

四拱肋无风撑系杆拱桥总体设计

陈富强

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 系杆拱桥是欧洲常用的一种结构体系,因具有受力合理、用材经济、施工方便、造型优美等优点,近年来在我国得到广泛应用。四拱肋无风撑系杆拱桥造型更加丰富,景观效果极佳,但受力也较常规系杆拱桥更加复杂。以采用四拱肋无风撑系杆拱桥方案的珠海市斗门区幸福河拱桥为工程背景,建立有限元模型进行计算,对拱轴线、矢跨比、拱间连接形式、施工顺序等关键参数进行了分析比选,综合考虑结构受力及景观效果后,最终选定了该桥的合理设计方案。相关研究和设计成果可为今后同类桥型设计提供借鉴。

关键词: 四拱肋;无风撑;系杆拱桥;有限元;参数分析

中图分类号: U448.22

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)07-0074-04

0 引言

传统的拱桥主要以推力拱为主。推力拱属于简单体系拱桥,常以单孔形式跨越山谷,主要用于上承式拱桥和中承式拱桥,以上承式拱桥居多。系杆拱桥属于无推力拱体系,也是最常用和最有代表性的桥型。系杆拱桥在荷载作用下,拱脚的水平分力由系杆承担,对下部基础不产生水平推力,基础仅承担竖向反力。这种无推力的体系使得系杆拱桥可以不受软土地基条件的限制,在平原地区得到广泛应用。特别是在建筑高度受到限制的条件下,更能展示系杆拱桥的技术经济优势^[1]。

无风撑系杆拱桥由于取消了风撑,使得桥上建筑更为简洁通透,行车视野更加开阔,行车无压抑感,整体景观效果也更优,非常适用于中小跨径的系杆拱桥。周兴林^[2]对超宽、无风撑钢箱拱肋系杆拱桥的稳定性进行了分析并得出结论:无风撑系杆拱桥造型美观,用于中小跨径时,其美学、强度、稳定性等均可以满足要求。张元凯等^[3]对三拱肋无风撑系杆拱桥进行了计算分析和实桥荷载试验后得出结论:三拱肋无风撑系杆拱桥受力合理、经济美观、造型多变,可以很好地适应各种环境。

鉴于此,本文对采用了四拱肋无风撑系杆拱桥方案的珠海市幸福河拱桥的关键技术参数进行了分

析比选,以期今后此类桥梁的设计提供参考。

1 工程概况

1.1 工程简介

湖滨二路一期市政道路工程位于珠海市斗门区白藤片区,道路呈西北—东南走向,东北侧毗邻友谊河。本项目桥梁上跨现状幸福河,根据规划资料,桥位处友谊河对岸为规划金融岛,桥位东侧为规划亲水景观公园,桥梁周边区块定位较高,因此对桥梁的景观需求很高。

本工程桥梁为跨度 70 m 的单跨四拱肋无风撑系杆拱桥,桥梁面积为 2 500.6 m²。

1.2 技术标准

道路等级:城市主干路。

设计车速:50 km/h。

荷载等级:城-A 级。

防撞等级:SA 级。

通航标准:内河Ⅷ级航道。

设计水位:2.42 m($P=1/50$)。

环境类别:I 类,环境作用等级为 B、C 级。

2 设计方案

2.1 景观方案

城市桥梁是城市现代化的标志之一,随着时代的发展,对于城市桥梁的景观要求越来越高。设计方案时要关注功能性和经济性,注重细节构造,力求将功能与艺术景观紧密结合,打造城市新地标。

收稿日期:2023-09-14

作者简介:陈富强(1990—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

桥梁跨越幸福河，目前桥位附近已有规划沿河景观公园，周边定位高端，已有较多高档小区，景观要求较高。

图1为桥梁景观方案效果图，景观概念为“双翅腾飞”。此方案灵感来源于飞鸟，将飞鸟的双翅融入到桥梁的设计中。桥梁两侧设计的拱肋宛如飞鸟的翅膀，微微张开，蓄势腾飞，寓意珠海斗门区的腾飞和发展。



图1 桥梁景观方案效果图

拱肋间的横梁设计成绿叶造型，均匀排列，富有韵律感，体现了绿色生态的特点。在阳光的照耀下，拱肋的横梁洒下斑驳的光影，塑造了独特的桥梁空间。

2.2 结构特点

系杆拱桥的系杆、拱肋、吊杆等主要构件可以根据需要进行调整，组合出各种不同的布置形式，结构形式灵活多变。根据拱和系梁相对刚度的不同，系杆拱桥的结构体系主要分为柔性系杆刚性拱、刚性系杆柔性拱、刚性系杆刚性拱3种。本桥为景观桥梁，为提升景观效果，拱肋宜尽量纤细轻巧，并与梁高相协调，故此选择刚性系杆刚性拱结构体系^[1]。

幸福河拱桥为四拱肋无风撑系杆拱桥，桥面两侧各设置主、副拱1对，每侧的主、副拱之间以横撑连接，两侧主拱之间不设置风撑。取消风撑使桥面更加通透，行车视野更开阔。

结构中无柔性系杆，拱脚水平力由系梁承担。拱肋为六边形钢箱拱，系梁为四边形钢箱梁，主梁为纵横梁体系，桥面为正交异性桥面板。拱肋、主梁、系梁均为钢结构，具有自重轻、强度高、加工精度高的优点，可以适应较为复杂的构造样式和线形。

桥梁跨度为70 m，桥面宽度为30.6~39.8 m。桥面布置为双向4车道机动车道加上两侧各宽3 m的人行道。人行道与机动车道分离，中间为索区及挑臂镂空区域，既增加了安全性，又提高了桥梁的景观效果，同时可以提升行人的观景体验。桥梁立面图、横

断面图如图2、图3所示。

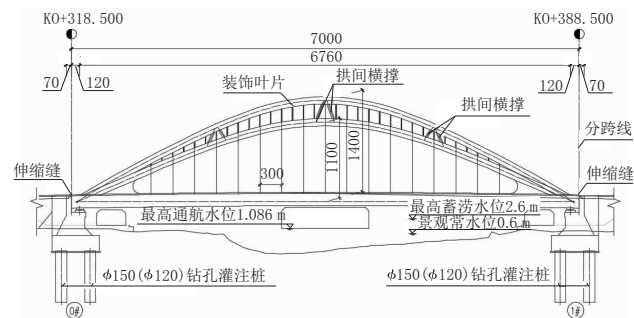


图2 桥梁立面图(单位:cm)

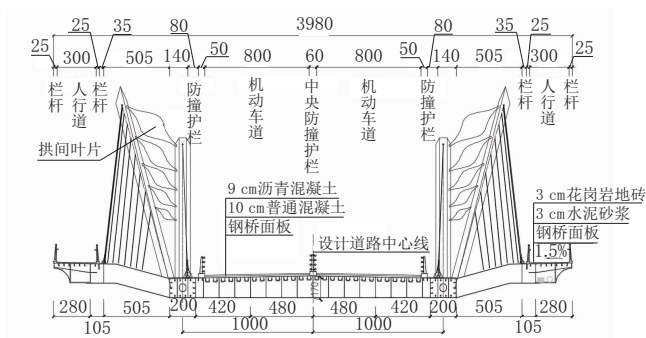


图3 桥梁横断面图(单位:cm)

2.3 总体设计

幸福河拱桥主梁采用纵横梁体系，桥面设2%的双向横坡，梁底水平，横向中心位置处梁高1.7 m。主梁钢材采用Q345qC、Q420qC和Q355C，在有Z向受力的区域，采用Q345qCZ25。

桥面结构由钢箱系梁，工字型截面纵、横梁和人行道梁组成。系梁顶底板厚度为20~30 mm，系梁腹板厚度为20 mm；车行道顶板厚度为16~28 mm；纵横梁下翼缘厚度为20~28 mm，纵横梁腹板板厚为16 mm。钢纵梁间距为4.8 m，钢横梁间距为3 m。人行道钢梁顶板厚度为12~16 mm，底板厚度为20 mm，人行道钢梁腹板厚度为20 mm，人行道挑臂间距为3 m。

幸福河拱桥共设置2对拱肋，分别为主拱和副拱。主拱拱高为11 m，矢跨比为1/6.22；副拱拱高为14 m，矢跨比为1/4.9，副拱向外倾斜15°。主拱拱肋为正六边形断面，高1.0 m，宽1.154 m；主拱拱肋板厚为30~35 mm，拱脚处局部加强。副拱拱肋主要断面为正六边形，拱脚部分区域渐变收窄，拱肋高1.0 m，宽0.866 m；副拱拱肋板厚为20~25 mm，拱脚处局部加强。主拱与副拱间采用斜撑和装饰叶片连接。

幸福河拱桥吊杆采用平行钢丝成品索。吊杆分为主吊杆和副吊杆，纵桥向间距均为3 m。吊杆两端均采用销接式与拱肋和钢梁相连，吊杆锚具为热铸锚具，可在梁端进行调节。

下部结构采用现浇重力式异形桥台,台身采用 C35 钢筋混凝土,桩基采用 4 根 $\phi 1.5$ m 和 12 根 $\phi 1.2$ m 的钻孔灌注桩。

3 设计分析

3.1 有限元模型

利用有限元分析软件 MIDAS Civil 2020 建立幸福河拱桥的全桥空间有限元模型,模型中使用空间梁单元模拟拱肋、系梁及纵横梁等构件;使用仅受拉桁架单元来模拟吊杆。全桥有限元计算模型见图 4。

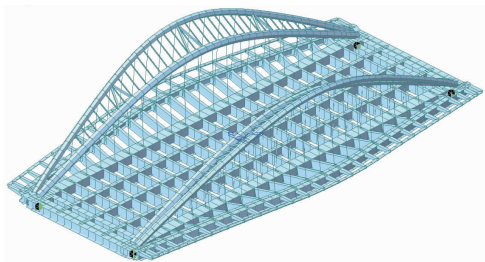


图 4 全桥有限元计算模型

3.2 拱轴线

拱轴线的形状会影响到拱肋的内力分布,是拱桥设计中的关键参数之一。拱桥结构设计时,常用的拱轴线线形有圆曲线、抛物线、悬链线等,每种线形都是对应特定荷载分布模式的合理拱轴线^[4]。

幸福河拱桥采用刚性系杆刚性拱体系,拱肋刚度与系梁刚度相近,荷载由拱肋和系梁共同承担,拱肋的合理拱轴线会随拱肋受力情况的改变而发生变化。为了保证景观效果,本桥拱轴线未采用常规轴线,而是由空间多段线拟合成光滑曲线。

3.3 矢跨比

拱桥的矢跨比越大,桥梁的刚度越大;矢跨比越小,桥梁的刚度越小。常规系杆拱桥的合理矢跨比通常介于 1/5~1/7 之间^[1]。

为了研究拱肋矢跨比对结构体系稳定性的具体影响,分别对主、副拱肋的矢跨比进行调整。分析主拱矢跨比产生的影响时,保持副拱矢跨比固定。选取的主拱矢跨比分别为:1/7.78、1/7.32、1/6.91、1/6.55、1/6.22、1/5.93、1/5.66、1/5.41、1/5.19、1/4.8。当副拱矢跨比保持 1/4.9 不变时,桥梁结构的稳定系数随着主拱矢跨比的变化如图 5 所示。

由图 5 可见,当副拱矢跨比保持 1/4.9 不变时,桥梁结构的稳定系数随着主拱矢跨比的增大而增大。原因主要有 2 个:(1)矢跨比增大导致拱肋压力降低,结构趋于稳定;(2)副拱高于主拱,当副拱矢跨比保持不变时,随着主拱矢跨比的增大,主拱与副拱间

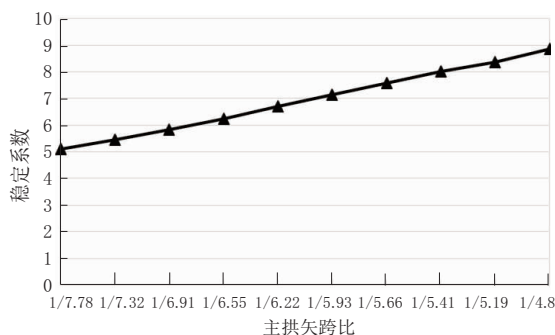


图 5 主拱矢跨比变化对桥梁结构稳定系数的影响
(副拱矢跨比 1/4.9)

的距离变小,主副拱间的横撑变短,主副拱肋形成整体,从而使结构的整体刚度提高,结构稳定系数增大。

分析副拱矢跨比产生的影响时,保持主拱矢跨比固定。选取的副拱矢跨比分别为:1/7、1/6.11、1/5.75、1/5.43、1/5.15、1/4.9、1/4.66、1/4.45、1/4.25、1/4。当主拱矢跨比保持 1/6.22 不变时,桥梁结构的稳定系数随着副拱矢跨比的变化如图 6 所示。

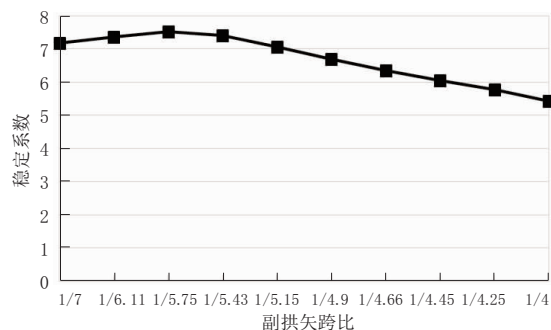


图 6 副拱矢跨比变化对桥梁结构稳定系数的影响
(主拱矢跨比 1/6.22)

由图 6 可见,当主拱矢跨比保持 1/6.22 不变时,桥梁结构的稳定系数随着副拱矢跨比的逐步增大先增大后减小。主要原因是随着副拱矢跨比的增大,主副拱间的横撑先变短再变长,主副拱间的联系刚度先增大再降低,进而导致面外稳定系数先增大再减小。

对于系杆拱桥设计,矢跨比设计至关重要。一方面,拱肋矢跨比过小,拱脚会产生很大的水平分力,导致主拱产生较大的弯矩,进而使得拱桥设计和施工复杂;另一方面,拱肋矢跨比过大则材料用量增大,且不利于安装施工,景观效果也会变差。因此矢跨比宜保持在合理的范围。

幸福河拱桥是景观桥梁,主拱及副拱的矢跨比需根据景观方案,优先考虑景观效果,在合理范围内取值。结合不同矢跨比的景观效果图及计算结果,选定主拱矢跨比为 1/6.22,副拱矢跨比为 1/4.9。

3.4 拱肋间连接

本桥两侧主拱之间未设置风撑,主拱与副拱间

设置横撑,使主、副拱共同受力。在荷载作用下,主、副拱之间的变形并不同步,导致拱间横撑端部的弯矩较大。横撑的布置形式和连接类型对桥梁整体稳定和横撑自身应力会有影响。本桥主要考虑 3 种连接形式进行对比,如图 7 所示。

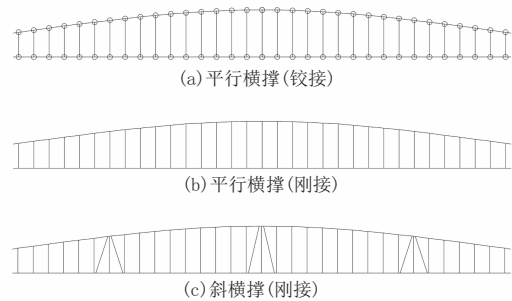


图 7 主副拱间横撑布置形式

根据连接形式的不同,建立不同的有限元模型进行计算,计算结果对比见表 1。

表 1 拱间连接形式影响结果对比表

拱间连接形式	整体稳定系数	横撑应力最大值基本组合 /MPa
平行横撑(铰接)	3.9	33
平行横撑(刚接)	5.1	396
斜横撑(刚接)	6.7	202

由表 1 可知,横撑与拱肋间的连接形式若采用铰接,则可以释放端部弯矩,降低应力,但采用铰接形式时,无法满足规范的稳定性要求^[5],需采用刚接形式。若采用刚接平行横撑形式,则横撑应力超标,而采用刚接斜横撑形式可以降低横撑应力峰值,满足要求。综合考虑稳定性及应力情况,采用斜横撑形式为最佳方案。

3.5 施工顺序

主拱、副拱及拉索的安装顺序对横撑的应力有重要影响。考虑 3 种施工顺序,对应 3 种工况:

- 工况 1:主、副拱同时安装并张拉吊杆。
- 工况 2:主拱先安装,副拱和横撑最后安装。

工况 3:主、副拱同时安装,副吊杆最后张拉。
对有限元模型计算结果进行对比分析,结果见表 2。

表 2 施工顺序影响结果对比表

施工顺序	横撑应力最大值基本组合 /MPa
工况 1	282
工况 2	186
工况 3	202

由表 2 可知:工况 1 时主、副拱恒载下相对变形较大,导致连接处局部弯矩较大,横撑应力超标;工况 2 时主拱承担全部恒载,副拱和横撑只承担活载,可以减小横撑应力,但主拱变形后再安装副拱和横撑,安装定位较困难;工况 3 时既可以降低横撑应力,又减小了施工难度,在 3 种方案中是最佳方案。因此,选择工况 3 所对应的施工顺序作为桥梁最终施工顺序。

4 结 语

四拱肋无风撑系杆拱桥形态丰富多变,造型优美,景观效果好。通过有限元模型的计算,对拱轴线、矢跨比、拱间连接形式、施工顺序等关键参数进行了分析比选,确定了幸福河拱桥的合理设计方案。相关研究和设计成果可为今后同类桥型设计提供借鉴。

参考文献:

[1] 邵长宇.索承式组合结构桥梁[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.

[2] 周兴林.超宽、无风撑钢箱拱肋系杆拱桥稳定性分析[J].城市道桥与防洪,2018(5):110-112.

[3] 张元凯,肖汝诚.三拱肋无风撑系杆拱桥受力特点[J].公路交通科技,2004,21(11):52-54.

[4] 周浩.230 m 网状吊杆组合梁拱桥设计分析[J].城市道桥与防洪,2020(5):87-90.

[5] JTG/T D65-06—2015,公路钢管混凝土拱桥设计规范[S].北京:人民交通出版社,2015.

(上接第 65 页)

参考文献:

[1] 尚鹏远,孙小银.市政道路检查井病害及防治对策[J].汽车世界,2019(29):19.

[2] 肖志荣.市政道路检查井井盖安装施工新工艺[J].山西建筑,2020,46(12):103-105.

[3] 唐坤.市政道路检查井井盖安装施工新工艺思考[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023(5):119-122.