

曲线外倾异形拱桥结构与关键节点设计

武占科

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 景观桥梁除了能够满足人群出行的基本需求, 还是城市中的地标性建筑。针对曲线外倾异形拱桥的受力特点, 从总体的造型和受力模式、约束条件的设计、合理断面的选取、吊杆力的取用等角度, 对影响其造型和受力的各项关键因素进行了分析, 并结合某工程进行结构设计分析, 有关经验可供相关专业人员参考。

关键词: 景观人行桥; 曲线外倾异形拱; 设计理论; 结构设计

中图分类号: U448.11

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)03-0001-05

Design of Structure and Key Node of Curved Outward-inclined Special-shaped Arch Bridge

WU Zhanke

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

Abstract: In addition to meeting the basic needs of people's travel, the landscape bridges are also landmarks in cities. According to the force characteristics of curved outward-inclined special-shaped arch bridges, from the perspective of the overall shape and force mode, the design of constraints, the selection of reasonable sections, and the use of boom force, the key factors affecting the shape and force of bridges are analyzed, and combined with a project, the structural design is analyzed. The relevant experience can be used as a reference for relevant professionals.

Keywords: landscape pedestrian bridge; curved outward-inclined special-shaped arch; design theory; structural design

0 引言

随着社会的发展和城市的进步, 滨水区往往是城市核心功能的承载区, 呈现出高度开放共享、引领生活方式的趋势, 同时也是高密度城区中亲和自然、休憩运动的文明示范带。城市景观桥梁除能够满足人群出行的基本需求, 同时, 因其荷载较小、跨度适中等特点, 结合其地理位置及周边环境, 还能够打造出“令人赞叹、流连忘返”的地标性建筑, 能够较好地改善沿岸的生活功能, 增强文化辐射力, 修复生态环境, 满足人民对滨水公共活动的需求。

1 曲线外倾异形拱桥关键节点设计理论

曲线外倾异形拱桥不同于传统力学模式的常规结构, 其外观造型和受力特点关系紧密, 需要对其传力路径和受力特点进行分析, 以寻找外观和受力的最佳结合。

1.1 主拱和吊杆的倾斜角度

倾斜的主拱主要承担两部分荷载, 一是拱肋的自重, 二是吊杆传递过来的主梁自重及活载。拱肋自重垂直向下, 由于拱肋外倾, 产生的横桥向力矩使拱向外倾覆^[1]。如图1所示, 为了抵抗主拱的倾覆力矩, 吊杆面须设置在拱面内侧, 吊杆力的竖向分力等于桥面的竖向荷载, 水平分力 $T\cos(\alpha)$ 大于主拱水平分力 H 时, 两者之差产生的力矩 $[T\cos(\alpha) - H]f$ 帮助拱肋向竖直方向回复。因此, 适当增大吊杆和主拱的夹角, 增加吊杆力, 能够提高主拱的抗倾覆力矩。

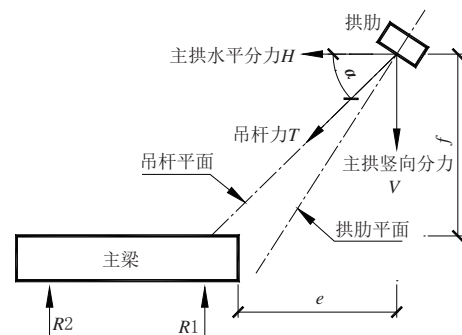


图1 外倾拱桥受力模式示意图

1.2 主梁平面布置

由于主拱外倾, 不但降低了其对主梁的竖向支

收稿日期: 2024-03-13

作者简介: 武占科(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

承效率,还使吊杆对主梁产生了较大的水平向分力,产生横向弯曲。为了抵抗水平力,设计上往往将桥面弯曲,形成平面拱。平面曲率越小,主梁在水平面类似于受弯梁,以面内受弯为主;反之,平面曲率增大,主梁在水平面趋近于主拱受力。

1.3 主梁断面布置

为了使主拱-主梁体系协调受力,主梁需要具有很大的横向抗弯刚度和抗扭刚度。如果主梁在斜向吊杆力的作用下发生侧向挠曲和扭转,吊杆给拱肋施加的回复力将降低,拱肋就会倾覆。另外,主梁承担的扭矩传递到两侧的桥墩,拱肋倾斜一侧的支座反力增加,而另一侧的支座反力则减小,甚至出现负反力,因此主梁往往采用抗扭刚度大的箱型截面。由于吊索锚固在截面的一端,主梁可以采用非对称结构和其他构造措施,以使主梁的重心尽量靠近张拉吊杆的一侧,减小扭矩,见图2。

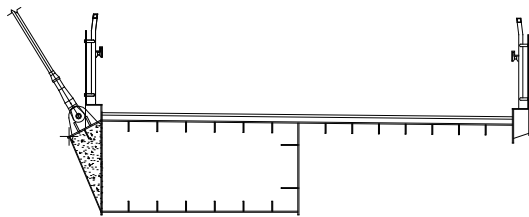


图2 非对称箱型主梁断面示意图

1.4 主桥约束体系

主梁的支座需要考虑抵抗主梁产生的较大的扭矩。由于主梁平面弯曲布置并受到吊杆的水平向分力,主梁会同时出现纵向和水平向位移,边墩支座应提供足够的抗剪能力,以保证结构体系的可靠。

拱与主梁交界位置须安装水平受压支座,以抵抗主拱的转动。

1.5 吊杆力取用

吊杆力应以平衡主拱和主梁的受力为目标。增加吊杆力对主拱的抗倾覆有利,但对主梁的水平弯曲变形不利,会引起支撑处较大的水平力;反之,减小吊杆力对主拱抗倾覆不利,但能减小支撑处的水平力。

1.6 主墩承台

对于有推力拱,需要充分考虑基础水平位移对结构受力的影响。主拱和拱座的连接须可靠。

综上所述,为了利用主梁平衡拱肋的侧倾力,可以采用以下几项结构措施。

(1)结合道路线形,将主梁设计成弯向拱对面的平面曲线形,形成平面拱,抵抗吊杆传递给主梁巨大的水平力。

(2)增大吊杆面和拱面的夹角,加大吊杆对拱肋

侧倾的回复力。

(3)设置复杂的支承系统,可通过在主梁两端设置拉压支座,抵抗吊杆在主梁侧边张拉产生的扭矩,并提供较大的抗剪承载能力;拱与主梁交界位置安装水平受压支座,防止拱平面的竖向转动。

(4)主梁采用抗扭能力强的箱型梁。

(5)合理取用吊杆力。

2 工程概况

某滨河栈道位于城市滨水核心区,具有较高的景观要求,主桥采用曲线主梁和外倾式异形拱桥的景观造型,效果图见图3^[3]。



图3 桥梁方案效果图

3 主桥结构设计

3.1 主要设计标准

功能与等级:园路主路,满足漫步与跑步人行功能。

设计荷载:人群荷载按《公园设计规范》(GB 51192—2016)取用,取值4.5 kPa。

设计安全等级:一级,重要性系数为1.1。

耐久性的基本要求:混凝土结构按环境类别I-C设计。

抗震设计标准:地震基本烈度为7度,抗震措施按7度设防;桥梁抗震设防分类为丁类,抗震设计方法为B类。

自振频率:上部结构竖向自振频率 ≥ 3 Hz;当不满足此条件时需进行专项分析研究后增加相应措施。

3.2 结构设计

3.2.1 总体设计

主桥采用钢结构单索面曲线外倾拱桥。受用地范围影响,主梁位于半径303.25 m的圆曲线上,平面曲率较小。主拱两拱脚连线距离为62 m,斜立面矢高为17.072 m,投影面矢跨比约1/3.63,拱肋与铅垂面呈 20° 外倾角。每个主跨设9根吊杆,梁上吊点顺桥向布置间距为5 m。

主桥跨径布置为16.5 m+62.7 m+16.5 m=95.7 m;

横断面布置为:0.4 m(风嘴+栏杆)+5 m(慢行道)+0.2 m(栏杆)=5.6 m。桥梁基础采用钻孔灌注桩,其

中主墩桩径1.2 m。总图布置见图4至图6。

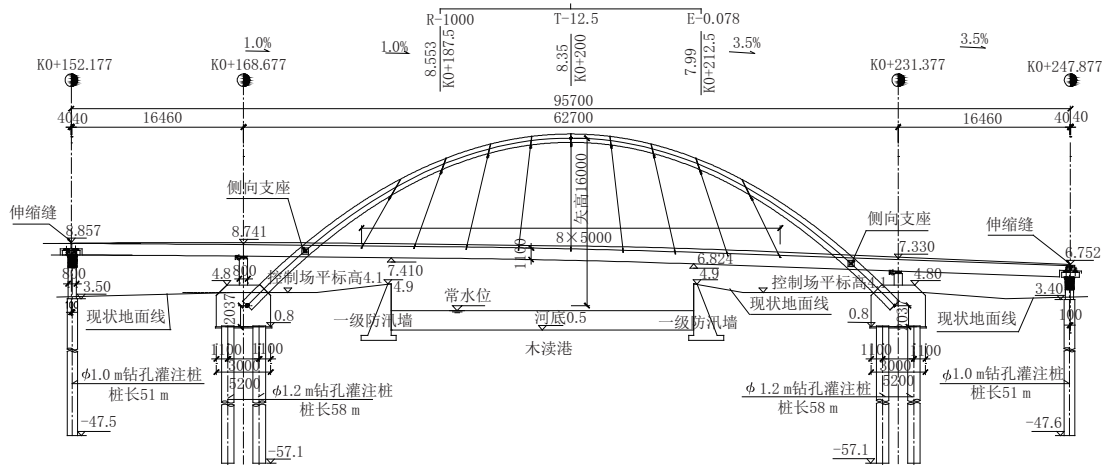


图4 桥梁立面布置图(单位:mm)

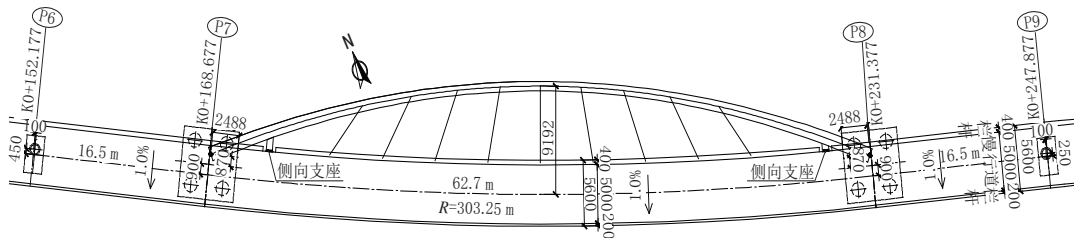


图5 桥梁平面布置图(单位:mm)

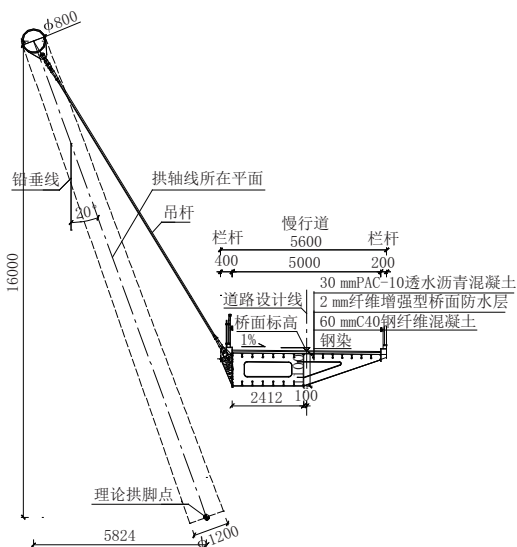


图6 桥梁断面布置图(单位:mm)

3.2.2 主梁

为了抵抗主梁的扭矩,主梁采用非对称断面,并在吊杆侧设置混凝土填芯,使得主梁重心靠近吊杆。为了达到较好的景观效果,非吊杆侧采用较大的悬臂,梁高也尽量纤薄。

主梁采用单箱单室钢箱梁断面,梁高1.1 m,箱梁箱室宽2.4 m,箱室一侧带2.6 m宽挑臂,吊杆侧带风嘴,主跨吊杆区吊耳焊接于边腹板上。主梁拉索区每隔1.25 m左右设置一道横隔板,靠近桥墩处加

密至1.25~1.5 m。

3.2.3 主拱

拱肋截面采用圆形钢管,板厚35 mm,拱肋直径沿轴线变化,拱顶钢管外径为800 mm,拱底钢管外径为1 200 mm。拱脚处设钢混结合段,将拱肋固结于承台内部,预埋管与主拱节段采用焊接对接接头。预埋深度大于1.5倍主管直径,预埋钢管底部设置承压板,其下设置不少于3层钢筋网,在钢管周边设置分布环向钢筋和焊钉等锚固构造。承压板与管壁间设置带孔加劲肋板。

主拱与主梁相交处设置水平安装的球钢支座。

3.2.4 吊杆

吊杆采用平行钢丝成品索,镀层采用锌铝合金镀层,安全系数2.5。吊杆在拱肋及主梁上均采用耳板的形式连接,锚具为冷铸锚具,在梁端进行调节。吊杆力采用刚性支撑法确定。

3.2.5 主墩

主墩采用群桩基础,承台平面尺寸为6.0 m(横桥向)×5.2 m(顺桥向),每个承台下设4根φ1.2 m钻孔灌注桩,以提供较大的水平刚度。受景观和施工条件影响,主拱和主墩结合处采用了主拱埋在承台内的方式。主墩承台大样见图7。

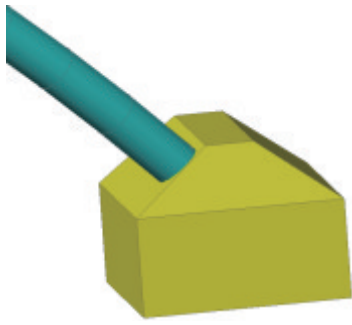


图7 主墩承台大样

4 结构计算分析

采用MIDAS Civil空间有限元程序,建立三维模型对主桥进行总体静力计算、屈曲稳定性分析及动力特性分析。主梁和主拱采用梁单元,吊杆采用桁架单元模拟。桥梁下部基础采用“m”法计算出土弹簧刚度以模拟桩土之间的作用。计算模型见图8。

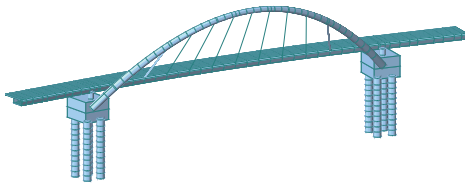


图8 桥梁整体计算模型

4.1 总体静力计算

在基本组合下,主梁最大拉应力128 MPa,最大压应力147 MPa(见图9)。主拱最大拉应力118 MPa,最大压应力193 MPa,最大压应力出现在拱脚附近(见图10)。考虑有效分布宽度、稳定折减后,主梁和主拱的应力状况满足规范要求。拉杆最大拉应力650 MPa,安全系数2.72(见图11)。

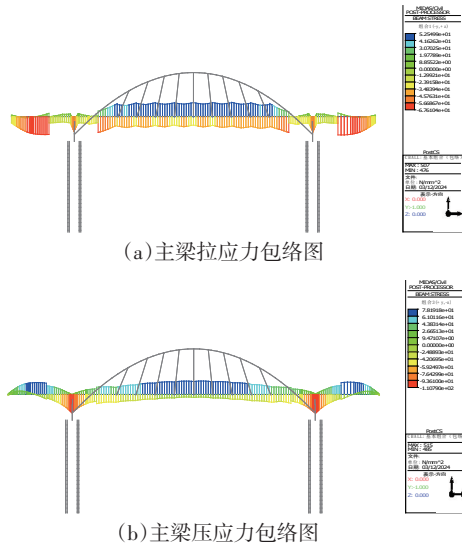
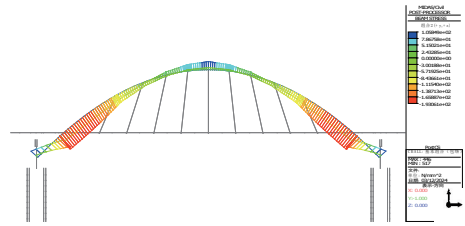
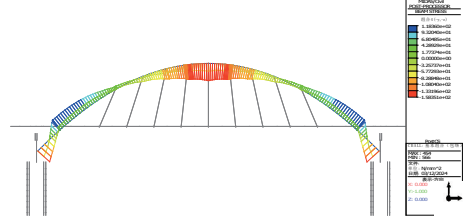


图9 基本组合下主梁正应力包络图(单位:N·mm)



(a)主拱拉应力包络图



(b)主拱压应力包络图

图10 基本组合下主拱正应力包络图(单位:N·mm)

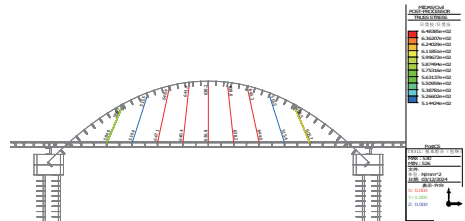


图11 基本组合下吊杆正应力包络图(单位:N·mm)

4.2 屈曲稳定性分析

对使用阶段桥梁进行稳定分析(恒+活+风均为变量),使用阶段前2阶稳定系数见表1和图12、图13。

表1 使用阶段主要组合前2阶失稳模态稳定系数

阶数	稳定系数	失稳形态
K1	18.6	主梁竖弯+平弯,拱肋面外弯曲
K2	20.4	主梁竖弯,拱肋面外扭转



图12 K1阶失稳模态



图13 K2阶失稳模态

4.3 动力特性分析

结构动力特性分析采用 Lanczos 算法,主要模态基本信息见表2。

表2 主要模态基本信息

序号	频率/Hz	周期/s	振型描述
1	1.013	0.987	拱肋横桥向振动
2	1.747	0.573	主跨主梁竖向+横桥向振动
3	2.465	0.406	拱梁竖弯振动
4	2.536	0.394	拱肋横桥向振动
5	2.655	0.377	拱梁横桥向振动+扭转
6	3.319	0.301	复合振动
7	4.024	0.249	复合振动

根据结构动力特性分析结果,人行桥的竖向自振出现了小于3 Hz的模态,须进行人行舒适性研究。

4.4 人行舒适性分析

根据评价结果,高密度人群状况下结构最低舒适性类别为CL4,最低舒适性评价为不可接受。横桥向行人荷载作用下,步行区横桥向对应的舒适性类别为CL1,舒适性评价为最好。漫步型竖向行人荷载作用下,步行区竖向对应的舒适性类别为CL3,舒适性评价为偏低;横桥向对应的舒适性类别为CL4,舒适性评价为不可接受。慢跑型竖向行人荷载作用下,步行区竖向对应的舒适性类别为CL1,舒适性评价为最好;横桥向对应的舒适性类别为CL1,舒适性评价为最好。

综合考虑经济性、阻尼器的重量影响,以CL2级舒适度作为控制目标,每座主桥设置8×0.5 t的TMD, TMD布置平面见图14。

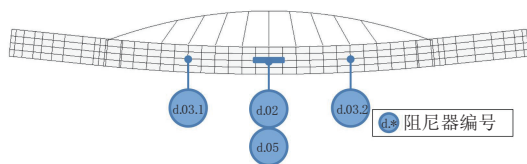


图14 TMD布置平面图

4.5 主墩分析

主墩进行了主拱承压板下混凝土抗冲切、基础水平位移、桩基反力及承载能力等计算,均满足规范要求。

5 结语

异形拱桥造型多变,除了承担交通功能,还可以成为地标性建筑,往往应用于城市景观桥梁。本文首先分析了曲线外倾异形拱桥的受力特点,从总体的造型和受力模式、约束条件的设计、合理断面的选取、吊杆力的取用等角度,对影响其造型和受力的各项关键因素进行了分析,并结合某滨河栈道主桥的景观造型要求,采取合理的受力体系和构造措施,取得了较好的设计效果。

参考文献:

- [1] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 2版. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [2] 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司. 上海市木渎港栈道贯通整治工程施工图设计[Z]. 上海: 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 2024.
- [3] 同济大学. 木渎港栈道贯通整治工程桥梁主桥抗风性能及人致振动舒适性评估研究[R]. 上海: 同济大学, 2023.
- [4] 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.
- [5] 晋杰桢. 城市景观人行空间异形拱桥总体设计[J]. 城市道桥与防洪, 2015(6): 77-80.

《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: roadfloodbridge@163.com

