

大跨度曲梁空间拱人行桥动力特性研究

宁平华¹, 王晟^{1*}, 华旭刚², 杨子遨²

(1. 广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广东 广州 410114; 2. 湖南大学 土木工程学院)

摘要: 曲梁空间拱人行桥具有优美流畅的外形, 在城市人行景观桥中应用逐渐增多, 但由于该类型桥梁由曲线梁与斜拱组合而成, 导致结构动力特性变得复杂, 且具有较强的不确定性。为研究该类体系桥梁自振特性, 以广州海心沙人行桥为背景, 基于有限元软件 Ansys 建立该桥动力计算模型, 进行桥梁动力特性分析。结果表明: 曲梁空间拱桥频率分布较密集, 需要进行抑振控制的模态较多, 且具有显著的振型耦合效应; 由于拱肋面外刚度较主梁小, 结构基频表现为拱肋侧弯。所得结果可为该类型人行桥抑振设计提供依据和参考。

关键词: 桥梁工程; 曲梁; 空间拱; 自振特性

与高架桥、立交桥相比, 城市人行桥更加形式多样, 在满足功能性的基础上更注重对美学的追求, 结构往往追求“轻”与“新”, 技术的成熟和社会需求的提高推动了人行桥向轻柔、大跨、空间结构发展。曲梁空间拱桥是一种拱肋倾斜、主梁平面为曲线的新型结构, 它具有流畅的结构外形, 在城市人行桥中应用日益增多, 如英国盖茨黑德千禧桥 (Gateshead Millennium Bridge, 2001 年建成)、张家港一干河人行桥 (2015 年建成)、厦门园山桥 (2019 年建成)。

桥梁动力特性是结构抑振设计以及健康监测、运营维护的重要指标, 曲梁空间拱桥的曲线空间组合构造使结构动力特性变得更加复杂, 且具有较强的不确定性, 而人行桥轻柔的构造使其结构基频不可避免地落在行人步频范围 (1.2~2.4 Hz), 同时较低的质量阻尼使结构在行人激励作用下易发生振动, 这种振动将影响到桥上行人舒适性, 情况严重时甚至产生结构共振、引发灾难。为避免人行桥共振, 满足人行桥舒适度要求, 需要对结构进行动力特性研究, 进而制定相应的抑振措施。该文以海心沙人行桥为工程背景, 建立计算模型, 研究该类型桥梁的动力特征。

1 工程背景

海心沙人行桥位于广州市新中轴线西侧, 珠江北岸是广州市珠江新城 CBD 商务区, 南岸是广州市地

标性建筑——广州塔。主桥为曲梁空间拱桥, 采用拱梁固结形式, 拱跨为 198.152 m, 矢高为 57.95 m, 矢跨比为 1/3.4, 拱轴线为二次抛物线, 拱肋平面呈 10° 外倾; 主梁采用圆弧曲线, 主桥主梁圆弧半径为 139.11 m。桥梁平面布置见图 1。

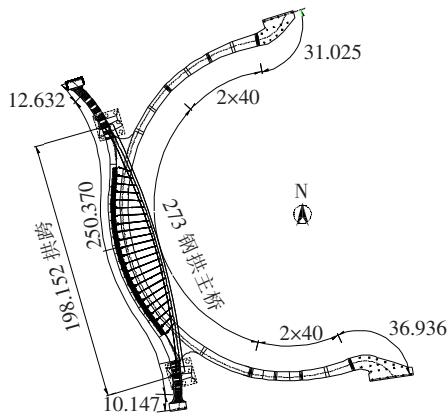


图 1 海心沙人行桥平面图 (单位: m)

主拱采用箱形等高变宽截面, 采用 Q370 钢材, 拱肋全截面高度为 2.6 m, 拱肋跨中截面见图 2。拱顶截面拱肋宽度为 4.2 m, 由拱顶至拱脚逐渐变宽, 宽度为 4.2~6.5 m; 主梁采用箱形截面, 中跨为单箱三室横向变高梁, 采用 Q370 钢材, 梁宽 15 m, 东侧箱室梁高 2 m, 西侧箱室梁高 2~3.5 m, 中跨主梁跨中截面布置见图 3; 边跨为单箱单室截面, 主桥东侧边跨为等高梁, 梁高 2 m, 梁宽 6.8 m, 主桥西侧边跨为变高梁, 梁

收稿日期: 2021-03-10

基金项目: 广州市政总院项目 (编号: KY-2020-016, KY-2020-017)

作者简介: 宁平华, 男, 硕士, 教授级高工, E-mail: nph_001@163.com

* 通信作者: 王晟, 男, 博士, 高级工程师, E-mail: wshleon@163.com

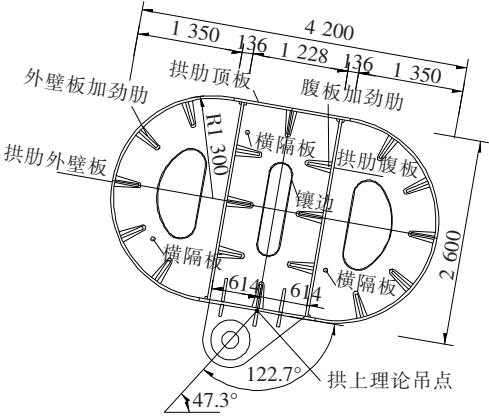


图 2 拱肋跨中截面(单位:mm)

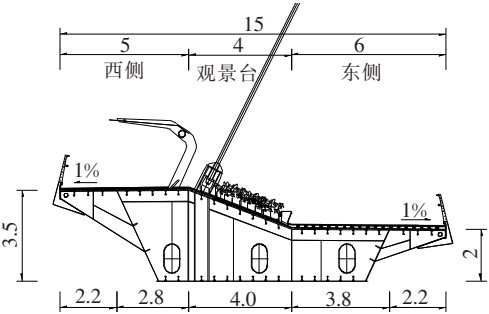


图 3 主桥中跨主梁跨中截面(单位:m)

高为 1.3~2.0 m,梁宽 6 m。

吊杆采用 GJ15-19 成品索,抗拉强度为 1 860 MPa,上锚点为锚固端,采用插耳、销轴与拱上耳板连接,下锚点为张拉端,采用整体锚头与梁上锚拉板连接,并于梁上进行张拉作业;全桥共 23 根吊杆,梁上锚点间距为 6 m,拱上锚点由主梁锚点位置横隔板确定,间距为 5~7 m;拱座为棱台形,高 5 m,顶部平面尺寸为 3.24~6.23 m(纵向)×15 m(横向),底部尺寸为 13.4~17.39 m(纵向)×20 m(横向);承台高 6.5 m,平面尺寸为 20 m×20 m,承台底设置 3 m 厚封底混凝土;主墩桩基采用 9 根直径 3 m 钻孔灌注桩,行列式布置,桩基纵、横向中心距均为 7.5 m,群桩中心相对于拱脚中心在纵向设置 2.0 m 偏心。

2 有限元模型

采用有限元软件 Ansys 进行动力特性分析,由于拱肋为较规则的变截面构件,因此采用 Beam188 单元模拟;主梁为空间曲线结构,且由于西侧箱室截面到跨中逐渐变高,而东侧箱室为等高度,导致中间箱室变高趋势复杂,因此主梁采用 Shell 181 单元模拟;吊杆采用 Link180 单元模拟;结构附加重量采用 Mass 21 单

元模拟。模型中拱底为固结,边跨设置竖向与径向约束,拱梁结合处的拱肋节点利用刚臂连接与附近主梁节点刚结,主梁刚结范围为拱肋面积范围内。计算模型见图 4。

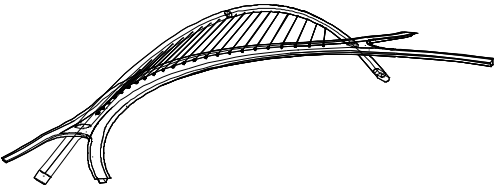


图 4 计算模型

计算模型计入了初始平衡构型内力的效应,即首先通过静力分析求得考虑了恒载和吊杆力的桥梁初始平衡构型,再基于该初始平衡构型进行模态分析,初始平衡构型对应的吊杆力见表 1。模态提取方法采用 Block Lanczos 法,该方法适用于提取由壳单元或壳单元与实体单元组成模型的多阶模态。

表 1 初始平衡构型吊杆力

吊杆编号	吊杆力/kN	吊杆编号	吊杆力/kN
1、23	1 019	7、17	1 042
2、22	1 025	8、16	1 040
3、21	1 032	9、15	1 037
4、20	1 038	10、14	1 035
5、19	1 042	11、13	1 033
6、18	1 043	12	1 032

3 计算结果

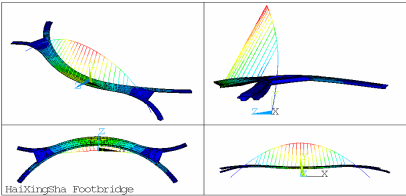
桥梁结构的动力特性是桥梁抗震、抑振设计的基础,对桥梁结构的健康监测和维护具有十分重要的意义,结构的动力特性包括自振频率与主振型等。由于在结构动力特性分析中,一般情况下结构前若干阶自振频率和振型起控制作用,因此,只需求结构的前若干阶自振频率和振型。由于该桥属于空间异形结构,结构受力复杂,该文给出前 12 阶桥梁结构的动力特性,如表 2 所示,前 5 阶振型图见图 5。

表 2 海心沙人行桥主要模态特征

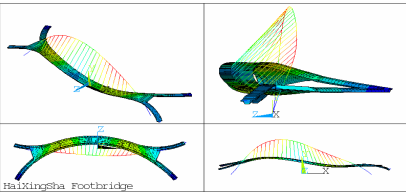
阶次	频率/Hz	模态质量/t	振型描述
1	0.540	2 301	拱肋侧弯、中跨主梁对称竖弯
2	0.720	3 822	拱肋反对称竖弯、中跨主梁反对称竖弯
3	1.043	1 642	中跨主梁对称竖弯与对称侧弯
4	1.296	3 487	拱肋反对称侧弯、主梁侧弯与反对称竖弯
5	1.507	2 188	主梁扭转

续表 2

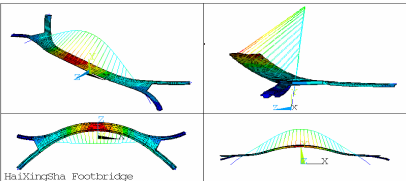
阶次	频率/ Hz	模态质 量/t	振型描述
6	1.806	4 640	拱肋反对称竖弯与反对称侧弯
7	2.038	311	东南边跨竖弯
8	2.062	609	东北边跨竖弯
9	2.145	476	中跨主梁扭转
10	2.206	433	东侧边跨竖弯
11	2.595	807	北侧边跨竖弯
12	2.784	210	西北边跨竖弯、侧弯



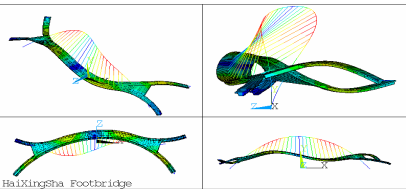
(a) 第 1 阶



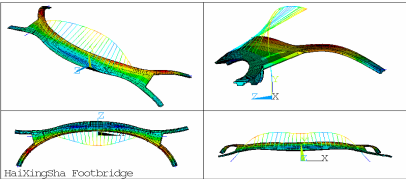
(b) 第 2 阶



(c) 第 3 阶



(d) 第 4 阶



(e) 第 5 阶

图 5 振型图

由表 2 可知:海心沙人行桥第 1 阶频率为 0.54 Hz,结构基频较低,第 1 阶振型表现为拱肋侧弯,主梁竖弯与侧弯不明显,这是由于拱肋的面外刚度较主梁刚度小;该桥频率分布较密集,自由行走的人群步频频带(1.2~2.4 Hz)内出现了 7 个模态;第 4 阶振型存在中跨主梁侧弯,其频率为 1.296 Hz,由于侧弯可能导致横向动力失稳,从而产生 Lock-in 效应,因此该阶为主要控制模态;第 5 阶与第 9 阶振型均表现为主梁扭转,频率分别为 1.507、2.145 Hz,均在敏感频率频带内,其中前者表现为全桥主梁扭转,后者表现为中跨主梁扭转,亦为控制模态;第 7、8、10 阶振型均表现为主梁竖弯,振型最大位置分别为东南边跨主梁、东北边跨主梁、东侧边跨主梁,需要设置抑振措施;由于西南边跨跨度较小,中跨相对刚度大,导致前 12 阶振型未出现以中跨主梁竖弯为主的振型。

此外,由于该桥为空间拱梁组合结构,且拱为倾斜状、主梁为曲线,导致结构模态振型复杂,主梁和拱肋振型耦合,主梁竖向、侧向和扭转方向的振型也有耦合。

4 结论

(1) 曲梁空间拱桥频率分布较密集,需要进行抑振控制的模态较多,且具有显著的振型耦合效应。

(2) 由于拱肋面外刚度较主梁小,结构基频表现为拱肋侧弯。在设计中应注意中跨主梁侧弯模态的控制,避免桥梁出现横向动力失稳,从而产生 Lock-in 效应。该体系各设计参数对结构动力特性的影响值得进一步研究。

参考文献:

[1] 曾勇,曾渝荷,谭红梅,等. 公轨两用大跨度单索面钢桁梁斜拉桥动力特性研究[J]. 中国铁道科学,2020(5).

[2] 程炜钢,徐伟,孙勇,等. 大跨度异形人行钢箱梁桥动力特性分析及设计参数优化[J]. 南京工程学院学报(自然科学版),2011(3).

[3] 成凯. 大跨度异型人行拱桥人致振动响应分析及减振控制研究[D]. 广州大学硕士学位论文,2019.

[4] 彭雪林. 基于健康监测的大跨度斜拉桥基淮有限元模型[D]. 福州大学硕士学位论文,2004.

[5] 陈永高,钟振宇. 环境激励下桥梁结构模态参数识别的改进随机子空间算法[J]. 振动与冲击,2020(16).

[6] 陈淮,朱倩,李静斌,等. 结构参数变化对斜靠式拱桥动力特性的影响[J]. 中国公路学报,2009(1).