

宽幅反对称系杆拱桥力学性能分析与应用

唐勇¹, 席称心²

[1.上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092; 2.中山翠亨新区工程项目建设事务中心, 广东 中山 528455]

摘要: 随着桥梁景观要求的不断提高,系杆拱桥由于其造型适应性强、经济性好等特点而广泛应用,因此对相关类型桥梁的力学分析越来越重要。基于某宽幅反对称系杆拱桥,分别采用MIDAS、ABAQUS有限元软件对该桥进行全桥和局部计算,分析全桥结构强度、变形,并对拱梁结合段等关键构件进行局部分析。结果表明:全桥强度、变形和局部构件强度均满足规范设计要求。

关键词: 宽幅桥面;反对称系杆拱;拱梁结合段;有限元分析;力学性能

中图分类号: U448.22+5; U441; TU997 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-7716(2024)03-0049-04

0 引言

随着经济的发展与社会的进步,城市桥梁对景观的要求越来越高;系杆拱桥由于其造型适应性强、经济性好等特点,在工程中得到广泛应用。其中,反对称系杆拱桥造型优美、景观新颖,相比常规系杆拱桥,造型多变,受力更加复杂。

本文结合某实际工程案例,通过有限元方法建模分析结构整体受力性能,并对拱梁结合段等关键构件进行局部分析,分析结论为相关类型桥梁的设计和分析提供参考。

1 设计要点

1.1 总体布置

某桥梁采用(35+60+35)m跨径拱梁组合体系。桥梁总长132.32m,采用整幅设计,标准桥宽42m,景观平台加宽段桥宽为42~48m。桥面系采用纵横梁体系。拱肋采用主副拱设计,东、西侧拱肋各设11组吊杆,两侧拱肋结构呈反对称布置,主副拱拱肋间设工字钢连接,其底部均匀焊接多条薄钢板带。桥梁整体效果形似张开双翼的飞鸟,其立面和平面分别如图1和图2所示。

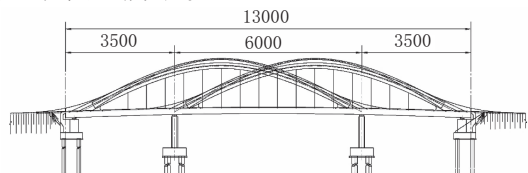


图1 桥梁立面图(单位:cm)

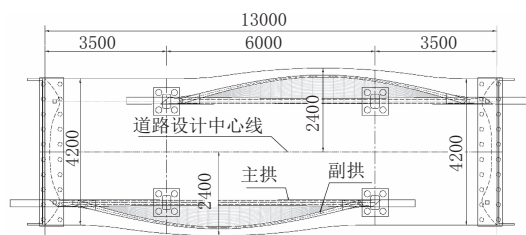


图2 桥梁平面图(单位:cm)

桥梁断面布置为:0~3 m(景观平台)+2.5 m(人行道)+2.5 m(非机动车道)+3 m(拉索区)+11.5 m(车行道)+3 m(中分带含防撞栏)+11.5 m(车行道)+3 m(拉索区)+2.5 m(非机动车道)+2.5 m(人行道)+0~3 m(景观平台)=42~48 m总宽,具体如图3所示。

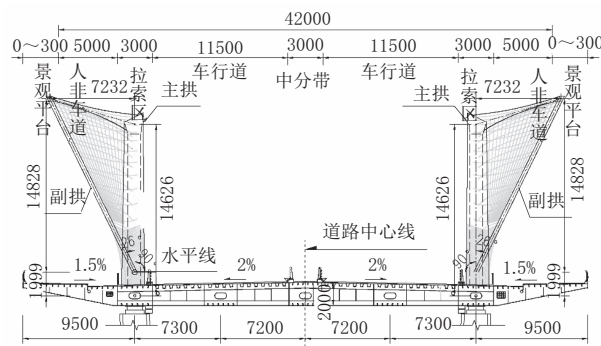


图3 中墩处断面(单位:mm)

1.2 主梁设计

主梁为全钢结构,采用Q345qC钢材。截面为多箱单室钢箱梁截面,钢箱梁顶板宽42~48m,系梁箱室宽度3.0m,主纵梁箱室宽度2.8m,钢主梁桥梁中心线处梁高2.0m,梁面设2%的双向横坡,钢梁底板水平布置。主梁内设横隔板,横隔板基本间距3m。桥面板为正交异性钢桥面板,为提高钢桥面耐久性,车行道设置了4.5cm STC组合桥面层。

收稿日期: 2023-01-13

作者简介: 唐勇(1995—),男,硕士,助理工程师,从事市政桥梁设计工作。

1.3 拱肋设计

该桥横向东、西侧各设一片拱肋,呈反对称布置于拉索及其外侧区段。拱肋采用主副拱设计,其中:主拱拱轴线为铅垂平面内样条曲线,采用异型变高钢箱截面,拱高由拱顶处截面 1.8 m 增加至拱脚处截面 2.8 m,主拱跨径 90 m,矢跨比为 1/6.15;副拱拱轴线位于铅垂平面外倾 26°所在平面,同样为样条曲线设计,采用变高平行四边形钢箱截面,拱高由拱顶 0.4 m 增加至拱脚 2 m,副拱跨径 82 m,铅垂矢高为 14.828 m,矢跨比为 1/5.53。考虑到副拱受力较小,为简化拱梁结合段构造,采用副拱直接与主拱拱脚段焊接的连接方式。

1.4 吊杆设计

本桥采用柔性吊杆体系,吊杆采用平行钢丝 PES 防腐索体,顺桥向布置间距 6 m,单侧共设置 11 组吊杆。根据计算,该桥吊杆型号为 PES7-61,采用型号与其配套的冷铸锚张拉,张拉端位于梁体一侧,锚固端位于拱肋一侧。

1.5 主副拱装饰设计

主副拱拱肋间设工字钢连接,工字钢间装饰采用多条薄钢板线条焊接而成,拱肋装饰及拱肋在工厂进行节段制作,现场拼装焊接连接。此外,主、副拱相接段设有空间曲面薄钢板包裹其外轮廓,人行视角类似“r”形的空间圆弧过渡,从而提升桥梁的整体弧线感。

2 全桥分析

2.1 模型建立

本文采用 MIDAS Civil 有限元软件建立全桥梁格模型,如图 4 所示。

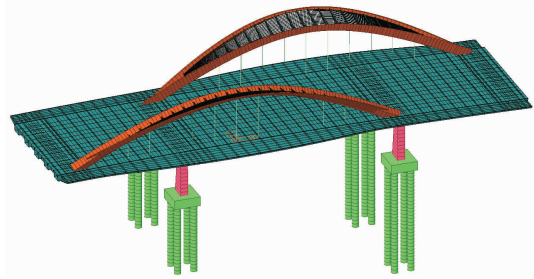


图 4 全桥计算模型

除吊杆采用桁架单元模拟外,其余构件均采用梁单元进行模拟。对于边界条件的设置:主拱拱脚与主梁相接位置采用弹性连接中的固定边界;中墩顶部与主梁相接位置采用弹性连接,各个方向刚度按实际情况输入;中墩承台与墩底、桩基按刚性连接固定其全部平动自由度与转动自由度;桩基段设置节

点弹性支撑模拟土弹簧,刚度由桩顶至桩底逐渐增大,具体数值通过规范^[1]计算获得;桥台侧支座采用一般支承连接并根据实际情况施加横向约束。

计算荷载主要考虑结构重力、汽车荷载、人群荷载、整体升降温、梯度升降温、构件局部升降、风荷载和基础不均匀沉降等。荷载工况主要包括:(1)恒荷载;(2)恒载与前述可变荷载的基本组合包络。

2.2 强度验算

桥梁整体结构应满足最不利荷载组合作用下,各构件的应力值不高于材料容许应力。通过受力分析可知,钢主梁桥面板承受的荷载部分通过吊杆传递至主拱拱肋,在吊杆传来的竖向力作用下,主拱主要产生轴力,轴力通过拱肋传递至拱脚处拱梁结合段,其中水平方向分力通过系梁平衡,竖向分力通过支座传至下部结构。此外,副拱自重主要通过连接件传至主拱,随着副拱拱高增加,拱脚处连接件承受较大荷载。因此,应重点关注上述构件关键截面应力。通过 MIDAS Civil 有限元软件进行全桥计算分析,得到下列关键截面在前述各种荷载及相应组合作用下应力,结果见表 1。其中,基本组合应力已考虑局部稳定与剪力滞的影响。

表 1 关键截面应力最大值						单位:MPa	
截面位置	恒载	汽车+人群荷载	整体升降温	梯度升降温	局部升降温	运营风	基本组合
中拱脚系梁	113	40	10	6	18	50	219
中跨跨中中纵梁	45	34	2	11	9	2	159
主拱中拱脚	89	28	10	6	12	50	183
拱脚连接件	97	27	9	2	10	41	218

注:除恒载外,其余可变荷载均取其包络值。

对于中拱脚位置的系梁与主拱拱肋,由于上部拱肋结构迎风面广,风荷载效应明显,恒载与运营风荷载下的应力贡献值占主要部分,对应截面在基本组合作用下的应力值分别为 219 MPa 和 183 MPa;对于中跨跨中处纵梁,汽车+人群荷载作用显著,应力值达到 34 MPa,其余温度荷载与风荷载影响较小;此外,拱脚中支点横梁与拱脚连接件应力值较高,拱脚连接件应力值在基本组合作用下高达 218 MPa,考虑将此处连接件加强为箱型截面,增加截面抗弯与抗扭刚度。可以看到,各构件的应力结果均满足规范要求^[2]。

2.3 变形验算

外荷载作用下,各构件存在一定变形,应按设计

规范验算其变形是否满足要求。选取中跨跨中段的中纵梁与外挑臂等两处最不利位置,得到各种荷载及相应组合作用下挠度最大值,见表 2。

表 2 关键截面挠度最大值							单位:mm
截面位置	恒载	汽车+人群荷载	整体升温	梯度升温	局部升温	运营风	基本组合
中跨跨中 中纵梁	72	29	10	2	10	1	170
中跨跨中 外挑臂	42	40	8	3	17	2	151

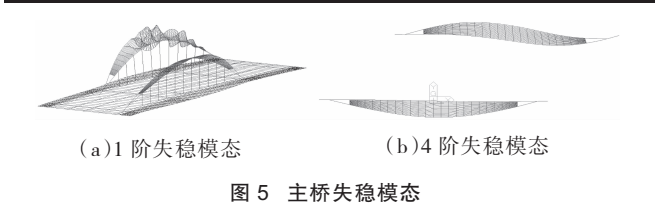
注:除恒载外,其余可变荷载均取其包络值。

根据表 2 数据可知,在各种恒载和可变荷载作用下,恒载与活载(汽车+人群荷载)占基本组合作用下挠度值的主要部分。其中,恒荷载可通过设预拱度抵消其影响,活载下的挠度体现了结构的刚度大小,在汽车+人群荷载作用下,中纵梁最大挠度 29 mm,挠跨比为 1/224 1;外挑臂最大挠度 40 mm,挠跨比为 1/162 5。

2.4 稳定计算

主拱在成桥阶段承受多种荷载共同作用,拱肋存在整体失稳问题,本节考虑恒载和活载共同作用下的最不利工况,对结构进行弹性屈曲分析,前四阶屈曲稳定结果见表 3,其中,第 1 阶和第 4 阶失稳模态如图 5(a)、(b)所示。

表 3 前 4 阶屈曲稳定系数		
阶数	稳定系数	失稳模态
1	4.725	副拱跨中面内失稳
2	5.074	副拱跨中面内失稳
3	5.311	副拱跨中面内失稳
4	5.603	主拱面外反对称失稳



根据上述屈曲稳定结果可知:

(1)主桥稳定系数最小值为 4.725,满足现行《公路钢管混凝土拱桥设计规范》(JTG/T D65-06—2015)^[3]大于 4 的要求。

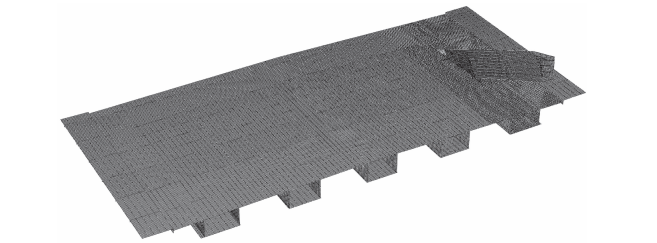
(2)副拱纵桥向与多个连接件固结连接,跨中段连接件跨度大,刚度小,故前三阶失稳模态均为跨中段副拱及连接件面内失稳。

(3)东、西侧主拱间未设横撑连接,主拱面外相对面内刚度小,故主拱先出现面外失稳。

3 拱梁结合段局部分析

3.1 局部模型建立

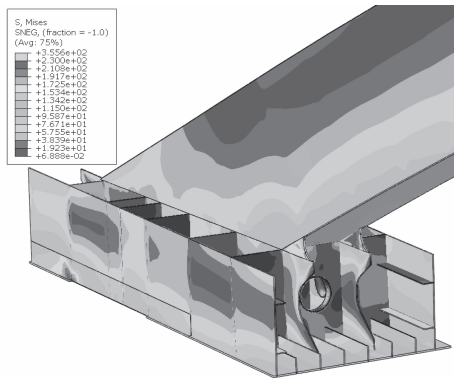
拱梁结合段作为主拱、系梁和横梁交汇点,受力复杂,其应力水平关系到整个结构的安全。为准确获取拱梁结合段受力状态,工程实践中普遍截取局部结构进行分析^[4-8]。根据圣维南原理,应力关注区域应远离边界设置区,故局部分析模型的尺寸不能过短。通常局部分析的结构长度不少于 2~3 倍结构高度。本节选取中墩位置的拱梁结合段进行局部分析。局部分析模型中,主梁纵向梁长 18.5 m,横梁取全长 42 m,主拱轴线长 12.5 m。采用 ABAQUS 有限元软件建立拱梁结合段局部分析模型。单元类型采用 S4R 四边形减缩积分壳单元(shell),钢材弹性模量为 2.06×10^6 MPa,泊松比为 0.31。拱梁结合段局部分析有限元模型如图 6 所示。需要指出,为提高计算效率,远离主拱与系梁交汇点外的主梁与桥面板对应加劲以及另一侧支座加劲和吊杆力等结构与荷载在模型中未考虑。



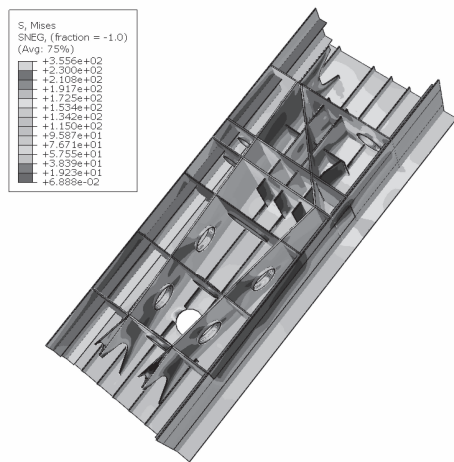
边界条件和加载方式的设置直接影响结果的准确性。对于拱梁结合段局部模型,边界条件一般有支座约束和支座加载两种^[6]。通过对比分析,本文采用支座加载进行模拟,即局部模型主拱断面一侧的主梁端部采用固定边界,约束其全部平动自由度与转动自由度;主梁另一端部通过耦合参考点至 5 根纵梁截面相应形心位置,施加整体模型对应截面内力,包络轴力、剪力、扭矩和弯矩等 6 个方向的内力;主拱同样提取整体模型内力施加至其断面耦合中心点位置;此外,对主梁底板两支座垫板施加铅垂方向的支反力,上述内力均选用基本组合作用下的内力值。网格划分方面,由于主要关注主拱与主梁、横梁交汇点区域板件,因此除该区域划分较密网格外,其余部分的网格尺寸相对稀疏,最终划分后的模型总单元个数为 129 402。

3.2 结果分析

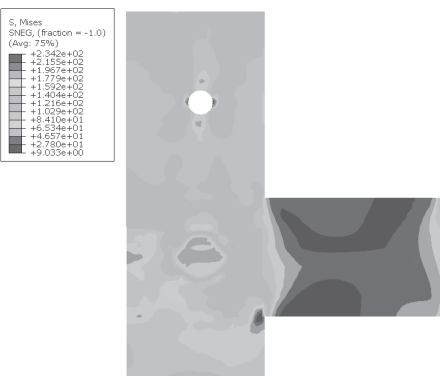
拱梁结合段各关键受力板件的 Mises 应力云图如 7 各图所示。



(a)主拱与主梁结合区域



(b)主梁内横隔板、腹板与支座加劲



(c)系梁与横梁交接处底板

图7 关键板件 Mises 应力(单位:MPa)

可以看到,在基本组合作用下,拱梁结合段内绝大部分板件应力在 230 MPa 以内,应力分布相对均匀,应力相对较高的板件主要集中在:(1)系梁内对齐主拱主板的结合段隔板;(2)支座垫板附近的系梁与横梁交界处底板;(3)主拱底部与梁内 U 型加劲对齐的圆弧加劲段。

结合段隔板直接承受主拱传来的荷载,荷载再

通过支座加劲传至下部结构,故此两处板件应力处于较高水平,但由于主拱底板截面尺寸较大,主拱传来的荷载可通过系梁内的对齐板件迅速扩散,应力大部分不超过 150 MPa。系梁和横梁交接处底板应力集中点主要分布在支座加劲附近的外围区域,与横梁相交点处的应力值达到 234 MPa,因实际图纸中此处设有圆弧段过渡,故其真实应力水平相对较低。此外,系梁底板过人孔洞处应力明显集中,因此,底板开孔位置应尽量远离支座加劲。对于主拱底部圆弧加劲,其应力水平超过 230 MPa,板件长度和厚度应考虑适当增加。

整体来看,除个别应力集中点外,拱梁结合段各板件应力值均小于规范设计值。

4 结 语

本文以某宽幅反对称系杆拱桥为工程背景,对其进行全桥和局部精细化受力分析,主要结论如下:

(1)在最不利荷载组合下,全桥最大应力为 219 MPa,位于中拱脚处系梁;活载下最大挠度为 40 mm,位于中跨跨中段外挑臂;整体强度和刚度均满足规范设计要求。

(2)跨中段副拱及连接件为关系全桥稳定的薄弱部位;东、西侧主拱未设横撑连接,主拱易出现面外失稳,但最小稳定系数大于规范设计值。

(3)拱梁结合段最不利位置主要位于系梁内对齐主拱主板的结合段隔板、系梁与横梁交界处底板以及主拱底部圆弧过渡段,其应力水平基本在 230 MPa 以内,整体应力分布相对均匀,传力较好。

参考文献:

- [1] JTG 3363—2019,公路桥涵地基与基础设计规范[S].
- [2] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [3] JTG/T D65—06—2015,公路钢管混凝土拱桥设计规范[S].
- [4] 杨剑,邹团结,汪金胜.梁拱组合拱桥拱脚局部应力分析和试验研究[J].铁道科学与工程学报,2014,11(6):25-29.
- [5] 赵安华.钢箱提篮拱桥拱脚过渡段局部应力研究[J].城市道桥与防洪,2017,5(5):108-111.
- [6] 王福春,梁力,李艳凤.下承式系杆拱桥拱脚局部应力有限元分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2011,27(2):281-285.
- [7] 谢肖礼,彭文立,秦荣,等.圣维南原理在钢管混凝土拱桥分析中的应用[J].中国公路学报,2001,14(2):33-35.