人行通行的基本功能外, 还需考虑游客体验与趣味性、桥型结构与当地文化元素相融合, 打造地标性建筑。

桥位处地形相对平坦, 河口宽度115 m, 水利部门要求一跨过河, 斜拉桥、悬索桥等桥型是比较好的选择。在张家界大峡谷玻璃悬索桥^[1]建成之后, 由于良好的游客体验与趣味性, 迅速风靡全国, 各地如雨后春笋般涌现出样式各异的玻璃悬索桥^[2], 其中玻璃元素极其受游客喜爱。

斜拉桥以往多以直塔、背向斜塔造型^[3-4], 前倾式桥塔斜拉桥极少。爱尔兰首都都柏林2009年建成通车的主跨跨径95 m的塞缪尔·贝克特大桥^[5]是有记录的前倾式桥塔斜拉桥之一。前倾曲线型桥塔^[7]

收稿日期: 2024-11-20

作者简介: 史松磊(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事道路与桥梁设计工作。

造型简洁优美,搭配主索与背索,与运河船帆造型呼应,并考虑桥梁所处公园的特殊性,将玻璃元素融合进入桥面构造,能极大的增加人行桥的趣味性与体验获得感,最终确定选择前倾曲线玻璃景观斜拉桥桥型(见图1)。



图1 桥梁鸟瞰效果图

2.2 总体布置

桥梁采用前倾曲线独塔双索面斜拉桥造型(见图2),主跨跨径135 m,边跨跨径35.5 m,桥梁总长170.5 m,桥面宽5 m,桥塔高54.93 m。桥梁主跨跨中设置8组玻璃桥面,每组长10 m,宽2 m,每组玻璃纵向间设置2 m彩色防滑桥面间隔。主梁玻璃段横断面分布为:桥面5 m=1.5 m彩色防滑桥面+2 m玻璃桥面+1.5 m彩色防滑桥面。桥梁主跨设置9对18根斜拉索,边跨设置5对10根斜拉索,拉索采用双索面对称布置。主梁、主塔均采用钢结构,主塔与承台固结,主梁与承台通过墩柱固结,主梁与主塔分离。主梁边跨端部设置混凝土压重横梁。

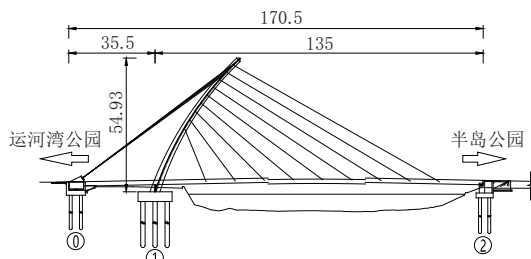


图2 桥梁立面布置(单位:m)

3 结构方案

3.1 主塔结构

桥塔纵立面采用倾斜变截面圆曲线,内侧曲线半径124.21 m,外侧曲线半径143.837 m,塔高54.93 m,桥塔中心线底部切线前倾角 71.606° ,前倾长度34.95 m,塔底截面纵向宽4.215 m,塔顶截面纵向宽2 m。横立面采用人字造型,底部人字分叉中心间距9.73 m,人字下部分叉截面每侧宽2 m,人字顶部截面宽2 m,上下部通过半径100 m圆弧过渡(见图3)。

桥塔材料采用Q355D钢材。桥塔截面采用箱型

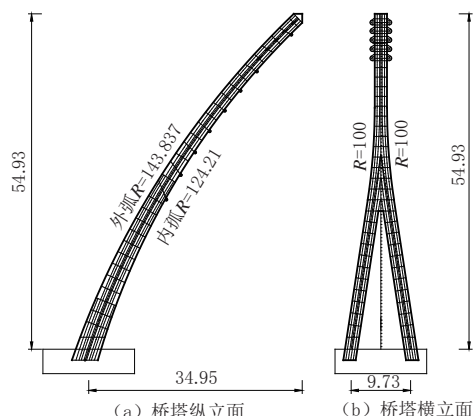


图3 桥塔立面(单位:m)

截面,内部设置纵向加劲肋、横隔板。塔顶设置排风帽与避雷针。

桥塔设置拉索锚固连接构造,背索设置在主塔侧壁板,主索设置在下壁板。考虑到桥塔内部空间局促且后期运营检查维护便捷,主塔拉索锚固区均采用外置耳板连接构造。

3.2 主塔承台连接

主塔与承台结合段采用钢结构壁板内填自密实微膨胀混凝土、预应力筋、加劲肋和剪力钉组合式连接构造^[6]。主塔承台连接构造见图4,主塔下部设置桥塔—承台结合段,内部填充自密实微膨胀混凝土。在钢—混结合面设置60 mm厚承压钢板,主塔壁板内部焊接剪力钉,使钢结构与混凝土结构连接成为整体。承压板沿断面四周等间距布置预应力筋,以抵抗纵横向弯矩。预应力筋上部张拉端锚固在承压板,下部固定端预埋于承台内部。

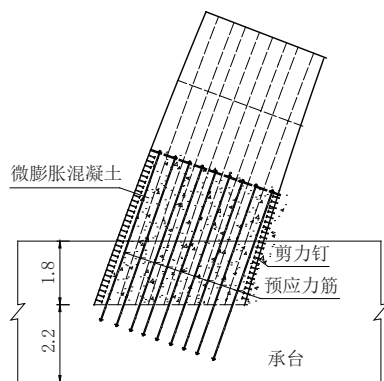


图4 桥塔承台锚固段(单位:m)

3.3 主梁结构

主梁结构由主梁段、主梁承台连接段、压重横梁段等三部分组成。

(1) 主梁段

主梁段总长170.5 m,其中主跨段长134.84 m,边跨段长28 m,采用Q355D钢材。主梁根据截面所在

位置分为主梁玻璃截面段与主梁一般截面段。主梁玻璃截面段采用单箱单室双主梁截面,每个主梁高 1.8 m,宽 1.5 m。两主梁间预留 2 m 空间设置桥面玻璃,主梁间通过工字横梁连接,保证横向稳定。一般截面段采用单箱三室截面,高 1.8 m,宽 5 m,箱室腹板间距为 1.5 m+2 m+1.5 m,与玻璃段截面腹板位置对齐(见图 5)。

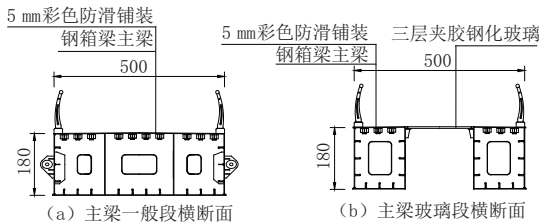


图 5 主梁断面(单位:cm)

主梁设置拉索锚固连接构造。考虑到主梁内部空间局促且后期运营检查维护便捷,主梁拉索锚固区均采用耳板连接构造,设置在主梁外侧腹板(见图 6)。



图 6 玻璃段主梁实景图

(2)主梁承台连接段

主梁承台连接段,主梁与承台通过墩柱固结。墩柱采用钢结构壁板内填自密实微膨胀混凝土、预应力筋、PBL加劲肋组合式连接构造。主梁承台连接段平面见图 7,内部设置 2 道纵向分割钢板、3 道横向分割钢板,将平面分成 12 个空腔,空腔内部填充自密实微膨胀混凝土。墩柱壁板、纵横向分割钢板设置 PBL加劲肋,预应力筋沿墩柱壁板四周布置,以保证墩柱的连接性能。

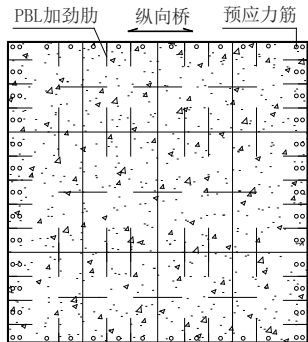


图 7 主梁承台连接段墩柱平面图

(3)压重横梁段

压重横梁段采用混凝土材料,纵桥向长 6 m,横桥向长 20 m,高 2.94~5.257 m,见图 8。压重横梁两

端设置拉索锚固区,采用外置耳板连接构造,耳板连接段预埋在压重横梁内,通过耳板固定板、剪力钉与混凝土形成整体,共同受力。

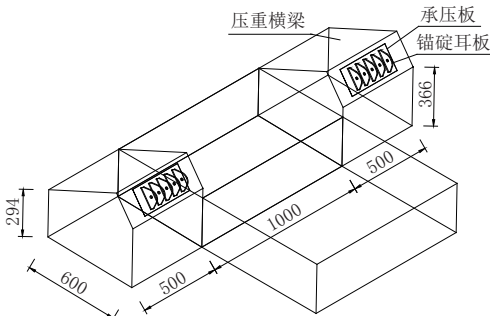


图 8 压重横梁三维图(单位:cm)

主梁与压重横梁间设置 3.5 m 钢结构—混凝土结合段,结合段由钢箱梁壁板与腹板内填微膨胀混凝土、剪力钉、横隔板组成。

3.4 主塔承台与桩基

桥塔承台采用钢筋混凝土结构,纵、横桥向长 15 m×15 m,厚度为 4 m。桥位所处郯庐地震带附近,地震设防烈度 8 度,在桩基上段承受地震作用产生的较大弯矩,为有效提高桩基抗弯能力,承台底 15 m 范围内,采用部分钢管与钢筋混凝土组合桩基结构,钢管内径 1.8 m,厚度 20 mm。剩余段桩基采用钢筋混凝土结构。

3.5 拉索与阻尼器

桥梁拉索材料采用 $\phi 15.2$ mm 1 860 MPa 环氧喷涂钢绞线,锚头采用结构紧凑、外径小的整束挤压成型双叉耳结构,张拉端设置调节套筒。拉索采用双索面对称布置,根据拉索所在位置分为主跨拉索与边跨背索。主跨拉索设置 9 对 18 根,索长 21.882~95.948 m,索力 179~570 kN。根据索力不同,主跨拉索共有 3 种型号,分别为 GJ15-3C、GJ15-4C、GJ15-6C。边跨背索设置 5 对 10 根,索力约 1 376 kN,背索型号为 GJ15-15C。考虑到钢塔、钢箱梁内部空间狭小,为便于拉索施工阶段挂索、张拉与运营维护、检修、更换,拉索与钢塔、钢箱梁、压重横梁连接均采用叉耳、耳板销接连接。

拉索与钢箱梁隔板、钢塔隔板均位于同一平面,最大程度减少拉索耳板面外力,简化了传力路径。

拉索采用双层 HDPE 防护套,外层 HDPE 护套表面采取双螺旋线的抗风雨激振措施。同时主跨拉索张拉端安装外置阻尼器,阻尼器固定在钢箱梁上。在边跨背索上下各 1/3 位置设置背索连接装置,连接装置采用可调长度结构形式,以拉紧背索。

3.6 桥面玻璃与铺装

桥面采用玻璃桥面与彩色防滑面层相结合方案,主跨主梁、横梁间镂空部分设置夹胶钢化玻璃,在其他桥面区域设置5 mm彩色防滑面层(MMA),确保游客在体验玻璃桥面趣味性的同时,满足通行安全要求。桥面玻璃采用3层15 mm厚钢化玻璃,玻璃层间设置1.78 mm SGP胶片。玻璃与钢结构支撑区域之间设置弹性橡胶胶条。玻璃四周与钢结构主梁、横梁间应设置适当间隙,并填充弹性橡胶,以满足变形要求。

4 结构计算

4.1 有限元模型

采用MIDAS Civil软件建立该桥空间有限元模型(见图9),进行结构静力分析、稳定性分析、抗震性能分析。以主塔、主梁曲线参数为基准进行结构离散,桥塔、主梁、压重横梁均采用空间梁单元模拟。斜拉索分别采用索单元模拟,同时考虑斜拉索弹性模量修正。主塔桩基采用梁单元模拟,并考虑桩土间作用效应,两侧桥台位置支座不承担纵桥向水平力,不需考虑桥台桩基桩土间作用效应。

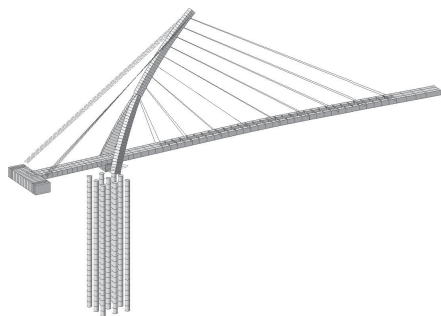


图9 全桥计算模型

4.2 主要计算结果

(1)在活荷载作用下,钢主梁刚度、钢桥塔刚度均满足规范要求。

(2)持久状况承载能力极限状态下,钢桥塔、钢主梁、压重横梁、墩柱、承台、桩基等构件强度均满足规范要求。

(3)标准值组合作用下,斜拉索安全系数均大于2.5;断索或换索工况分析表明,该桥容许任何一根拉索断裂或正常更换。

(4)抗震验算表明,E1地震作用下,桥梁各部件均处于弹性工作范围,不发生破坏;E2地震作用下,桥梁各构件均满足承载能力要求。

(5)桥梁稳定性分析,桥梁一阶屈曲稳定系数远

远大于4,满足规范要求。

(6)人致振动舒适度分析,舒适度等级CL2级,满足要求。

5 施工方案

桥位位于中运河河湾段,不通航,场地地势平坦,水面开阔,河道上口宽115 m,水深约7 m,河床较平坦,为节省投资,桥塔、主梁均采用支架施工工艺。施工顺序如下:(1)桥塔桩基、承台、桥塔承台连接段、主梁承台连接段在钢板桩围堰保护下施工;(2)河道中搭设桥塔、主梁钢管桩柱支架;(3)桥塔支架节段焊接拼装,同步完成边跨主梁、压重横梁施工;(4)张拉边跨背索部分索力,拆除桥塔支架;(5)河道内主梁支架焊接拼装施工;(6)边跨背索、主跨拉索分批张拉;(7)拆除主梁支架、临时钢管桩;(8)桥面玻璃、栏杆、彩色桥梁铺装等施工;(9)斜拉索张拉至成桥设计索力,安装拉索阻尼器,完成其他附属设施。桥塔、主梁钢结构段均采用工厂预制、现场拼装,充分发挥了工业化智能建造优势,快捷高效,大幅节约了工期。

6 结 语

宿迁运河湾半岛人行桥是连接运河湾公园与半岛公园的专用人行桥,桥梁主塔、主梁均采用钢结构,结构为塔台固结、梁台固结、塔梁分离体系。桥塔采用前倾曲线人字造型,简洁美观,与当地历史人文元素契合。桥塔截面采用箱型截面,内部设置纵向加劲肋、横隔板。桥塔与承台结合段采用钢结构壁板内填自密实微膨胀混凝土、预应力筋、加劲肋和剪力钉组合式连接构造。主梁结构由主梁段、主梁承台连接段、压重横梁段等3部分组成。主梁采用箱型截面,内部设置纵横向加劲肋、横隔板;主梁承台连接段通过墩柱固结,墩柱采用钢结构壁板内填自密实微膨胀混凝土、预应力筋、PBL加劲肋组合式连接构造;压重横梁段采用混凝土材料,平衡背索拉力,实现桥梁结构内力自平衡。桥面铺装采用玻璃桥面与彩色防滑桥面相结合,实现趣味性与安全性统一、并重。

桥梁2023年4月开通运营,达到了成为地标建筑的预期目标。开通伊始,就激发了全市市民上桥参观游览热情,周末节假日日游客量数万人,极大提升了周边人流量与地块价值。桥梁建成后夜间实景见图10。

(下转第200页)