

菱湖大桥总体设计及创新点

唐春霞

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要: 随着现代化建设的推进,人们生活水平不断提高,桥梁工程不仅仅满足交通功能需求,同时也承担着提升城市景观的重要作用。而中承式拱桥因结构形式灵活多样而在城市桥梁中得到了广泛的应用。菱湖大桥是一座位于无锡市的跨京杭运河城市景观桥梁。菱湖大桥采用三跨中承式系杆拱桥,跨径布置100 m+183 m+100 m,主梁采用钢-混凝土组合梁,主拱采用钢桁架拱。通过对项目概况、方案设计及结构体系、主要结构设计等主桥总体设计要点及设计创新点的论述,阐述了中承式系杆拱桥设计过程中需要关注的要点,为同类城市景观桥梁的设计提供参考意义。

关键词: 中承式系杆拱桥;景观桥梁;结构设计;钢-混凝土组合梁;钢桁架拱

中图分类号: U448.22+5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)02-0078-05

Overall Design and Innovation Essentials of Linghu Bridge

TANG Chunxia

[Architectural Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Tongji University, Shanghai 200092, China]

Abstract: With the advancement of modernization and the continuous improvement of people's living standard, the bridge engineering not only meets the needs of traffic functions, but also plays an important role in improving the urban landscape. The half-through arch bridge has been widely used in urban bridges because of its flexible and diverse structure. Linghu Bridge is an urban landscape bridge across the Beijing - Hangzhou Canal in Wuxi City. Linghu Bridge is a three-span half-through bowstring arch bridge with the span layout of 100 m+183 m+100 m. The girder is a steel-concrete composite girder, and the main arch is a steel truss arch. Through the discussion of the overall design and innovation essentials of the main bridge in the project overview, scheme design, structural system and main structure, the essentials to focus on during the design of the half-through bowstring arch bridge are expounded, which provides the reference for the design of similar urban landscape bridges.

Keywords: half-through bowstring arch bridge; landscape bridge; structural design; steel-concrete composite girder; steel truss arch

0 引言

随着现代化建设的推进,人们生活水平不断提高,桥梁工程不仅仅满足交通功能需求,同时也承担着提升城市景观的重要作用。而拱桥更是由于其结构形式千姿百态,在国内外桥梁工程中应用广泛^[1]。现代景观桥梁的很多桥型都从拱桥发展而来。在拱桥中,中承式系杆拱桥因其适应性强、构件简洁明快、经济性好,在大中型跨径桥梁中得到了长足的运用。

1 工程概况

菱湖大桥是无锡市菱湖大道跨越京杭运河的节

点工程,位于京杭大运河与古运河的汇流处,横跨京杭大运河,连接着新吴区与经开区,见图1。桥位处河面宽阔,河宽约160 m,远大于京杭运河常规段宽度90 m。另外,桥位两岸规划为绿地,附近未规划高层建筑群,视觉空间开阔。因此,菱湖大桥作为周边唯一规划的大型建筑,不仅是连接两区的主要交通干道,还需要承担重要的城市景观功能。



图1 项目位置图

桥位处场地地貌单元为长江三角洲太湖冲湖积平原,场地土以黏土、粉土、粉质黏土为主。场地抗

收稿日期: 2024-08-07

作者简介: 唐春霞(1980—),女,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

震设防烈度为 7 度,设计地震分组为第一组,设计基本地震加速度值为 0.10g。

菱湖大道为城市主干道,设计车速是 60 km/h,设计荷载是城-A 级。京杭运河为三级航道,净空要求不小于 80 m × 7 m。桥下跨越道路城南路、运河西路的净空按不小于 5 m 控制。

2 桥梁方案构思及总体设计

2.1 桥型方案构思

桥位处京杭大运河无锡段上下游约 10 km 范围内共有十一座桥梁,平均间距为 0.9 km,见图 2、图 3。桥梁形式以梁式桥为主,另外还有若干座拱梁组合体系桥、刚构桥及矮塔斜拉桥。



图 2 永旺大桥(上游)



图 3 高浪路大桥(下游)

考虑到桥位上下游的两座桥梁均为梁桥,而桥位处空间开阔,因此桥型方案选择上优先考虑采用有上部建筑的桥型。而斜拉、悬索桥的造型中均有高耸的塔,艺术表现上较为挺拔、大气,与桥位周边的规划定位不一致。拱桥的主要造型元素有圆弧形的拱和直线的梁,艺术表现上更为圆融、温和,与环境的呼应更为和谐。

桥位东北片区规划有物流中心、西北及东南位置规划有少量的居民区及研发中心,因此从景观需求的比例上看,桥梁景观主要服务于过境客、货车车辆,其次服务于附近的步行、骑行的人群。

综合以上整体环境、局部环境及受众分析的景观对比研究,菱湖大桥最适宜采用拱式桥型。同时桥型设计应注重于整体结构的尺度与比例,依靠优化桥梁本身构件的比例、断面、尺寸来形成桥梁的美感。

2.2 总体设计

综合航道部门、防洪及文保等各方面的要求,本项目需一跨过河;根据现有路网规划,需同时跨越城南路及运河西路,并与两侧现状接线道路平交。

结合京杭运河的通航水位、净空要求以及南北下穿道路的控制标高,以及运河无锡段现有桥型分析,考虑桥位处的地质特点,菱湖大桥最终选用了中承式系杆拱桥桥型,既可以降低桥面高度、改善引桥接线的纵断线形,同时也能在纵坡与造型中可以取得较好的平衡,有良好的技术经济优势。

主跨采用 183 m,边跨采用 100 m,边中跨比约为 0.55,接近黄金比例,见图 4。



图 4 主桥效果图

菱湖大桥两侧各按 2.49% 纵坡与引桥顺接。桥梁与两侧驳岸呈不同程度的斜交。桥轴线与航道中心线呈 5.02° 斜交。运河西路侧主桥范围内有约 18 m 位于缓和曲线内,主桥结构按正交做。

菱湖大桥跨径布置为 100 m + 183 m + 100 m = 383 m,标准桥宽 40.5 m,见图 5。

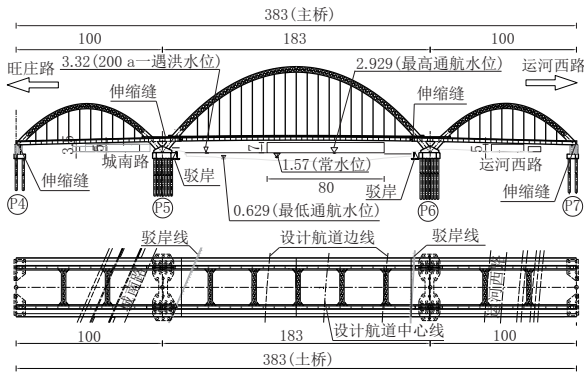


图 5 主桥总体布置图(单位:m)

3 主桥创新点

由于桥位处限制条件较多,对桥梁景观又有一定的要求,因此在设计过程中在桥梁建筑造型、结构体系、拱肋结构等方面做了技术创新。

3.1 建筑造型

菱湖大桥桥型方案脱胎于传统的飞燕式拱桥。但传统的三跨飞燕式拱桥边跨在桥面以下,运河西

路及城南路净空难以满足;而传统的五跨飞燕式拱桥,一方面增加了主桥长度导致造价增加,另一方面则由于运河西路侧边跨位于平曲线段上,也大大增加实施难度。

菱湖大桥创造性的采用了三连拱中承式系杆拱桥,既满足了桥下净空的要求,又使桥梁造型美观,结构受力明确。

3.2 结构体系

菱湖大桥结构形式有别于一般的飞燕式拱桥,且由于两边接线已施工完成、纵坡受限,桥面距离地面矮,导致拱间三角区位置长度较小、三角区的受力十分复杂。因此如何减小主墩三角区的受力及主墩水平推力、并确定结构受力体系是本桥设计的重点。

经过反复论证、研究,在传统的自平衡连拱体系^[3]的基础上,菱湖大桥创造性的采用了纵向系杆组合体系:边跨纵梁作为刚性系杆、主跨采用钢绞线索作为柔性系杆的结构体系。避免了全桥通长系杆的设置,提高了结构安全度,见图6。

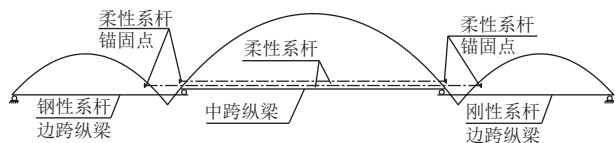


图6 结构体系示意图

中跨桥面系通过支座支承在拱间横梁上,为纵向漂浮、横向限位的半漂浮体系;边跨纵梁、三角区与拱肋固结,边跨端部设纵向滑动支座。

所设柔性系杆既平衡了主拱肋恒载水平力,又改善了三角区纵梁受力。活载水平力由基础承受。

拱脚恒载不平衡弯矩通过设置基础偏心来调整、活载不平衡弯矩由基础承受。

3.3 技术创新

传统的桁架拱桥主弦杆一般采用圆管型断面或开口型钢断面。钢管型断面采用内灌混凝土形式提高截面的抗压性能,能充分发挥两种材料的性能,缺点是管内混凝土质量直接影响拱肋的受力状况及耐久性,因此,对钢管管内混凝土的施工质量要求非常高。开口型断面则构件纤细,整体性差,对施工和运输均提出了较高的要求。

菱湖大桥创新性地采用了一种组合桁架式钢拱肋断面,由横向哑铃型的弦杆和工字型腹杆组成。拱肋全断面为等高等宽,通过哑铃型弦杆断面顶底板、腹板的不同板厚的调整,适应从拱顶到拱底的受力需求,通过小尺寸板件的组合运用避免了材料的

浪费,并且增加了截面的通透性(见图7)。结构受力明确,景观效果好,施工方案成熟,易于维护。

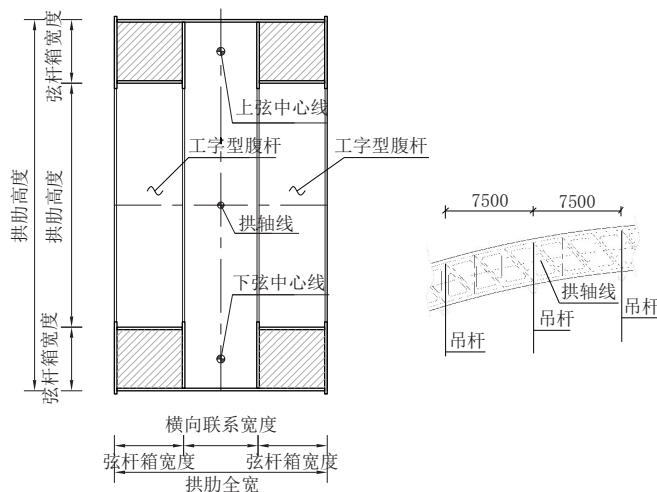


图7 拱肋标准断面及节段立面示意图(单位:mm)

4 主桥结构设计

4.1 主梁结构设计

根据本桥受力特点,主梁结构断面形式可选择混凝土梁、钢箱梁和钢-混凝土组合梁。

混凝土梁自重大,造价低。本桥边跨以纵梁为刚性系杆,若采用混凝土结构,需配置大量的预应力束才能满足设计需求,构造复杂、施工繁琐,因此边跨不推荐采用。而由于中边跨跨径不同,若平衡中墩的恒载弯矩,中跨要采用更轻型结构,因此也不推荐采用混凝土梁。

钢箱梁具有自重轻、整体性好、易施工等特点,但造价高且桥面铺装施工难度大、后期维护成本高。

钢-混凝土组合结构因其构件较轻,又可分块吊装,因此利于预制拼装施工。在本项目中,还可以通过设置不同厚度的桥面板调整中边跨恒载比重,平衡拱脚处的恒载不平衡弯矩。另外,其经济性上较钢梁有优势,抗疲劳能力相较也大幅提高。

综上所述,中边跨主梁均采用钢-混凝土组合梁断面,经济性好,与结构体系更为匹配。

本桥中跨采用预制C50混凝土桥面板+钢纵横梁结构(见图8),边跨及三角区采用现浇桥面板+钢纵横梁结构。桥面板后浇缝采用C50微膨胀混凝土。

横梁纵向标准间距为3.75 m,纵梁横向标准间距为6.325 m。除2道大纵梁及拱间横梁采用箱型结构外,其余小纵梁、横梁均采用工字型结构。

中跨桥面板标准厚度采用240 mm,边跨及三角

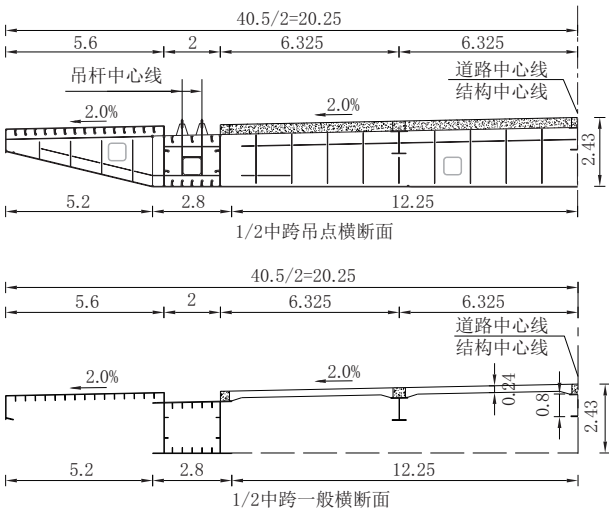


图8 中跨标准断面图(单位:m)

区桥面板标准厚度采用 400 mm。中跨采用预制桥面板;边跨及三角区为整体现浇桥面板。

三角区主梁与拱间横梁固结,结构形式同中边跨主梁。

4.2 主拱结构设计

理想的拱轴线是主拱截面上只有轴力,没有弯矩及剪力作用^[1,4]。但实际上,由于主拱受到恒载、活载、温度等多种荷载作用,无法通过选定一个拱轴线使得各个工况下拱肋都只受轴力。本项目为城市桥梁,恒载的占比较大,因此选择拱轴线时主要考虑了恒载的作用。

通过对同类型桥梁的调研,以及大量的计算比选,最终主拱拱轴线采用悬链线、边拱拱轴线选择了2次抛物线。恒载作用下主拱和边拱均以受轴向压力为主。

拱肋截面采用了一种创新的组合桁架式钢拱肋断面。边拱拱肋全高3 500 mm、中拱拱肋全宽3 800 mm,拱肋全宽2 000 mm,上、下弦箱高 600 mm。腹杆采用工字型断面。拱肋内部纵向贯通,给运营期间的检修及养护提供了条件。

菱湖大桥采用平行拱肋,为了保证桥梁的横向刚度和稳定性,需要设置风撑以加强拱肋的横向联系。拱肋风撑的设置位置一般由于净空影响有设置在桥面以上或者桥面以下两种形式。鉴于本项目桥下净空的限制、桥面净空富裕,因此采用在桥面以上拱肋之间设置风撑的形式。

边跨拱顶设2道“一”字撑、中跨在六分点位置各设1道“一”字撑,风撑采用钢桁架结构,风撑主弦采用 500 mm × 500 mm 的方钢管,腹杆采用 500 mm

高工字钢。

4.3 拱间三角区设计

为满足工程总体布置要求,本桥拱间三角区位置桥面距离地面较矮,导致三角区的受力较为复杂。

从构造上,有两种处理方式:三角区纵向系梁与拱腿固结(方案一)和三角区纵向系梁采用简支梁支承在拱腿上(方案二)。

由图9、图10可知,由于中边跨在拱间三角区分别有较大竖向力作用,如果三角区纵向系梁与拱肋之间采用简支体系,那么拱腿位置将承受较大的弯矩,拱腿构造也比较复杂。因此,拱间横梁、三角区纵向系梁及拱肋/拱腿采用三向固结形式,充分利用边跨纵向刚性系梁的作用,大大改善了拱腿的受力。同时,因为减少了伸缩缝的设置,行车舒适性更好。

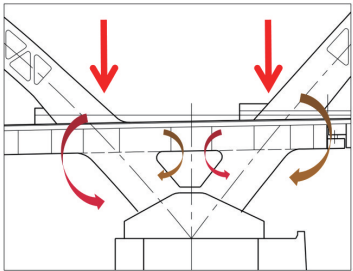


图9 方案一三角区受力示意图

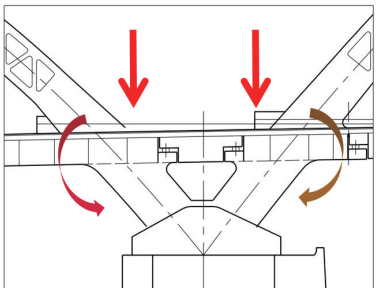


图10 方案二三角区受力示意

中边跨通过设置不同板厚桥面板来平衡拱脚弯矩;同时拱腿由初拟混凝土结构调整为钢结构,拱腿内灌C50微膨胀混凝土,既能改善拱腿受力,又简化了拱腿与梁、拱肋之间的连接构造。

拱脚与承台采用 $\phi 120$ 锚固螺栓与型钢形成的大型支撑锚固架连接,并在拱腿部分采用外包混凝土,见图11,既增加了结构刚度,又增加了拱腿部分的美观。

4.4 吊杆设计

在 200 m 跨径以内的系杆拱桥,吊杆布置形式对工程造价波动的敏感性相对较低,可以更加自由地从施工便利性和桥梁景观等角度做出选择^[1]。

菱湖大桥选用了传统的竖直吊杆、平行索面。

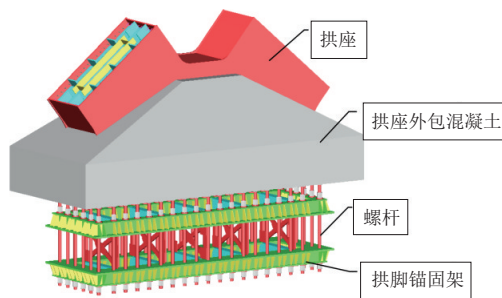


图11 拱脚节点三维示意图

设计吊杆顺桥向间距为7.5 m。采用标准强度1 860 MPa 高强镀锌平行钢丝吊杆,每个吊点处设置横桥向双吊杆,双吊杆横桥向中心间距0.7 m,吊杆上下锚头均采用叉耳式锚具。

在吊杆上锚固点位置,拱肋弦杆、腹杆的内侧竖向板设计为整板、并延伸至拱肋外部形成耳板结构,避免了额外设置吊杆箱、造成构件交织。锚固构造简单、安全可靠,见图12。

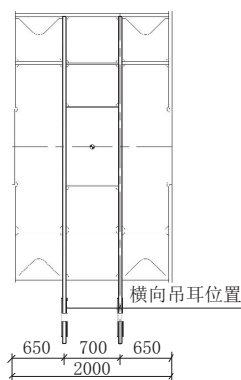


图12 拱上锚固构造示意图(单位:mm)

4.5 系杆设计

对于系杆拱桥,系杆的设计是关键,要充分考虑系杆与拱肋的连接构造及全桥的受力问题^[4]。本项目设计时对于系杆设置,主要基于以下原则:简化锚固构造、提高安全度。在此原则下,比选了柔性系杆和刚性系杆的优缺点,为尽可能的简化构造,优先选择刚性系杆,结构受力无法满足的情况下,再考虑设置柔性系杆。其次,设置柔性系杆时,对系杆设于纵向系梁内还是设置于桥面上也做了充分的比选。由于本项目纵向系梁箱室狭小(2×1.8 m),若将柔性系杆设于箱室内,则系杆锚固构造复杂,且会影响箱室内的可通可达。

因此,经过大量的计算和锚固节点比选,最终采用了边跨刚性系杆、主跨柔性系杆的组合系杆方案,柔性系杆设置于桥面拱区。

系杆采用15孔可调可换索式系杆,采用环氧喷涂无粘结钢绞线成品索。系杆分别锚固在P5/P6墩

中跨及边跨拱腿锚块处,见图13。

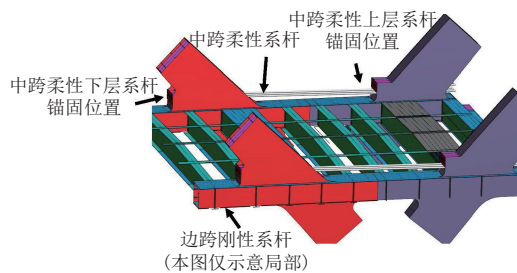


图13 系杆锚固区示意

5 结构分析

菱湖大桥采用空间有限元软件MIDAS Civil进行静、动力分析。主梁离散为纵梁和横梁组成纵横梁格模型进行计算分析,拱肋离散为弦杆、腹杆组成桁架结构进行计算分析。

结构分析涵盖了:主梁和拱肋的刚度验算;主梁、拱肋、吊杆、系杆等结构的承载能力及疲劳验算;拱肋的稳定分析;吊杆断索工况分析;下部基础验算;全桥抗震计算分析^[2]。

经过计算分析,菱湖大桥各项计算结果均满足规范要求。

6 施工方案

桥位处运河区航运繁忙,水上交通组织难度大。为保证主桥施工尽可能减小对航道的影响,经与相关方沟通后确定:主跨拱肋为船运浮吊少支架拼装方案,先拱后梁法施工;边跨可支架施工,先梁后拱。

主跨合龙段拱肋长101.3 m,最大吊装重量530 t,是京杭运河上单次吊装长度最长、重量最大的钢桁架合龙拱节段。主拱吊装见图14。



图14 主拱吊装

7 结 语

菱湖大桥结合地形、通航、防洪、城市规划等建设特点,最终采用了三跨中承式系杆拱桥,该桥目前是无锡市内最大跨径的市政景观桥梁。

(下转第86页)