

南京雨花线性公园慢行桥梁总体设计

张海平

(东南大学建筑设计研究院有限公司, 江苏 南京 210096)

摘要: 作为南京首座线性公园, 雨花线性公园以桥梁形式为主体, 在城市中打造出一条生态、低碳的城市共享空间, 也承载了市民通行、休闲、社交等多种功能。桥梁总长约1.2 km, 标准宽度5 m, 标准跨径为20、25 m, 跨路口段跨径为36、40、48.81 m, 为专供行人和非机动车行驶的城市慢行桥梁。基于项目特点, 分别对桥梁结构的总体设计理念、结构体系比选以及装饰细节做法进行了介绍, 并以跨梅苑南路桥为例, 对桥梁进行了静力分析、动力特性分析以及行人舒适度评价。结果表明, 桥梁结构强度、刚度均满足规范要求; 增设TMD后, 桥面竖向和横向加速度峰值均有较大幅度的减小, 行人舒适度满足德国人行桥规范CL1级别。

关键词: 线性公园; 慢行桥梁; 钢结构人行桥; 舒适度分析; TMD

中图分类号: U448.11

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)08-0175-05

Overall Design of Slow-traffic Bridge in Nanjing Yuhua Linear Park

ZHANG Haiping

(Architecture and Engineering Institute Co., Ltd., of Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: As the first linear park in Nanjing, Yuhua Linear Park is mainly in the form of bridges, creating an ecological and low-carbon urban sharing space in the city, and also carrying various functions such as citizen transportation, leisure and social interaction. The total length of the bridge is about 1.2 km with a standard width of 5 m, standard spans of 20 m and 25 m, and spans of 36 m, 40 m and 48.81 m at intersections, which is an urban slow-traffic bridge designed specifically for pedestrians and non-motorized vehicles. Based on the characteristics of the project, the overall design concept, structural system comparison and decorative details of the bridge structure are introduced. Taking the bridge spanning South Meiyuan Road as an example, the static analysis, dynamic characteristic analysis and pedestrian comfort evaluation are conducted on the bridge. The results indicate that the strength and stiffness of the bridge structure meet the requirements of the specifications. After the addition of TMD, the peak values of vertical and horizontal acceleration of the bridge deck are significantly reduced, and the pedestrian comfort meets the CL1 level of the German pedestrian bridge specification.

Keywords: linear park; slow-traffic bridge; steel structure pedestrian bridge; comfort analysis; TMD

0 引言

线性公园通常指沿线性分布的城市公园, 目的是创造一个健康的慢行绿道或河畔系统^[1], 将城市社区、景点、休闲场所等巧妙地串联起来, 并兼具日常通行、休闲游览与缝合城市^[2]的功能; 其公认的“鼻祖”, 是始建于1878年的美国波士顿“翡翠项链”, 其将九大城市公园和绿地系统串联起来, 形成了16 km的公园景观^[3], 使得线性公园这一全新理念迅速走红并风靡全球。多年以来, 在美国纽约^[4]、英国伦敦、丹麦哥本哈根^[5]等地, 也均有风格相近却又

各具特色的线性公园案例相继建成并取得成功。

雨花线性公园是南京首座线性公园, 利用城市规划绿地作为载体, 以低影响开发为基础, 以生态干预最小为原则, 在密集的城市建筑中打造出一条生态、低碳的城市共享空间, 也承载了市民通行、休闲、社交等多种功能^[6]。

项目位于雨花台区数字大道南侧, 全线由7 km的地面步道和1.2 km的慢行桥梁共同组成。慢行桥梁秉持“桥在林中穿, 人在桥中行, 树梢看雨花”的设计理念, 沿线连接起雨花文体公园、燃能光环、经典剧场、无界驿站、雨花博物馆、滨河体育公园等一系列节点, 还将雨花城市公园、秦淮新河百里风光带等沿途景观项目串联起来, 与地面段共同形成8.5 km的慢行友好闭环线路。鼓励市民以慢行出行, 通过

收稿日期: 2024-12-11

作者简介: 张海平(1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。

线性公园到达城市功能的各个板块。

1 工程概况

桥梁西起雨核公园,沿数字大道南侧展开,跨越多个路口,下穿机场二通道后,与雨花城市公园慢行系统交汇,向南跨越龙西路,并延伸至秦淮新河风光带绿道,桥梁平面位置见图1^[7]。



图1 桥梁平面位置示意图

桥梁总长约1.2 km,标准宽度5 m,标准跨径20、25 m,跨路口桥梁跨径36、40、48.81 m,全线由1联钢板梁和15联钢箱梁组成,为专供行人和非机动车行驶的城市慢行桥梁,桥梁效果如图2所示。



图2 桥梁效果图

2 结构设计

2.1 总体设计

由于桥梁平面位于小半径曲线上,桥梁布跨受地面道路、景观、障碍物等多种因素制约,跨径布置不尽合理,且钢箱梁与常规混凝土梁相比自重较轻,采用连续梁体系验算时,为避免支座脱空乃至整体倾覆,往往需要对钢箱梁进行压重^[8],增加施工工序和建造成本。结合本项目实际特点,将桥梁改为连续刚构体系,联与联之间的伸缩缝设置在1/5L(L为邻跨跨径)位置,伸缩缝处设置牛腿,牛腿上设置单支座(见图3),有效避免了钢箱梁的倾覆问题。

项目跨越梅苑南路、经七路、经八路、经九路等多个路口,沿线每隔300 m左右设置垂直电梯或上下桥梯道,方便行人上下桥。其中第5联跨越梅苑南路,主跨跨径48.8 m,且平面位于转角位置,设置垂直电梯及三层观景平台。在进行该联总体设计时,

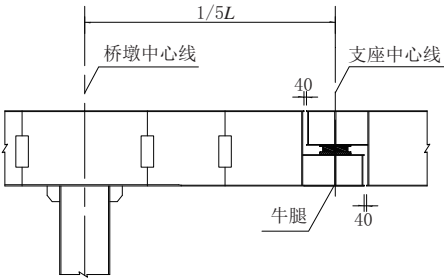


图3 联与联之间伸缩缝及牛腿布置(单位:mm)

主跨考虑简支梁和连续梁两种结构体系。通过体系对比,连续梁体系跨中正弯矩更小,但会引起转角处桥墩较大的侧向弯矩;在此处创新性地采用桥墩与电梯井合建的方式,利用4根600 mm×600 mm方形钢柱代替原有单个桥墩,桥墩与主梁形成整体刚性节点。同时,在平面转角反方向一侧设置观景平台作为压重,可抵消侧向弯矩给基础带来的不利影响。

2.2 上部结构设计

钢箱梁标准断面采用单箱单室截面,见图4。顶、底板水平布设,标准段梁高1.2 m,箱室宽度2.1 m,两侧悬臂长1.45 m。横隔板标准间距2.0 m,两道横隔板之间设置一道T形腹板加劲肋。顶、底板厚14 mm(跨梅苑南路段加厚至16 mm),腹板厚12 mm,顶底板布设12 mm×120 mm板式加劲肋。墩梁固接段底板局部3 m范围加厚至20 mm(跨梅苑南路段加厚至24 mm),对应底板肋局部加高至16 mm×190 mm。

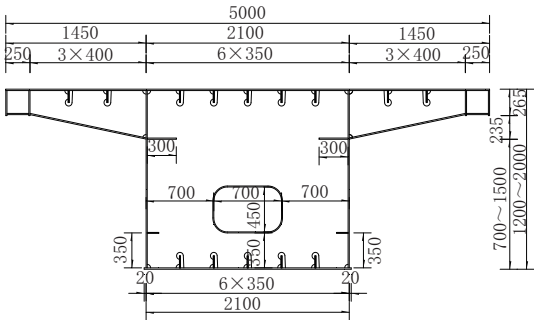


图4 钢箱梁标准断面(单位:mm)

非标准段桥梁两侧悬臂长度维持1.45 m不变,通过调整箱室宽度适应桥宽变化。跨路节点桥梁梁高根据主跨跨径调整,在邻跨内渐变至标准梁高(见表1)。

表1 跨路节点梁高一览表

联号	跨径布置/m	主跨梁高/m	跨越路口
N2	22+22+20	1.2	纬三路
N5	20.1+48.8+27	2.0	梅苑南路
N7	30+30+40+27	1.6	经八路
N11	27+27.2+36+30	1.5	经九路

桥梁第一联上部采用小跨径钢板梁(见图5)降低建筑高度,减小对公园景观的干扰,纵、横梁均采用等高工字梁,梁高0.55 m,桥面板厚12 mm,采用10 mm×120 mm板肋加劲。

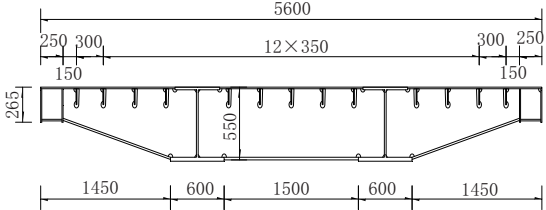


图5 钢板梁标准断面(单位:mm)

桥梁第五联转角平台处采用钢箱梁整体加宽、局部增加腹板的构造形式,在梯井柱对应位置增设加强横梁,平面布置见图6。

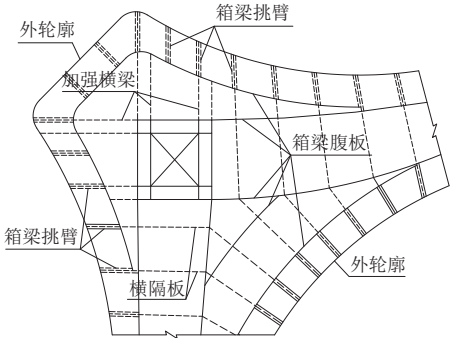


图6 转角平台处钢结构总体布置图

2.3 下部结构设计

下部结构设计时,除与电梯井合建的15#桥墩外,其余均采用单柱接单桩的结构形式,可以有效降低基础水平刚度,在一定程度上减少连续刚构体系传递给基础的弯矩与剪力;同时也大幅减少基础与地下管线的冲突,减少承台基坑开挖,降低工程整体造价。

桥墩采用连续刚构体系与上部结构相连,墩梁固接处在箱梁内部设米字形加劲板,标准段桥墩采用直径0.8 m圆形钢墩(墩顶局部设置扩大头),下接直径1.5 m钻孔灌注桩基础;钢柱与混凝土之间采用剪力钉连接,具体做法见图7^[9]。

2.4 附属设施设计

为减少钢桥面振动,提升步行与骑行舒适度,桥面采用8 cm钢纤维混凝土+6 mm环氧薄层铺装。铺装下面层采用高渗透性树脂,通过毛细作用提高磨耗层与混凝土黏结力;中面层采用柔性耐候树脂黏结1~2 mm橡胶颗粒,同时掺入弹性复合填料,具备良好吸震性能;上面层采用柔性耐候树脂黏结0.5~1 mm陶粒,兼具防滑与减震功能。面封层以渗透性树脂为载体,复合着色剂,保持颜色鲜艳持久。

桥面栏杆采用不锈钢立柱+玻璃栏杆形式,栏杆

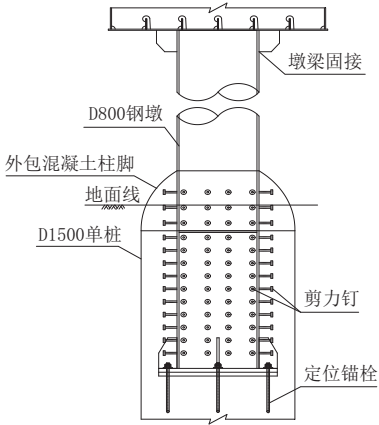


图7 桥墩柱脚做法

外侧设置成品花箱,不锈钢立柱与花箱支架形成整体框架,提升结构稳定性;花箱外侧设置穿孔铝板,箱梁及墩柱外侧均采用可拆卸的弧形单铝板包封,保证整体线形流畅美观(见图8)。

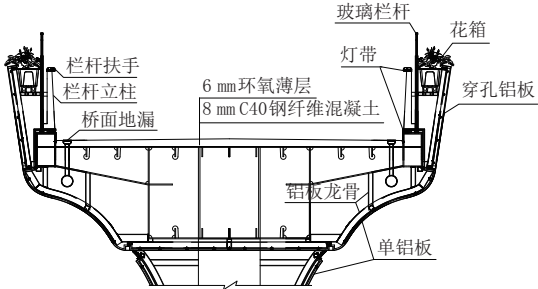


图8 桥面附属设施做法

桥体两侧花箱设置智能滴灌系统(见图9),利用传感器监测雨量,电磁阀控制滴灌喷头定时开启;花箱底部设置通长给水、排水管道,给水管按照4个分区分别从桥下供水主管引入,排水管每隔50 m接入桥面雨水收集系统。

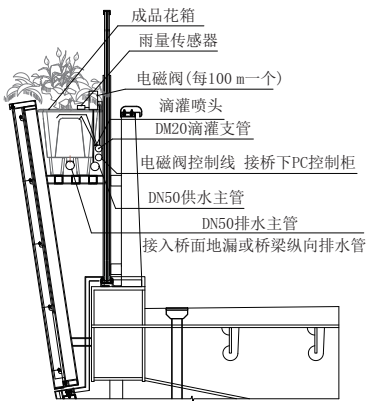


图9 花箱滴灌系统做法

桥面亮化设计时,在满足夜间照明需求的基础上,分别将灯带设置在栏杆扶手以及栏杆底座内侧,灯具管线通过立柱内部及栏杆底座内部穿行,充分践行“见光不见灯”的设计理念,提升桥梁整体品质^[10]。

3 主桥结构计算分析

3.1 模型建立

以第5联跨梅苑南路桥(跨径布置 20.08 m + 48.811 m +27 m)为例,采用 MIDAS Civil 建立主桥空间有限元模型,主梁及墩柱均采用梁单元模拟,结构模型见图 10。

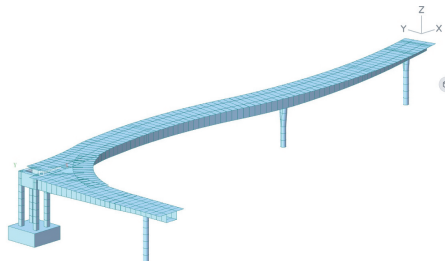


图 10 主桥有限元模型

3.2 荷载标准

静力分析考虑的主要荷载如下：
恒载：一期恒载包括主梁、横梁自重；二期恒载包括桥面铺装、栏杆、铝板、花箱及支架等；
人群及非机动车荷载：按照《城市桥梁设计规范》相关条文取值,且不小于 3.5 kPa^[11]；
温度作用：整体升温 25 ℃,降温 25 ℃；
基础变位：按 1/3 000 L 施加。

3.3 结构静力分析

荷载基本组合下,结构应力见图 11。钢结构最大应力 156.9 MPa,出现在 16#墩墩梁固接处,主跨跨中最大应力 156.2 MPa。

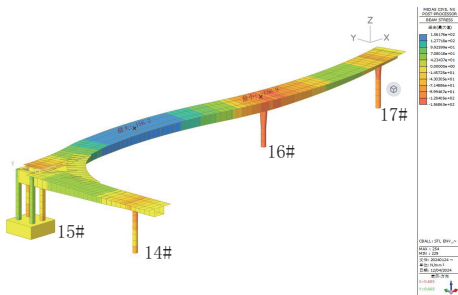


图 11 基本组合下结构应力云图(单位:MPa)

平台板采用板单元模拟,荷载基本组合下,平台板应力见图 12,最大应力 64.1 MPa,结构强度均满足所用 Q355C 钢材的强度要求。

活荷载作用下,结构竖向位移云图见图 13。最大竖向挠度出现在主跨跨中,最大挠度 38.8 mm,小于规范规定 1/500L 的限值要求,结构刚度验算满足规范要求。

3.4 结构动力特性分析

对桥梁结构进行动力特性分析,结构自振周期

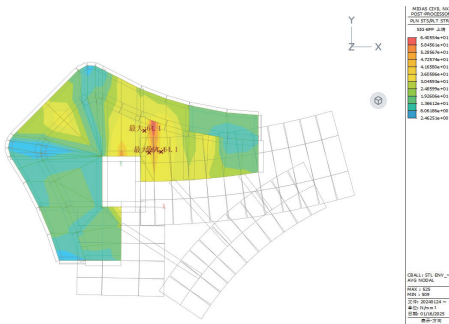


图 12 基本组合下平台板应力云图(单位:MPa)

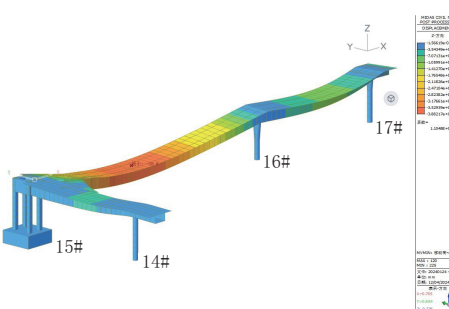


图 13 活荷载作用下竖向位移云图(单位:mm)

及振型见表 2。

表 2 结构自振周期及振型			
阶数	频率/Hz	周期/s	振型
1	0.913	1.096	横向一阶
2	1.290	0.775	横向二阶
3	1.786	0.560	纵向一阶
4	2.160	0.463	竖向一阶
5	2.255	0.444	竖向二阶

结构一、二阶振型为垂直主跨方向的整体横弯,竖向一阶振型(主梁整体竖弯)出现在第四阶,竖向一阶频率为 2.16 Hz,不满足现行《城市人行天桥与人行地道技术规范》^[12]2.5.4 条“天桥上部结构竖向自振频率不应小于 3 Hz”的要求,且横向、竖向一阶自振频率均落在结构敏感频率(水平 0.5~1.2 Hz,竖向 1.25~2.3 Hz)范围^[13]内,需要进行舒适度分析。

3.5 人行舒适度评价

由于我国现行规范无尚未涉及人行舒适度,本文参考德国人行桥设计指南^[14]的要求,对本桥进行人行舒适度分析。

基本设计参数如下:钢结构阻尼比取 0.4%,桥上行人密度按德国规范 EN03 的 TC5 取值,2.16 Hz 对应的折减系数为 0.7,单人产生的荷载幅值 P=280 N,TC5 交通级别的人行荷载参数见表 3。

将人行荷载以节点动力荷载的方式加载于有限元模型上,分析时长均取 60 s,分析时间步长 0.02 s^[15]。

表 3 TC5 交通级别人行荷载参数

交通级别	行人密度/ (人·m ⁻²)	行人数量 n/人	等效行人密度/ (人·m ⁻²)
TC5	1.5	720	0.103 5

在 TC5 级别人行荷载下,桥梁竖向峰值加速度 2.1 m/s²,出现在主跨跨中截面;水平峰值加速度 0.4 m/s²,出现在边跨悬臂端部。根据德国规范 EN03 的要求,此时桥梁舒适度评价为 CL3 级别,舒适度评价为“最小”。

为提高桥梁人行舒适度,在主跨跨中处设置竖向 TMD(tuned mass damper)阻尼器,在边跨悬臂端部设置横向 TMD 阻尼器^{[16][17]}。经过试算,阻尼器规格均采用 1.5 t。设置阻尼器后,主跨跨中竖向峰值加速度降至 0.26 m/s²,边跨悬臂端部水平峰值加速度降至 0.05 m/s²,桥梁舒适度评价为 CL1 级别,舒适度评价为“最好”。

4 结 语

作为南京首座线性公园,雨花线性公园以慢行桥梁的形式与周边街区、商业园区融合互通,串起工作、休闲、运动等多种生活场景,最大限度利用并拓展了城市空间。

慢行桥梁采用连续刚构钢箱梁结构体系,有效避免了小半径钢箱梁倾覆问题;平面转角处创新性地采用电梯井与桥墩合建的形式,有效节约了桥下空间。

以跨梅苑南路路口桥为例,对桥梁进行了静力分析、动力特性分析以及人行舒适度评价,结论表明,结构各项指标均满足规范要求,增设竖向和水平

TMD 阻尼器后,桥梁人行舒适度评价满足 CL1 级别。

参考文献:

[1] 大卫·弗莱彻.景观实录:线性公园[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,2018.

[2] 周绮妍,戎筱.上海百禧公园更新改造:缝合城市的线性“空中花园”[J].公共艺术,2022(5):33-39.

[3] 易辉.波士顿公园绿道:散落都市的“翡翠项链”[J].人类居住,2018(1):18-21.

[4] 廖姜.城市更新中的公共空间塑造与运营初探——以纽约高线公园为例[J].交通节能与环保,2023,19(1):95-98.

[5] 艾万·巴安,托尔本·埃斯科诺德,迈克·麦格纳森,等.丹麦哥本哈根超级线性城市公园[J].风景园林,2014(2):52-61.

[6] 南京林业大学工程规划设计院有限公司.雨花数字城核心区线性公园项目方案设计[Z].南京:南京林业大学工程规划设计院有限公司,2023.

[7] 东南大学建筑设计研究院有限公司.雨花数字城核心区线性公园项目施工图设计[Z].南京:东南大学建筑设计研究院有限公司,2023.

[8] 黄志诚,李东洋,郭馨艳.大跨径简支钢箱梁弯桥抗倾覆性能研究[J].公路工程,2019,44(5):14-17,141.

[9] 左雪娜,阮惠强.钢管桥墩与混凝土基础的内插式刚性柱脚连接研究[J].工程建设与设计,2024(19):137-139.

[10] 王卿,邓丹平.功能照明和桥梁景观的一体化设计[J].照明工程学报,2012,23(6):141-145.

[11] CJJ 11—2011,城市桥梁设计规范[S].

[12] CJJ 69—95,城市人行天桥与人行地道技术规范[S].

[13] 陈政清,华旭刚.人行桥的振动与动力设计[M].北京:人民交通出版社,2009.

[14] EN03—2007,Design of Footbridges—Background document[S].

[15] 朱前坤,马法荣,张琼,等.行人-结构竖向动力耦合效应试验研究[J].建筑结构学报,2020,41(11):125-133.

[16] 张慧新,邵明洁.钢结构景观人行桥振动舒适度优化设计[J].城市道桥与防洪,2024(10):115-118.

[17] 樊健生,陈宇,聂建国.人行桥的 TMD 减振优化设计研究[J].工程力学,2012,29(9):133-140,156.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: roadbridgeflood@163.com

