

宽幅下承式空间多索面异型系杆拱桥设计关键技术

董国鹏¹, 王良雷², 施镁华²

(1.中铁七局集团勘测设计研究院, 河南 郑州 450000; 2.上海安拓土木工程技术有限公司, 上海市 200433)

摘要: 以外秦淮河大桥为工程背景, 采用 Midas Civil 对该异型拱桥进行仿真模拟, 首先探讨了不同主梁刚度、拱肋刚度两个参数条件下的拱桥结构受力性能影响规律; 其次考虑异型拱桥结构最不利情况, 进行了强度、刚度验算分析; 另外计算了桥梁结构前五阶振型及自振频率, 分析了其动力特性; 最后针对拱肋可能会发生的失稳情况, 进行了拱肋稳定性设计分析。结果表明: 主梁与拱肋的变形、应力均满足设计要求; 在 10%~20% 范围内改变主梁、拱肋结构刚度对结构受力影响较小, 外秦淮河大桥作为城市交通景观桥梁, 主梁与拱肋构造设计仍有一定的优化空间; 桥梁前五阶的自振频率在 0.49~1.25 Hz 之间, 动力性能较好, 为抗震设计提供了参考; 该异型拱桥结构具有较好的稳定性能。

关键词: 异型系杆拱桥; 多索面; 设计; 刚度; 动力性能; 稳定性能

中图分类号: U448.22

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)04-0087-04

0 引言

随着我国科学技术的进步, 桥梁基础设施建设水平不断提升, 城市桥梁不仅要满足交通的需求, 同时对景观性要求也不断提升。各种造型美观、设计新颖、结构稳定、跨越能力强且景观价值较高的拱桥也越来越受桥梁设计师的青睐。目前国内外具有代表性的异型系杆拱桥主要包括: 2002 年 12 月建成通车的巴西儒塞利诺·库比契克总统桥 (President Juscelino Kubitschek Bridge)^[1], 2005 年 11 月建成通车的天津大沽桥, 以及中山长江大桥、莆田城港大道跨木兰溪大桥等。

关于异型系杆拱桥, 不同学者从整体性能、施工监测、静动力特性、稳定性等方面做了系列研究。胡晓勇^[2]采用有限元分析方法对非对称系杆拱桥的施工阶段和运营阶段进行数值模拟, 数值模拟结果与现场实测数据吻合, 关键部位变形和应力均满足规定要求。张振伟^[3]采用有限元软件 Midas Civil 分析了飞燕式系杆拱桥的主拱肋刚度及系杆索力等参数变化对主拱肋成桥线形、应力及拱脚水平推力的影响程度。黄呈伟^[4]采用空间刚架结构计算程序和子空间迭代法, 对系杆拱桥开展静动力特性数值分析,

得到结构的固有频率与振型, 以及各种荷载组合情况下的受力特性。董晓兵^[5]基于多自由度空间体系地震响应分析理论, 对五跨钢管混凝土系杆拱桥进行了动力特性分析, 提出增大结构抗震性能措施。黄云^[6]采用 ANSYS 建立了钢管混凝土系杆拱桥的三维仿真分析模型, 验证了该系杆拱桥施工和运营阶段具有较高的稳定性。

对于异型非对称系杆拱桥而言, 随着现在科技进步与建造能力的提升, 结构样式丰富、新颖, 受力性能就越复杂。本文结合实际工程, 该桥属于下承式新型系杆拱桥结构形式, 桥宽 42 m, 拱肋、索面多样, 由于结构自身构造特殊及传力复杂, 有必要对该新型异型非对称系杆拱桥开展有限元仿真模拟, 探讨该桥的受力性能, 同时验证该异型拱桥结构受力的合理性, 为以后类似系杆拱桥设计和施工提供参考, 促进异型非对称系杆拱桥的应用和发展。

1 工程背景

位于南京外秦淮河河道上口的承天大道跨外秦淮河大桥^[7,8], 采用下承式空间多索面异型系杆拱桥结构, 主桥跨度为 157 m, 桥梁线形控制精度较高, 拱肋采用非对称双向交叉弧形钢箱拱, 拱轴线由直线、圆曲线组成, 见图 1。

主梁采用扁平钢箱梁, 桥宽 42 m, 桥梁横断面布置为: 3.5 m (人行道及非机动车道)+4.5 m (拱肋及吊杆区)+11.0 m (车行道)+4.0 m (拱肋及吊杆区)+

收稿日期: 2023-02-21

作者简介: 董国鹏(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

通信作者: 王良雷(1978—), 男, 学士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。电子信箱: windowsky22@163.com

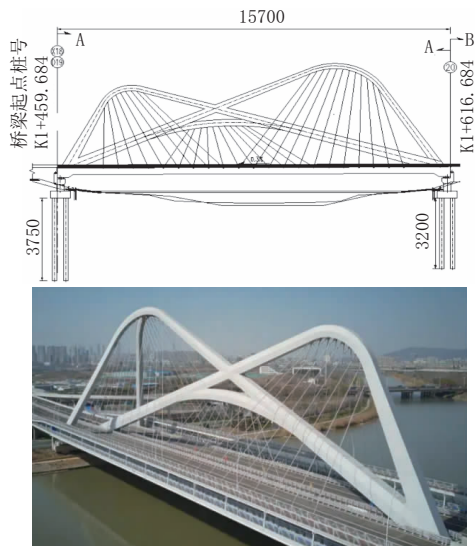


图1 外秦淮河大桥立面图(单位:cm)

11.0 m(车行道)+4.5 m(拱肋及吊杆区)+3.5 m(人行道及非机动车道),桥面设双向2%横坡。标准节段钢箱梁横向分5个箱体,梁高为3.0 m/4.5 m,标准断面见图2。

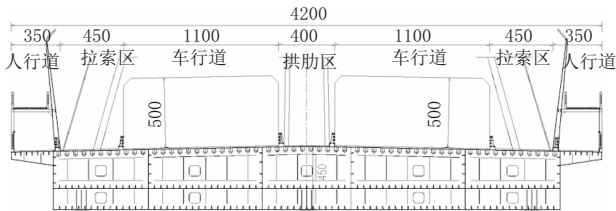


图2 钢箱梁标准横断面图(单位:cm)

外秦淮河大桥采用异型系杆拱桥结构,造型独特、线条优美,不仅满足了城市桥梁交通运输的功能,同时还成为了城市著名景观之一。相比于常规拱桥,该异型拱桥在追求美学效果的同时也会导致结构设计的合理性降低。

2 静动力及稳定性分析

外秦淮河大桥属于异型非对称系杆拱桥,是一种设计独特的空间结构,应对其进行静力性能、动力特性及稳定性研究。

2.1 静力性能

为准确分析桥梁在运营阶段的受力情况,考虑最不利情况下的(基本组合:1.2恒载+1.4活载+1.0收缩徐变+1.05温度+0.5沉降)主梁与拱肋的应力情况,在基本组合情况下,拱肋关键部位的最大压应力为-238.5 MPa,拱脚最大拉应力为211.9 MPa,主梁最大压应力、最大拉应力分别为-169.9 MPa、160.5 MPa,皆小于规范限值270 MPa,满足规范要求,见图3。根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64)^[9]规定,采用不计冲击力的汽车车道荷载频遇

值,频遇值系数为1,桥梁上部结构左右两侧对称布置,且两侧位移基本相同,计算得到竖向挠度为-93.5 mm,小于 $L/500$ 即314 mm(L 为主梁的计算跨径),满足规范要求。

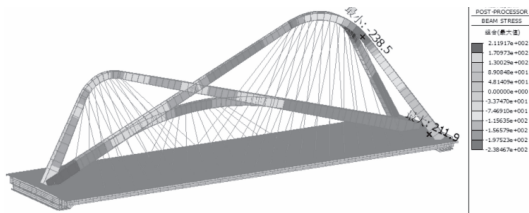


图3 基本组合情况下的拱肋应力分布(单位:MPa)

2.2 动力性能

将外秦淮河大桥 Midas 模型基于特征值分析,通过测试自振频率,可以判定桥梁结构刚度特性。通常情况下,主要采用前几阶振型来反映桥梁结构的动力特性,该桥梁前五阶的自振频率在0.49~1.25 Hz之间,见表1,结构动力性能较好。对秦淮河大桥的振动特性分析发现,该桥梁结构主梁与拱肋的振动模态出现多种特征,包括:拱肋与桥面耦合面内振动、反对称振动、对称振动、竖向与水平向耦联振动以及水平向与扭转耦联振动等形式,前5阶振型模态见图4。在自振响应中,前五阶振动主要发生在拱肋位置,结构主梁及桥面板竖向局部振动首次出现在第3阶振型中,此时主梁与拱肋已协同振动,主梁及桥面板出现轻微的扭转,该阶振动频率为0.84 Hz。一般桥梁竖向振动基频与车辆荷载振动频率较接近,外荷载频率为桥梁结构竖向振动基频的0.8~1.2倍时^[10],易产生共振现象,可得到外秦淮河大桥结构易发生共振的外荷载频率为0.67~1.00 Hz。一般情况下,行驶在平整路面的车辆,其振动频率一般大于5 Hz,由此判定,该桥梁结构基频处于合理范围。

表1 自振模态频率与振型分析

振型 序列	频率		周期 /s	振型特征
	$/(rad \cdot s^{-1})$	/Hz		
1	3.08	0.49	2.04	拱肋与桥面耦合面内振动
2	4.51	0.72	1.39	拱肋与桥面耦合面内振动
3	5.30	0.84	1.19	竖向与水平向耦联、面外反对称振动
4	6.18	0.98	1.02	竖向与水平向耦联、面外对称振动
5	7.82	1.25	0.80	水平向与扭转耦联振动

2.3 稳定性能

桥梁结构设计应满足强度、刚度、稳定性,若三者任意一个因素不满足,结构就会发生破坏,对于异型系杆拱结构来说,稳定性是控制结构设计安全的一个重要因素。对成桥阶段稳定性分析,有利于深刻

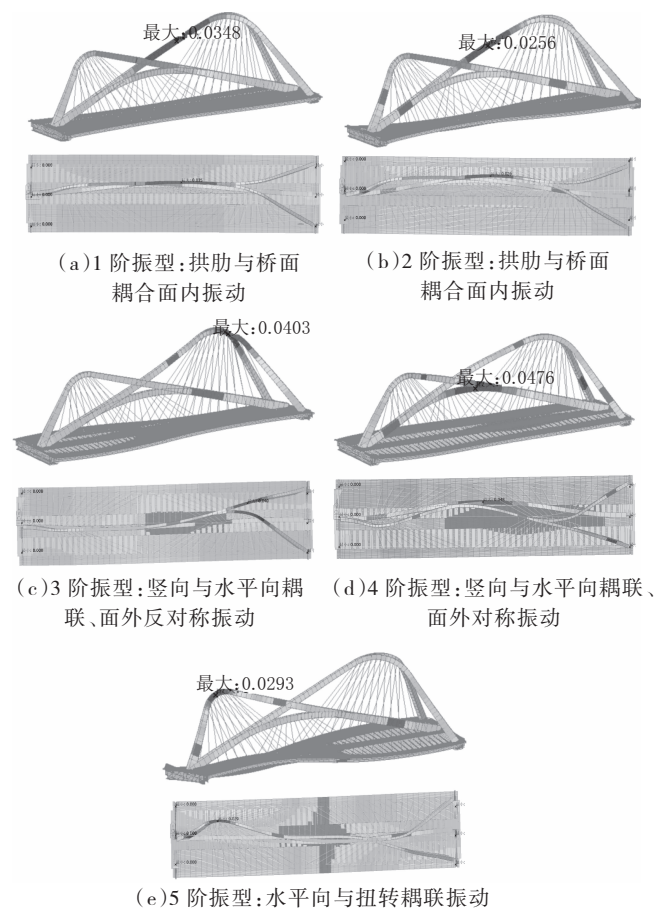


图4 前五阶振型图

了解该新型异型系杆拱桥在不同受力情况下的空间整体稳定性,为桥梁的安全运营提供理论依据。该桥梁成桥阶段应考虑恒载、活载(车道荷载、人群荷载等)与风荷载共同作用下,可能出现的最不利状态。

采用 Midas 有限元分析方法,对该桥梁结构成桥阶段进行仿真分析,对 1.0 恒载作用(工况 1)、1.0 恒载 +1.0 活载满载组合作用(工况 2)、1.2 恒载 +1.4 活载满载组合作用(不利工况 3),以及 1.2 恒载 +1.4 活载满载 +0.75 风荷载组合作用(最不利工况 4),4 种工况下该桥的整体稳定性分析,计算结果见表 2,屈曲特征值皆大于 4^[6],满足结构稳定性要求。工况 1 与工况 2、3、4 结构稳定安全系数相差较大,即考虑活载满载 + 风荷载会对结构的整体稳定性产生显著影响。工况 3 与工况 4 的第 1 阶至第 5 阶结构稳定安全系数基本相似,可见在最不利工况下,风荷载的影响最小。最不利荷载工况 4 最小稳定安全系数为 4.02,该桥梁的安全储备可确保成桥后的稳定安全运营。成桥及运营阶段稳定安全系数比较见表 2。

4 种工况下,第 1 阶~第 5 阶失稳主要发生在拱

肋、主梁位置,均表现为面外失稳,失稳破坏由拱肋交叉位置的局部失稳向主梁扭转、拱肋变形耦合的整体失稳转变。限于篇幅,仅示出最不利荷载工况 4 组合作用下的第 1 阶与第 3 阶屈曲模态,见图 5。

表 2 成桥及运营阶段稳定安全系数比较

计算工况	第 1 阶至第 5 阶屈曲特征值				
	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶
工况 1	6.25	11.53	14.47	20.89	25.03
工况 2	5.15	8.51	11.85	16.87	19.83
工况 3	4.03	7.48	9.24	13.59	16.26
工况 4	4.02	7.47	9.17	13.53	15.81

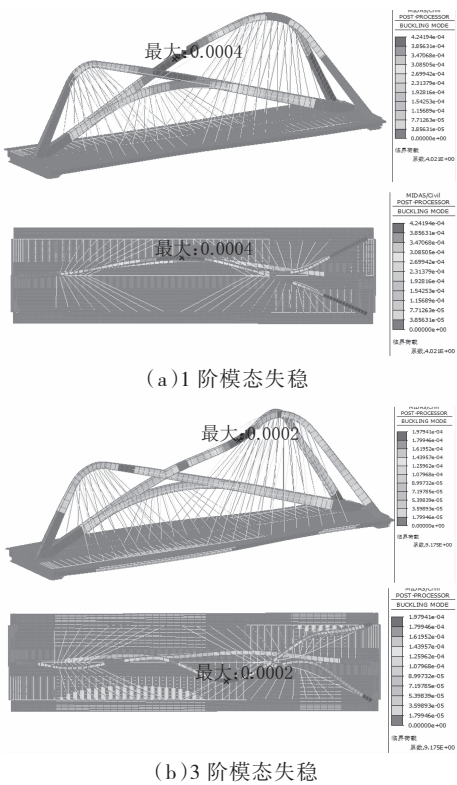


图5 拱肋模态失稳图示(工况 4)

4 结 论

本文以外秦淮河大桥为研究对象,根据其上部结构特点,建立了全桥模型,并对其开展静、动力及稳定性分析,现得出以下结论:

(1)在基本组合情况下,该异型非对称系杆拱桥的最大压应力为 -238.5 MPa,位于拱肋位置,小于规范中强度限值 270 MPa;在活载作用下,主梁最大竖向变形为 -93.5 mm,小于 $L/500$,主梁与拱肋的应力、变形均满足规范设计要求;

(2)该拱桥前五阶的自振频率在 0.49~1.25 Hz 之间,桥梁结构基频处于合理范围内,动力性能较好,为其抗震设计提供了参考;

(3)对该桥梁结构屈曲稳定性分析,四种不同工况下的第1阶失稳模态下临界荷载系数在4.02~6.25之间,稳定系数皆大于4,满足结构稳定性要求。

外秦淮河大桥采用异形交叉拱肋与多索面系杆,造型设计独特、外形美观,对其进行静力性能、动力特性及稳定性分析,研究成果可为类似工程设计和构造优化提供参考。

参考文献:

- [1] 陈建军,王翰澜,王静峰,等.秦淮河157 m下承式空间多索面异型系杆拱桥拱肋安装技术及监控分析[J].安徽建筑,2022,29(1):134-136.
- [2] 胡晓勇,黄永辉,汪大洋,等.某大跨度外倾式非对称系杆拱桥的数值模拟研究[J].公路,2021(11):208-213.
- [3] 张振伟,张伟.飞燕式钢管混凝土系杆拱桥参数分析与线形控制[J].中外公路,2018,38(6):105-108.
- [4] 黄呈伟,袁伟斌,黎斌,等.系杆拱人行天桥静、动力特性计算与测试分析[J].昆明理工大学学报,2001,26(5):34-37.
- [5] 董晓兵,陈毓娟.五跨钢管混凝土系杆拱桥的地震响应分析[J].公路,2016,61(2):98-102.
- [6] 黄云,张清华,叶华文,等.钢管混凝土系杆拱桥空间稳定性分析[J].桥梁建设,2014,44(4):50-56.
- [7] 梁桥,胡志涵,王静峰,等.秦淮河大桥异型系杆拱桥梁拱分离式拖拉施工技术及其监控分析[J].施工技术(中英文),2021,50(24):132-138.
- [8] 王杰,钱有伟.下承式空间多索面异型拱桥的系杆张拉施工技术及监控分析[J].安徽建筑,2022,29(1):142-146.
- [9] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [10] 李晓尧.多跨连续非对称中承式钢箱拱肋系杆拱桥设计关键问题研究[D].南京:东南大学,2017.
- [4] Yamazaki F, Motomura H, Hamada T. Damage assessment of expressway networks in Japan based on seismic monitoring [J]. Research, 2000.
- [5] 刘勇生.桥梁结构抗震研究的文献综述[J].世界地震工程,1992(1):48-55.
- [6] 黄龙生,姜淑珍.公路桥区域性震害预测[J].地震工程与工程振动,1995(4):113-117.
- [7] 程海根,董明.桥梁震害的模糊综合评估[J].云南交通科技,1999(4):32-35.
- [8] 李谦.增量动力分析方法的研究及其应用[D].西安:西安建筑科技大学,2011.
- [9] 黄佳梅.基于IDA的高墩大跨桥梁抗震性能研究[D].长沙:湖南大学,2012.
- [10] Park Y J, Ang A H, Wen Y K. Mechanistic Seismic Damage Model for RC[J]. ASCE, 1985, 111(4):724-730.
- [11] CJJ 166—2011,城市桥梁抗震设计规范[S].
- [12] 范立础,卓卫东.桥梁延性抗震设计[M].北京:人民交通出版社,2001.

(上接第82页)