

大跨径景观人行桥设计

于洋

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 随着经济建设的日益发展,担负着疏导人行交通重任的城市人行天桥数量与品质快速提升,并成为城市景观的重要组成部分。在景观人行桥设计中,对安全、合理、经济、舒适、耐久等方面的要求也在不断增加。结合实际工程,介绍了大跨径景观人行桥的设计要点,包括总体布置、结构设计、快速施工、人性化设计、景观优化、长期性能等,相关的设计思路与方法在实桥建设中进行了应用,取得了良好的经济效益与社会效益,可供同类桥梁建设进行参考。

关键词: 景观人行桥;拱桥;整孔吊装;快速施工;长期性能

中图分类号: U442.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)07-0140-04

Design of Long-span Landscape Footbridge

YU Yang

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: With the increasing development of economic construction, the number and quality of urban footbridges shouldering the important responsibility of guiding pedestrian traffic have rapidly improved, and have become an important component of urban landscape. In the design of landscape footbridges, the requirements of safety, rationality, economy, comfort, durability and other aspects are constantly increasing. Combined with the engineering practice, the design essentials of long-span landscape footbridges, including overall layout, structural design, rapid construction, humanized design, landscape optimization and long-term performance are introduced. The relevant design ideas and methods have been applied in actual bridge construction, and the good economic and social benefits are achieved, which can be used as a reference for the construction of similar bridges.

Keywords: landscape footbridge; arch bridge; integral hoisting; rapid construction; long-term performance

0 引言

随着近些年经济建设的日益发展,担负着疏导人行交通重任的城市人行天桥数量与品质快速提升,并成为城市景观的重要组成部分。大量城市人行天桥的建设对优化城市立体交通网络、改善车行感受、提升交通安全性等方面产生了良好的社会效益。

随着人们生活水平的不断提高,对桥梁美学的要求也在不断增加,近些年大量建筑师参与人行桥概念方案设计,使得人行桥立面形式发生了很大的变化,平面布局也呈现出曲线、折线、环形等多种形式^[1]。人行桥已经告别笨重、粗糙,而凸显灵巧、新颖^[2],成为各地的地标性景观建筑^[3]。与此同时,复

杂的建筑形态也给结构工程师带来了挑战,在保留概念方案设计理念,结构尺寸的同时,依然要保证桥梁的安全、合理、经济、舒适、耐久,这就对人行桥的结构设计提出了更高的要求。

1 工程概况

背景工程跨越Ⅲ级航道,是连接两岸大型居住社区的联络桥梁,同时也是区域内的景观节点。由于桥梁景观要求高,本工程前期开展了概念方案设计竞赛,并在方案设计的基础上开展结构优化设计以满足工程需要。

1.1 景观创意

桥位处河道作为古运河的一部分,蕴藏着两千年的悠久历史文化,孕育了一方水土,而今也依然在为现代航运事业贡献着力量;桥位处两岸建设为未来社区,规划有现代化的大型社区以及配套的商业文化建筑,功能丰富。为融合“历史”与“未来”,桥梁

收稿日期: 2024-05-17

作者简介: 于洋(1984—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

结合两岸规划,将坡道设计为螺旋形式,将跨河主桥设计为拱式结构,整体呈显著横跨河道的“如意”造型,一跨跨越河道,气势宏大,赋予了美好的愿景,并通过涂装、彩色铺装、夜景灯光打造出引人注目的景观节点。

1.2 设计标准

- (1)桥梁安全等级:一级;
- (2)设计基准期:100 a;
- (3)人群荷载:按《城市桥梁设计规范》(CJJ 11—2011)(2019年修订版)取值;
- (4)通航要求:Ⅲ级航道 60 m×7 m;
- (5)桥下净空:市政道路净空 4.5 m,人行净空 2.5 m;
- (6)抗震标准:设防烈度 6 度,基本地震动值加速度 0.05g,抗震设防类别丁类,抗震设防措施 6 度;
- (7)耐久性设计环境类别:Ⅰ类。

1.3 总体布置

桥位处河道两岸存在包括护岸结构、滨河步行道、游览小火车、市政道路、地下车库出口等限制因素,空间局促,通过总体布置优化,桥梁在狭窄的空间内满足了各部位车行、人行限界及无障碍坡度等功能要求并保证了与既有构筑物的安全距离。

主桥采用全焊钢结构空间刚性吊杆拱桥体系,跨径 96 m,主拱肋外倾 17.4°,两根对称布置的拱肋在岸上固结于一个承台。桥面系分为两幅,通过刚性吊杆以及横梁连接于拱肋,每幅总宽 3.5 m,桥面系空间上呈反对称布置,并在跨中交叉点平台形成汇合,见图 1 至图 3。

由于Ⅲ级航道通航界限要求为 60 m×7 m,主桥在跨越航道后高于两岸地面约 9 m,故桥梁在两岸设置坡道连接主桥与地面,考虑周边空间限制较多且坡长较长,坡道设计为内外圈双层的螺旋形式,其中外圈半径 8.75 m,内圈半径 4.75 m,外圈坡度满足 1:12 无障碍要求,内圈坡道满足规范 1:10 极限坡度要求。内外两圈坡道分别连接主桥的两个纵梁,并于桥梁接地位置汇合。

1.4 结构设计

主桥上部结构拱、梁均采用钢结构,主拱为两根直径 1 m 的钢拱肋,板厚 25 mm,在拱脚位置填充低收缩混凝土以提高刚度。桥面系主梁为箱型断面,梁高 0.8 m,通过间距 3 m 的工字型刚性吊杆与横梁连接于两侧拱肋上,端部吊杆及横梁受力较大,调整为箱型断面。

主桥下部结构在南北两岸各设置一个承台,考虑下部结构需要抵抗拱肋传来的水平力,每个承台布置了 15 根 $\phi 1\ 200\ \text{mm}$ 钻孔灌注桩,形成群桩基础以抵抗拱脚水平力。由于竖向力较小,在满足竖向承载力及沉降要求后选择⑦层粉质黏土层作为持力层,桩长 35 m。

为提高群桩基础在水平推力下的刚度,桥梁还采取了特定的构造与施工措施。承台底设置了 1 m 厚毛石混凝土垫层以加强对桩顶转角的约束,根据单桩水平承载力试验,桩基的实际水平承载力小于计算值,结构偏于安全,成桥后通过定期监测观察基础长期位移。同时,施工期间要求承台周边先回填背河道侧填土,再回填临河道侧填土,并提出压实度要求,尽量发挥被动土压力作为储备。

螺旋坡道的主梁采用梁高 0.75 m 的槽型断面钢梁以减小梁高,固结在内、外两层螺旋坡道间四根直径 1 m 的钢立柱上。

螺旋坡道基础采用单柱接 $\phi 1\ 200\ \text{mm}$ 桩基,并通过系梁连接承台,增强结构整体性。

2 施工方案

由于桥位处航道交通繁忙,为减少桥梁施工对航道的影响,主桥采用了岸上拼装后整体吊装的施工方案,以减少航道管控时间。

2.1 岸上拼装

主桥在桥位附近北岸搭设支架进行现场拼装,由钢结构加工厂制造满足道路运输条件的小型节段并运输至拼装场地,在桥位处现场搭设临时支架对

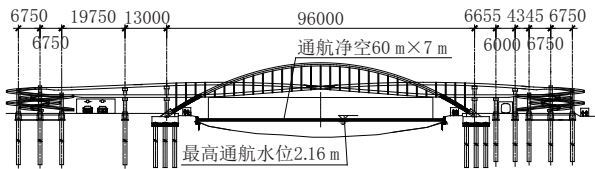


图 1 桥梁平面布置图(单位:mm)

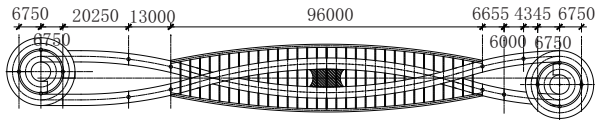


图 2 桥梁立面布置图(单位:mm)

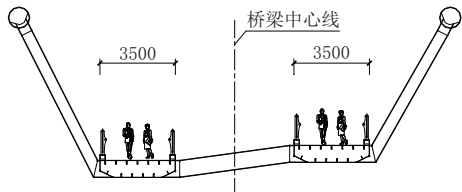


图 3 桥梁断面布置图(单位:mm)

节段进行拼装、焊接、涂装等施工步骤,形成整体。

2.2 整孔吊装

主桥吊装节段在岸侧拼装完成后,节段长度86 m,吊装重量约439 t,由两台500 t浮吊整体吊装就位。其中500 t浮吊尺寸50 m×25 m,吊臂长50 m,吊臂工作角度60°,工作幅度25 m,吊重350 t。

由于主桥结构构件多,受力复杂,且施工吊装工况与成桥工况有显著的受力体系转换,故需要重点评估施工吊装工况下的结构安全性。

根据吊装工况吊点布置及受力状态,吊装工况在拱肋间设置了临时钢管横撑,并与桥面进行连接以减少压杆计算长度。同时,由于主桥吊装工况下端部拱肋与横梁之间应力较大,故增加临时钢拉杆以优化结构受力。吊装工况计算模型见图4。

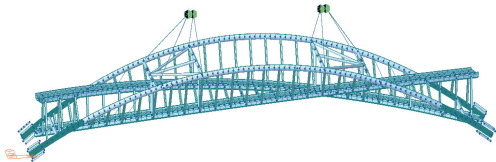


图4 吊装工况计算模型图

为保证现场拼接质量与精度,构造较为复杂的拱脚节段提前安装并焊接于拱座,吊装节段就位后支撑于临时构造上,与拱脚节段间预留嵌补段,在嵌补段焊接完成后拆除临时构造,完成体系转换。拱脚拼接现场见图5。



图5 拱脚拼接现场图

根据施工工况计算,86 m长吊装节段施工阶段最大应力158 MPa,位于端吊杆;最大变形129 mm,位于拱肋端部,满足受力要求。

通过采用以上主桥整孔吊装的施工方案,现场实际吊装封航时间约4 h,相比于水中搭设临时墩的分段吊装方案,大大节省了航道管控时间,提升了施工期间安全性,社会效益明显。

3 人性化设计

3.1 振动舒适性分析

由于本桥跨径大,刚度小,无法满足规范^[4]要求

的上部结构自振频率小于3 Hz的规定。为保证人行舒适性,本桥采用频率调整法进行人行振动舒适性计算。近些年,国内的科研与设计工作者在人导致振动舒适性方面做出了较多的研究^[5-6],大都采用基于频率调整法的规范进行尝试。频率调整法通过主动调整结构动力特性,避开结构敏感范围内的振动频率来提升振动舒适性,满足桥梁使用阶段的振动指标。这种方法为SIA(1989)、ENV1991、CEB(1993)、BS5400(1992)和“立体横断施設技术基准同解说”(1979)等众多国家的人行桥设计指南所采用。CEB(1993)和SIA160(1989)建议设计时尽量避免使人行桥的竖向振动固有频率 f_1 落在1.6~2.4 Hz和3.5~4.5 Hz的范围内。这些限制是基于正常人行步频处于1.6~2.4 Hz、其2阶谐波频率约3.2~4.8 Hz之间的假设。日本规范则仅要求结构基频不应在1.5~2.3 Hz范围之内。法国规范则认为若人行桥频率落入1.0~2.6 Hz,人桥共振的风险都比较大。舒适度评价标准见表1。

表1 舒适度评价标准

舒适级别	舒适度	竖向 $a_{y\text{limit}}/(m\cdot s^{-2})$	侧向 $a_{x\text{limit}}/(m\cdot s^{-2})$
CL1	最好	小于0.50	小于0.10
CL2	中等	0.50~1.00	0.10~0.30
CL3	最小	1.00~2.50	0.30~0.80
CL4	不能接受	大于2.50	大于0.80

经过验算,仅 f_1 、 f_2 模态落在规范要求需要评价的范围内,需要进行验算。通过增加TMD阻尼器,将大跨径人行桥的人致振动由CL2提升至CL1级别,改善了纵横向动力特性,见表2、表3。

表2 加装TMD前舒适度评价

阶次	频率/Hz	模态特征	最大加速度/($m\cdot s^{-2}$)	舒适度
f_1	1.01	一阶横弯	0.12	CL2
f_2	1.652	一阶反对称竖弯	0.52	CL2

表3 加装TMD后舒适度评价

阶次	频率/Hz	模态特征	最大加速度/($m\cdot s^{-2}$)	舒适度
f_1	1.01	一阶横弯	0.058	CL1
f_2	1.652	一阶反对称竖弯	0.433	CL1

从表4可以看出,安装了电涡流调谐质量阻尼器之后,桥梁TMD在工作状态下的实测阻尼比相对于TMD非工作状态下实测的阻尼比有大幅提升。

表4 实测阻尼比

传感器	安装前 频率/Hz	安装后 频率/Hz	安装前 阻尼比/%	安装后 阻尼比/%
1	1.367	1.343	0.349	2.82
2	1.968	1.962	0.344	3.560

3.2 无障碍设计

为跨越航道后尽快落地,主桥范围内桥面纵坡较大,均按 1:12 控制,桥面标高每变化 0.75 m 均设置 1.5 m 平台。由于两岸双层螺旋坡道受到用地限制,外侧坡道满足了 1:12 的无障碍坡度要求,但内侧坡道则只能按照规范^[4]极限要求的 1:10 设计。坡道实景鸟瞰见图 6。此外人行栏杆等也考虑设计双层扶手的构造,以满足无障碍设计要求。



图6 坡道实景鸟瞰图

4 景观设计优化

4.1 坡道的景观优化

根据《建筑与市政工程无障碍通用规范》,无障碍坡道纵向坡度不应大于 1:12,且坡道段每提升 0.75 m 需要设置长度 1.5 m 的平台,这样桥梁侧面曲线将成为折线,对景观效果影响明显。为确保全桥的外观平顺,主桥及坡道桥面系箱型结构采用了变高的设计方案,通过调整桥面板处梁高,并保持栏杆基座处梁高不变,保证了无障碍平台要求并实现了良好的侧立面景观效果(见图 7)。

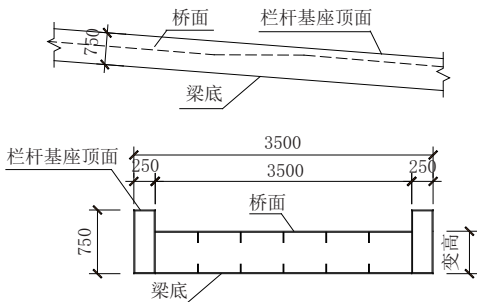


图7 主梁变高示意图(单位:mm)

4.2 色彩设计

桥梁外立面涂装色彩以低调的灰色为基本色,可和谐地融入沿岸整体建筑环境中。而坡道铺装结合沿岸慢行绿道铺装色彩,采用了视觉冲击强烈的红色与蓝色,同时也形成强烈的对比,给予周边居民良好的慢行体验。

4.3 景观亮化

桥位附近除居住社区外,建设有城市阳台、商业

中心、文化中心等建筑,夜景灯光分区明确、层次丰富、律动感强。桥梁作为沿河景观亮化的重要组成部分,结合沿岸景观亮化的总体规划,设计为以功能为主的平日模式,节约能耗为主的深夜模式以及动态绚丽的重大节日模式。照明设计融入“历史、现在、未来”三个理念进行光设计,凸显建筑载体的形态特色。

4.4 雨水管的优化

为减少桥梁排水设施对整体景观造型的影响,桥梁采用了内置隐藏式的排水管设计,排水管道均设置在梁体与桥墩内部,在梁柱结合部位设置波纹软管进行连接以适应变形,同时接头位置靠近墩柱边,以便于检修更换。

5 长期性能的考虑

5.1 防腐

该项目钢结构采用了长效型防腐,使用寿命大于 15 a。设计要求钢箱梁施工完成后对连接箱体内外部的过焊孔进行封闭,防止湿度变化,并对承台连接处理置于土中的钢立柱采用混凝土进行包封。

混凝土结构满足 I 类环境下保护层厚度以及《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》(JTG/T3310—2019)规定的混凝土最低强度等级、最大水胶比、最小水泥用量等要求。

5.2 监测

为保障桥梁运营期间的长期受力性能,设计中考虑了设置桥梁健康监测,长期对桥位处包括风速、湿度等环境特征,应力、位移、沉降等静力特征以及各模态及阻尼比等动力特性进行跟踪监测。

6 结 语

人行桥梁在艺术性上的不断提升,为市民带来了更好的生活体验,但也给结构工程师在总体布置、结构设计、施工方案等方面提出了挑战,只有在桥梁设计中统筹考虑各种因素、针对性地给出合理的方案,才能在实践中取得良好的效果,创造出优秀的桥梁作品。桥梁实景见图 8。



图8 桥梁实景图

(下转第 190 页)