

# 小矢跨比上承式钢提篮拱桥动力及稳定性分析

赵唯坚<sup>1</sup>, 刘欢<sup>2</sup>, 王占飞<sup>2</sup>, 高强<sup>3</sup>

(1. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310000; 2. 沈阳建筑大学交通工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 3. 沈阳建筑大学建筑设计研究院, 辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 研究小矢跨比上承式钢提篮拱桥的动力特性、稳定性能影响因素及其变化趋势. 方法 以某上承式钢提篮拱桥为背景, 采用有限元软件 ABAQUS 建立空间有限元模型, 模型中对拱肋、主梁、边墩及立柱均采用梁单元建模, 桥面板采用壳单元建模. 通过改变模型的矢跨比和内倾角, 分析其对拱桥自振周期、振型、屈曲稳定系数的影响. 结果 矢跨比对拱桥自振周期及稳定系数影响较大, 随着矢跨比减小, 拱桥面外一阶稳定系数先增大后减小; 内倾角对此类拱桥的一阶、二阶自振周期和面外稳定系数影响较大, 当内倾角  $\alpha < 4^\circ$ , 一阶振动的周期随着内倾角  $\alpha$  的增加而减小, 当内倾角  $\alpha > 4^\circ$ , 随着内倾角  $\alpha$  的增加, 二阶振动的周期逐渐减小, 增大内倾角面外稳定性提高. 结论 得到的不同内倾角和矢跨比下拱桥动力特性和稳定性的变化规律, 可为此类拱桥的设计和工程实践提供参考和借鉴.

**关键词** 矢跨比; 上承式钢拱桥; 稳定系数; 内倾角; 失稳模态

中图分类号 TU997 文献标志码 A

## Dynamic Characteristic and Stability Analysis of Small Rise-Span Ratio Steel Deck-Type Basket Arch Bridge

ZHAO Weijian<sup>1</sup>, LIU Huan<sup>2</sup>, WANG Zhanfei<sup>2</sup>, GAO Qiang<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, China, 310000; 2. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. Architectural Design and Research Institute, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** In order to study the influence factors and the changing trend of the dynamic characteristics and the stability of the small rise-span ratio steel deck-type basket arch bridge, a 3-D FE model was established based on a similar steel arch bridge by finite element software ABAQUS. In the model, the arch rib, girder, side pier and column are modeled by beam element, and the deck is modeled by shell element. By changing the rise-span ratio and inner lean angle of the model, the influence of its naturally period, vibration mode and buckling stability coefficient of the arch bridge is studied. The results show that, the natural period and the stability coefficient of the arch bridge

收稿日期: 2018-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278312); 辽宁省自然科学基金项目(201602602)

作者简介: 赵唯坚(1958—), 男, 教授, 博士, 主要从事混凝土结构及组合结构方面研究.

are largely influenced by the rise-span ratio. With the decrease of the rise-span ratio, the first order stability coefficient of the arch bridge increases first and then decreases. The inner lean angle of the bridge has a greater influence on the first and second order of natural vibration period. When the angle of  $\alpha$  is less than  $4^\circ$ , the first-order natural vibration period decreases with the increase of  $\alpha$ , and when the angle of  $\alpha$  is more than  $4^\circ$ , along with the increase of the angle  $\alpha$ , the period of the second-order natural vibration period decreases. By increasing the arch rib in the lean angle, the lateral stability performance is significantly improved. The dynamic characteristics and stability of arch bridges with different inner-lean angle and rise-span ratio is obtained, which has certain reference value for the design and engineering practice of such arch bridges.

**Key words:** rise-span ratio; deck-type steel arch bridge; stability coefficient; inner lean angle; buckling mode

上承式钢拱桥是山区常见的一种桥型, 由于钢拱桥具有结构轻盈, 跨越能力大的优点, 很适合在山区等地质情况较复杂的地区修建<sup>[1]</sup>. 而矢跨比的选择在拱桥尤其是大跨度钢拱桥中极为重要, 它不但影响拱桥受力的合理性, 如拱桥的稳定性、动力特性, 还影响拱桥的构造形式、施工方法的选择以及与周围环境的协调性<sup>[2]</sup>. 目前, 已建和在建的钢拱桥中较为常用的矢跨比为 0.125 ~ 0.2, 通常矢跨比小于 0.2 的拱桥归为小矢跨比拱桥, 又称坦拱, 小矢跨比钢拱桥在大跨度钢拱桥中应用广泛<sup>[3]</sup>.

拱桥自身的受力特点决定了拱桥以拱肋受压为主, 随着矢跨比的减小, 拱脚推力及拱肋所受压力均会明显增大, 这就必须保证拱肋面内和面外的稳定性, 防止发生失稳破坏<sup>[4]</sup>. 此前, 国内外学者对中承式拱桥做了大量相关研究<sup>[5-10]</sup>, 而对于小矢跨比上承式钢提篮拱桥, 关于其动力特性及稳定性能的研究成果较少. 基于此, 笔者着重从矢跨比和內倾角变化对拱桥自振周期、振型、稳定系数等的影响和变化规律进行研究, 并对各参数影响下的失稳特征进行分析, 研究结果表明此类拱桥扭转振型出现较晚, 具有良好的抗扭转性能.

## 1 桥梁概况及模型建立

### 1.1 拱桥概况

笔者以某上承式钢提篮拱桥为工程背景

进行分析, 该拱桥拟在山区岩层上修建, 场地类型为 2 类场地, 抗震设防烈度为 8.5 度. 组成全桥的主要构件包括拱肋、边墩、拱上立柱、桥面纵梁和桥面板等. 拱桥主要结构参数见图 1, 全长为 280 m, 其中计算跨径部分长 210 m, 计算矢高 21 m, 矢跨比 1:10, 拱肋內倾角  $12^\circ$ , 拱轴线为二次抛物线型. 该桥主梁间距 6.6 m, 桥面全宽为 12 m, 设置双向两车道, 设计速度 80 km/h, 桥面板为钢筋混凝土结构, 截面形状为宽 12 m, 厚 0.27 m 的矩形截面.

该桥拱肋、主梁、拱上立柱及边墩为带有加劲肋的箱形截面, 在建模分析时进行了刚度等效, 其他构件为工字型截面. 其中边墩及拱上立柱的设计截面参数如图 2 所示, 拱肋、主梁及横撑、斜撑的截面参数如图 3 所示.

### 1.2 有限元模型的建立

笔者以此桥为基本模型, 采用有限元软件 ABAQUS 建立拱桥空间有限元模型<sup>[11]</sup>, 讨论设计参数对上承式钢提篮拱桥动力特性及稳定性能的影响, 选取 8 种矢跨比(1/5、1/6、1/7、1/8、1/9、1/10、1/15、1/20) 和九种內倾角( $0^\circ$ 、 $2^\circ$ 、 $4^\circ$ 、 $6^\circ$ 、 $8^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $12^\circ$ 、 $14^\circ$ 、 $16^\circ$ ) 共计 72 个模型进行分析. 模型的桥面板采用三维壳单元 S4R 进行模拟, 主梁、拱肋、边墩及拱上立柱均为箱形截面, 采用考虑剪切变形的 Timoshenko 梁单元 B31 进行建模.

拱桥模型中桥面板和主梁之间采用绑定

(Tie)约束;拱顶 25 m 范围内主梁和拱肋之间连接形式采用刚接;拱上立柱与主梁和拱肋的连接形式采用刚接. 拱桥的有限元模型

如图 4 所示. 模型在主梁端部、边墩底部以及拱脚位置的边界条件见表 1.

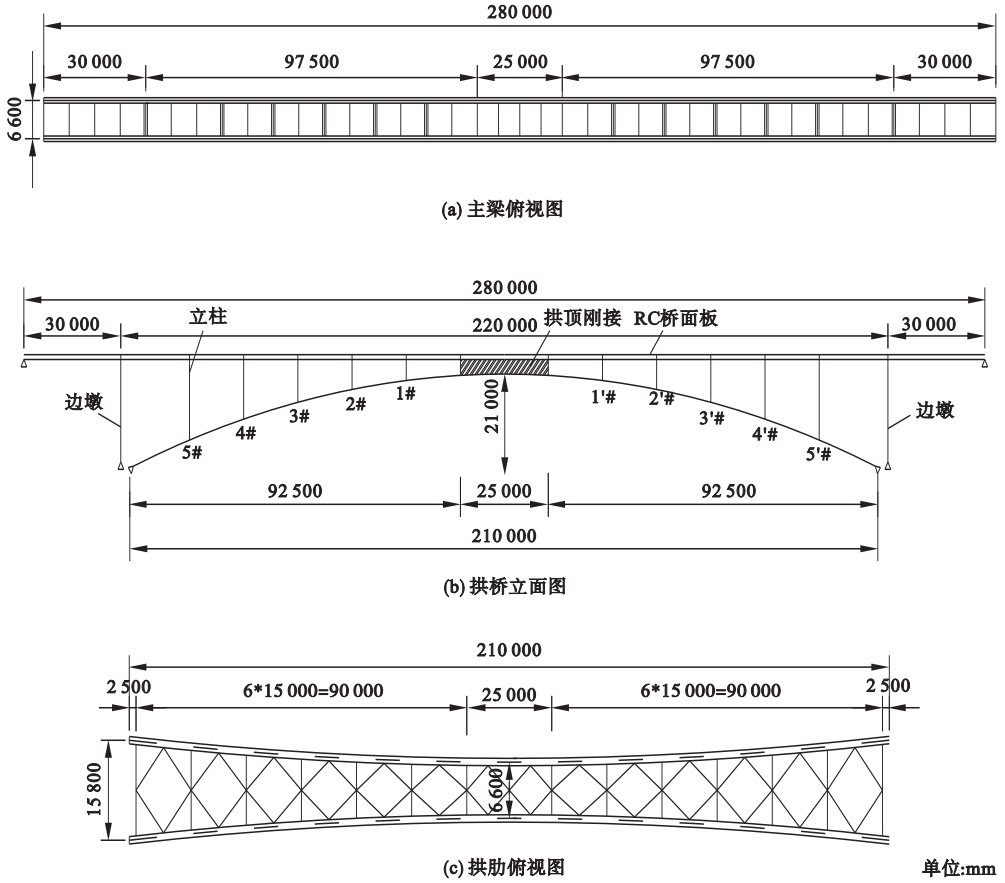


图 1 拱桥主要结构参数

Fig. 1 Main structural parameters of arch bridge

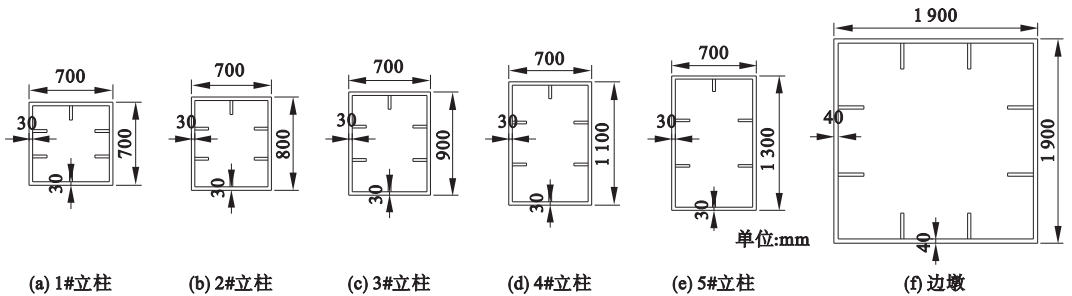


图 2 拱上立柱及边墩截面参数

Fig. 2 The parameters of the columns and side pier

### 1.3 材料属性

混凝土:桥面板采用混凝土材料. 由于桥

面板不是研究的重点,因此将混凝土设为弹性材料,不考虑其塑性变形.

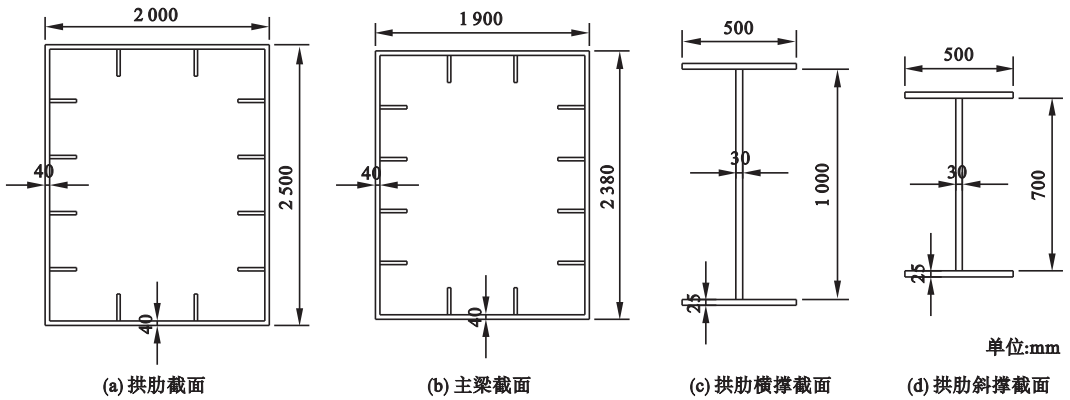


图3 主要构件截面参数

Fig. 3 Main component section parameters

表1 模型边界条件

Table 1 Model boundary conditions

位置	X	Y	Z	UR1	UR2	UR3
主梁端部	自由	固定	固定	自由	自由	自由
边墩底部	固定	固定	固定	固定	固定	固定
拱脚	固定	固定	固定	自由	自由	自由

注: X 为顺桥向, Y 为竖向, Z 为横桥向。

钢材: 文中采用两种型号的钢材, Q235 和 Q345. 拱肋、主梁、边墩以及拱肋间的斜撑采用 Q345 钢材<sup>[12]</sup>, 拱上立柱及拱肋和主梁间的横撑采用 Q235 钢材. 混凝土和钢材的力学性能参数见表 2.

表2 材料力学性能参数

Table 2 Mechanical parameters of material properties

材料名称	弹性模量/GPa	泊松比	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	屈服应力/MPa	极限应力/MPa	极限应变
C50 混凝土	30	0.2	2 500	—	—	—
Q235 钢材	210	0.3	7 800	235	358	0.06
Q345 钢材	210	0.3	7 800	345	495	0.06

## 2 动力特性分析

桥梁结构的动力特性主要包括自振频率、周期、振型以及阻尼比等方面的内容. 其中, 结构的组成体系、刚度、质量分布和边界条件等是影响动力特性的关键, 通过动力特性分析可以了解桥梁整体结构性能, 对进行桥梁的抗震设计和保证桥梁的安全性和可靠

性有重要意义<sup>[13-16]</sup>.

### 2.1 钢拱桥自振特性分析

笔者通过 Lanczos 向量直接迭代法求得该上承式钢提篮拱桥的自振频率、周期、振型等. 选取前 60 阶振型中较为特殊的 6 阶振型见图 5, 表 3 给出了拱桥 6 阶振型所对应的自振周期, 质量参与系数以及振型描述等模态信息.

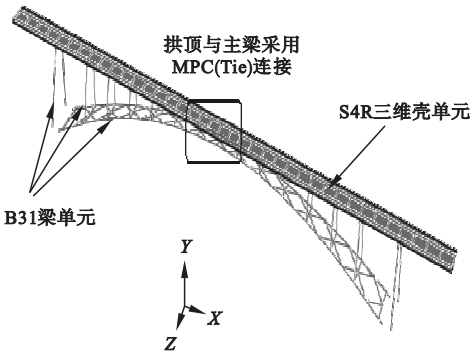


图4 拱桥有限元模型

Fig. 4 Finite element model of arch bridge

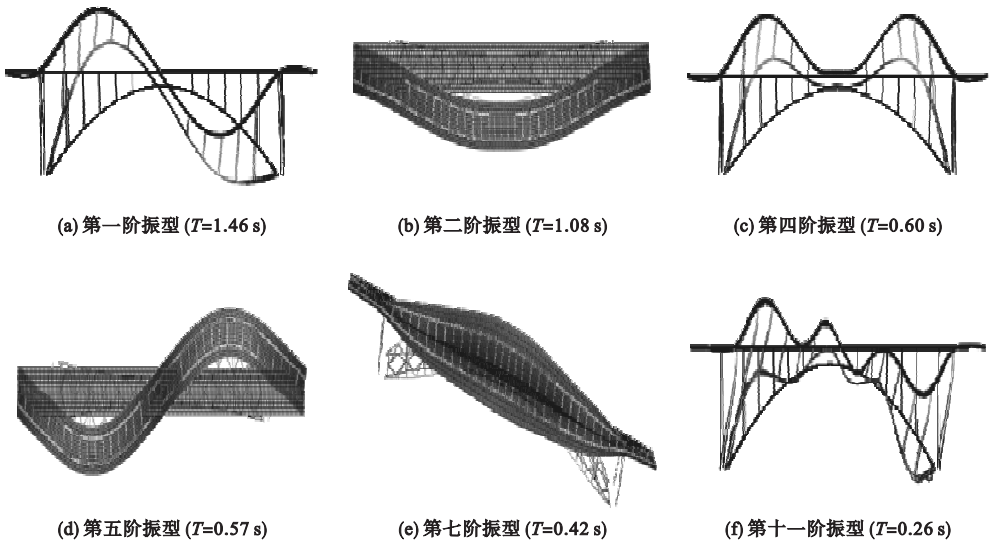


图5 拱桥六阶特殊振型

Fig. 5 The six special vibration modes of bridge

表3 拱桥六阶特殊振型模态信息

Table 3 The six special vibration modes information of bridge

振型阶数	周期/s	质量参与系数/%			振型描述
		纵向	竖向	横向	
1	1.46	9.6	0	0	竖向反对称弯曲
2	1.08	0	0	70.6	横向对称弯曲
4	0.60	0	53.8	0	竖向对称弯曲
5	0.57	0	0	0	横向反对称弯曲
7	0.42	0	0	0.6	横向反对称扭转
11	0.26	73.6	0	0.0	纵向反对称弯曲

由拱桥的振型图以及对应的各阶模态信息可知,拱桥的基频为 0.69 Hz,基本自振周期为 1.46 s,结构的低阶自振周期大致呈线性减小趋势.结构的扭转振型出现较晚,说明结构具有良好的抗扭转性能.通过计算结构的前 200 阶振型得到其纵桥向的质量参与系数达到了 90.0%,横桥向质量参与系数为 91.7%,而竖桥向的质量参与系数为 86.9%,说明高阶振型对该类桥梁振动的影响不可忽略.

## 2.2 矢跨比对自振周期的影响

为了更好地反应矢跨比对此类桥梁自振周期的影响,以前述内倾角为  $12^\circ$  的钢提篮拱桥模型为基础,保持跨径不变,调整拱桥的矢高,分别取矢跨比为  $1/5$ 、 $1/6$ 、 $1/7$ 、 $1/8$ 、 $1/9$ 、 $1/10$ 、 $1/15$ 、 $1/20$  进行计算.不同矢跨比

所对应的各阶自振周期见图 6.图中给出了前三阶振动中各点处所对应的振动形态.由图 6 可以看出,矢跨比对此类拱桥的一阶自振周期影响较为明显,第一阶自振周期随矢跨比的减小而减小,表明结构纵向以及竖向刚度与矢跨比的选择密切相关;矢跨比对结构二阶自振周期影响较小,由图中振型可知,矢跨比  $1/5 \sim 1/15$  结构的二阶振型均为横向对称弯曲,可见矢跨比主要影响结构竖向振动,对横向振动影响不大;三阶自振周期随矢跨比减小先减小后增大,当矢跨比小于  $1/10$  时,周期开始增大,达到  $1/20$  时,自振周期接近二阶自振周期,且三阶振型由竖向振动变为横向振动,说明当矢跨比小于  $1/10$  时,结构的三阶振动模态开始变化,结构面内和面外刚度趋于一致;之后几阶自振周期随矢跨

比的变化影响较小,可知矢跨比仅对此类拱桥的前几阶自振周期有影响。

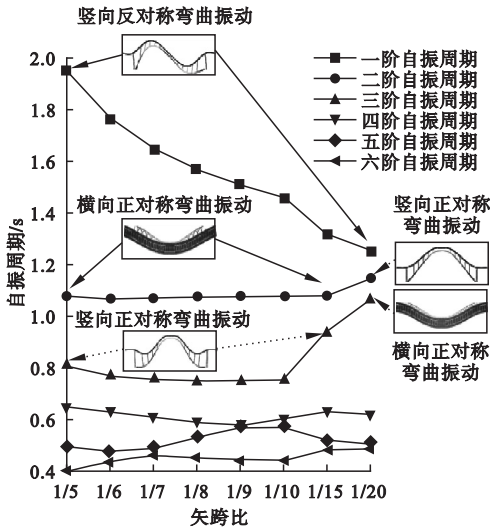


图6 各阶自振周期随矢跨比变化趋势图

Fig. 6 Each order natural period varies with the rise-span ratio

### 2.3 内倾角对自振周期的影响

为探究拱肋内倾角对此类桥梁自振周期的影响,以前述矢跨比为1/10的钢提篮拱桥模型为基础,保持拱顶距离不变,调整两拱肋内侧转动的角度,分别取内倾角为0°、2°、4°、6°、8°、10°、12°、14°、16°进行计算.不同拱肋内倾角对应的各阶自振周期如图7所示.图中给出了一阶和二阶振型中各点处对应的振动形态。

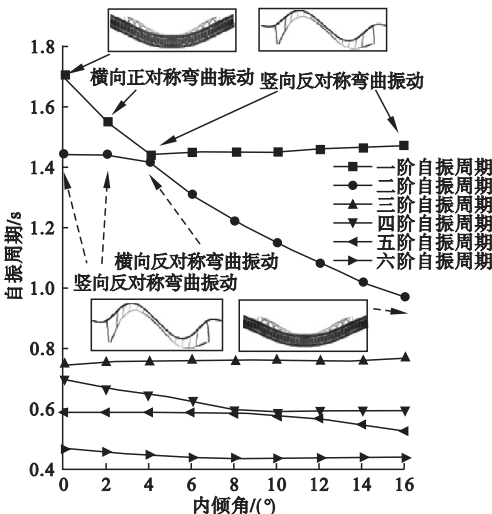


图7 各阶自振周期随内倾角变化趋势图

Fig. 7 Each order natural period varies with the inner lean angle

由图7可以看出,内倾角对此类拱桥的第一阶和第二阶自振周期影响较为明显,当内倾角为0°~4°时,随着内倾角的增大,结构一阶自振周期呈近似线性减小趋势,结合拱桥自振振型可知,拱桥一阶振型为横向正对称弯曲,因此内倾角增大提高了横桥向刚度,而内倾角在0°~4°时,结构二阶自振周期变化不明显,自振振型表现为竖向反对称弯曲;当内倾角大于4°时,结构第一阶和第二阶振型均发生改变,观察前两阶振动模态可知,当提篮拱内倾角大于4°后,一阶振型由横向正对称弯曲变为竖向反对称弯曲,自振周期变化很小,二阶振型由竖向反对称弯曲变为横向正对称弯曲,自振周期呈近似线性减小趋势.由此可知,拱肋内倾能够显著影响拱桥的横桥向刚度,有利于改善拱桥振动特性,并且内倾角为4°时,是该类拱桥竖向振动与横向振动数列顺序的临界角度。

### 3 钢拱桥线弹性屈曲稳定分析

拱桥作为压弯结构,其结构失稳包含两大类:第一类是分支点失稳问题;第二类是极值点失稳问题.实际工程中的稳定问题一般都表现为第二类失稳,但是,由于第一类稳定问题是特征值问题,求解方便,在许多情况下两类问题的临界值又相差不大,因此研究第一类稳定问题仍具有广泛的实际意义<sup>[17-19]</sup>.

笔者对该类桥型的第一类稳定问题进行线弹性有限元分析.根据线性屈曲理论,拱桥结构在外荷载作用下的特征方程为

$$(K_t + \lambda K_g) \times \delta = 0. \tag{1}$$

式中: $K_t$ 为弹性刚度矩阵; $K_g$ 为几何刚度矩阵; $\delta$ 为位移增量列阵; $\lambda$ 为特征值(稳定系数).

要使式(1)有非零解,则应有

$$|K_t + \lambda K_g| = 0. \tag{2}$$

此时, $\delta$ 将趋于无穷大,结构失去稳定性.假定式(1)有 $n$ 阶,则式(2)必有 $n$ 个特征解.对于实际工程而言,只有最小解才有意义,因而,在分析桥梁结构的稳定性时,可以

只考虑1阶特征值的大小且需满足一般拱桥稳定系数要大于4~5的规范要求<sup>[20-24]</sup>.

### 3.1 矢跨比对拱桥稳定系数的影响

为了探究矢跨比对此类拱桥一阶稳定系数的影响,笔者在保证跨径、边界条件、连接方式均与内倾角为12°钢提篮拱桥模型相同的情况下,仅改变拱桥矢高,选取了八种不同的矢跨比作为参数,建立了相应的拱桥模型,在恒载(包括结构自重和二期恒载)工况作用下分别得到拱桥面外及面内一阶稳定系数随矢跨比变化的结果(见图8、图9).

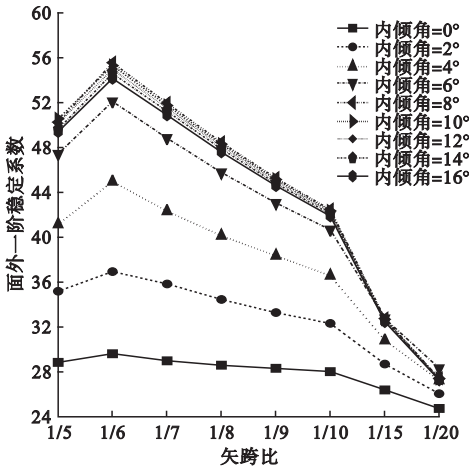


图8 面外一阶稳定系数随矢跨比变化趋势

Fig. 8 Out plane stability coefficient varies with the rise-span ratio

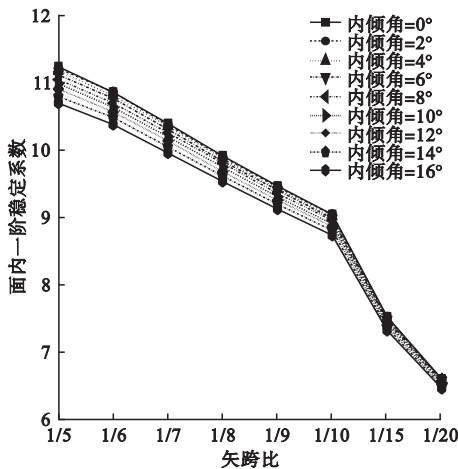


图9 面内一阶稳定系数随矢跨比变化趋势

Fig. 9 Inner plane stability coefficient varies with the rise-span ratio

由图8可知,提篮拱桥的面外一阶稳定系数随矢跨比的增大先增大后减小,当矢跨比为1/6时,提篮拱桥的面外一阶稳定系数达到最大,随着矢跨比继续增大,面外一阶稳定系数开始减小,因此为使拱桥稳定性能最好,矢跨比应选为1/6左右;对比平行拱和提篮拱的稳定系数可以发现,提篮拱的面外一阶稳定系数均远大于平行拱,不同矢跨比拱桥采用拱肋内倾均可显著提高钢拱桥面外稳定性.由图9可知,提篮拱桥及平行拱桥面内一阶稳定系数均随矢跨比的增大而增大,近似呈线性关系,当矢跨比小于1/10时,面内一阶稳定系数减小较快;矢跨比相同时不同内倾角拱桥面内一阶稳定系数十分接近,说明矢跨比是影响拱桥面内稳定性的主要因素.

### 3.2 内倾角对拱桥稳定系数的影响

为了更好地反映内倾角对面内和面外一阶稳定系数的影响,笔者在保证跨径边界条件连接方式等均相同的情况下,保持拱顶距离不变,调整两拱肋倾角,得到9种内倾角拱桥稳定系数的有限元分析结果,取面内和面外一阶稳定系数与内倾角的结果绘制成关系曲线,结果见图10、图11.

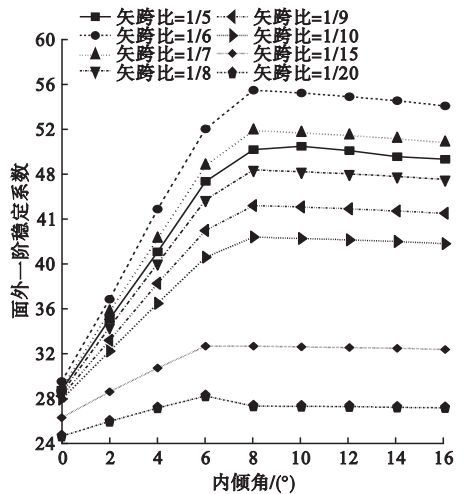


图10 面外一阶稳定系数随内倾角变化趋势

Fig. 10 Out plane stability coefficient varies with the inner lean angles

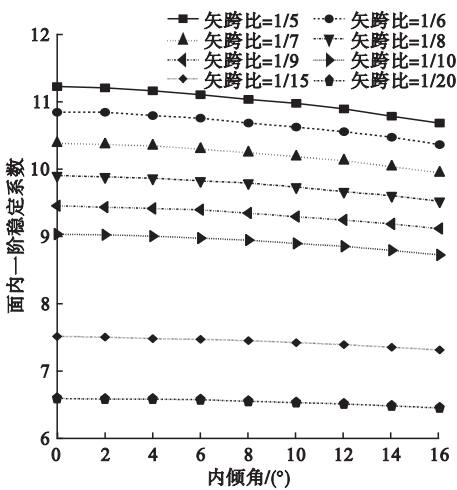


图 11 面内一阶稳定系数随内倾角变化趋势

Fig. 11 Inner plane stability coefficient varies with the inner lean angles

由图 10 可以看出,面外一阶稳定系数随拱肋内倾角的增大而增大,当内倾角在  $0 \sim 6^\circ$  变化时,而外一阶稳定系数随内倾角增大近似呈线性增长,当拱肋内倾角达到  $8^\circ$  时,再增加拱肋倾角,一阶稳定系数不再增大.然而,随着提篮拱桥内倾角的增大,会显著增大施工难度和增加建造成本,因此从稳定性和经济性的角度出发,内倾角为  $8^\circ$  左右比较适宜.由图 11 可以看出,面内一阶稳定系数随内倾角的增大略有减小,但  $0^\circ$  和  $6^\circ$  拱桥面内一阶稳定系数相差很小,说明面对一阶稳定系数受内倾角变化的影响较小,内倾角主要控制钢拱桥的面外稳定性.

## 4 结论

(1) 对于小矢跨比钢提篮拱桥,低阶振型以竖向振动为主,扭转振型出现较晚,结构具有较好的抗扭转性能;此类拱桥的一阶和二阶自振周期受内倾角影响较大,内倾角  $\alpha$  为  $4^\circ$  时,是该类拱桥竖向振动与横向振动数列顺序的临界角度;结构的第三阶振动在矢跨比小于  $1/10$  时开始发生变化,自振周期减小,自振振型开始向横桥向转变,结构面内和面外刚度趋于一致.

(2) 矢跨比是影响上承式钢提篮拱桥自

振特性和稳定性的重要因素,矢跨比减小能够增大拱桥刚度,但拱桥面内稳定性明显降低,因此矢跨比选取应综合考虑对拱桥刚度和面内面外稳定性的影响.

(3) 拱肋内倾角对结构的面外稳定性影响较大,增大拱肋内倾角,拱桥面外稳定性显著提高,但内倾角过大会加剧拱桥扭转失稳,考虑安全性和经济性,钢提篮拱桥中拱肋内倾角应控制在合理范围.

## 参考文献

- [1] 唐利科. 大跨度提篮式钢箱拱桥动力特性及地震响应分析[D]. 成都:西南交通大学, 2018.  
(TANG Like. Dynamic characteristics and seismic response analysis of long span basket steel box arch bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.)
- [2] 户东阳. 高速铁路大跨度钢箱提篮拱桥动力特性及地震响应分析[D]. 长沙:中南大学, 2011.  
(HU Dongyang. Dynamic characteristics and seismic response analysis of large span steel box up-bear arch bridge of high-speed railway [D]. Changsha: Central South University, 2011.)
- [3] 陈宝春,陈康明,赵秋. 中国钢拱桥发展现状调查与分析[J]. 中外公路, 2011, 31(2): 121-127.  
(CHEN Baochun, CHEN Kangming, ZHAO Qiu. Investigation and analysis of the development status of Chinese steel arch bridge [J]. Journal of China & foreign highway, 2011, 31(2): 121-127.)
- [4] 宁远思. 大跨度上承式铁路拱桥优化设计与建设管理作用分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(8): 2040-2046.  
(NING Yuansi. Effect analysis of optimization design and construction management on long span deck railway arch bridge [J]. Journal of railway science and engineering, 2018, 15(8): 2040-2046.)
- [5] LIANG C Y, CHEN A. A method for examining the seismic performance of steel arch deck bridges [J]. Frontiers of architecture & civil engineering in China, 2010(4): 310-320.
- [6] 谢旭,唐站,胡欣科. 纤维模型在钢拱桥抗震设计中的适用性研究[J]. 中国公路学报, 2015, 28(2): 33-42.  
(XIE Xu, TANG Zhanzhan, HU Xinke. Study on applicability of fiber model in seismic design for steel arch bridge [J]. China journal of highway and transport, 2015, 28(2): 33-42.)
- [7] 苏成,廖威,秦帆. 大跨度钢拱桥构件评级体系研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(4): 84-89.  
(SU Cheng, LIAO Wei, QIN Fan. Research of



- rating system for components of long span steel arch bridges[J]. Bridge construction, 2017, 47(4):84-89.)
- [8] XU L, WU Y P. Nonlinear stability analysis of Qijiadu long-span deck-type CFST arch bridge[J]. Advanced materials research, 2011, 163: 1685-1691.
- [9] 曹正洲, 冯玉涛, 沈逢俊. 大跨径钢箱提篮拱桥空间稳定性分析[J]. 桥梁建设, 2011(1): 43-47.  
(CAO Zhengzhou, FENG Yutao, SHEN Fengjun. Analysis of spatial stability of long span steel box basket handle arch bridge[J]. Bridge construction, 2011(1):43-47.)
- [10] WU X R, LIU C Y, WANG W. In-plane strength and design of fixed concrete-filled steel tubular parabolic arches[J]. Journal of bridge engineering, 2015, 20(12):15-16.
- [11] 曹金凤, 石亦平. ABAQUS 有限元分析常见问题解答[M]. 北京:机械工业出版社, 2012.  
(CAO Jinfeng, SHI Yiping. ABAQUS FEA common questions and answers[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.)
- [12] 王萌, 钱凤霞, 杨维国, 等. 低屈服点钢材与 Q345B 和 Q460D 钢材本构关系对比研究[J]. 工程力学, 2017, 34(2):60-68.  
(WANG Meng, QIAN Fengxia, YANG Weiguo, et al. Comparison study on constitutive relationship of low yield point steels, Q345B steel and Q460D steel[J]. Engineering mechanics, 2017, 34(2):60-68.)
- [13] 秦世强, 胡佳, 徐训. 大跨度提篮拱桥动力特性参数分析[J]. 公路工程, 2018, 43(2):1-6.  
(QIN Shiqiang, HU Jia, XU Xun. Parametric analysis of the dynamic property of a large scale basket handle arch bridge[J]. Highway engineering, 2018, 43(2):1-6.)
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市桥梁抗震设计规范: CJJ166—2011 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of urban bridges: CJJ166—2011 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2011.)
- [15] GAO J, SU J Z, XIA Y. Experimental study of concrete-filled steel tubular arches with corrugated steel webs[J]. Advanced steel construction, 2014(10):99-115.
- [16] TANG Z Z, XIE X, WANG T. Study on FE models in elasto-plastic seismic performance evaluation of steel arch bridge[J]. Journal of constructional steel research, 2015, 113:209-220.
- [17] WANG T, XIE X, SHEN C. Effect of hysteretic constitutive modes on elasto-plastic seismic performance evaluation of steel arch bridges[J]. Earthquakes and structures, 2016, 10: 1089-1109.
- [18] GUO Y L, CHEN H, PI Y L. In-plane strength of steel arches with a sinusoidal corrugated web under a full-span uniform vertical load: experimental and numerical investigations[J]. Engineering structures, 2016(110):105-115.
- [19] GUO Y L, YUAN X, PI Y L. In-plane failure and strength of pin-ended circular steel arches considering coupled local and global buckling[J]. Journal of the structure engineering (ASCE), 2017(143):1-10.
- [20] 宋福春, 苏洪仁. 单肋拱加劲 V 型撑刚构—连续梁桥稳定和动力性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(5): 849-854.  
(SONG Fuchun, SU Hongren. Research on the stability and dynamic characteristics of v-bracing rigid frame continuous beam bridge with single stiffener arch[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2010, 26(5):849-854.)
- [21] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计通用规范: JTGD60—2015 [S]. 北京:人民交通出版社, 2015.  
(Ministry of Transport of the People's Republic of China. General code for design of highway bridges and culvert: JTGD60—2015 [S]. Beijing: People's Transportation Press, 2015.)
- [22] 户东阳, 卢三平, 何旭辉, 等. 拱肋内倾角对大跨度钢箱提篮拱桥动力特性及地震响应影响的分析[J]. 中外公路, 2012, 32(6):137-142.  
(HU Dongyang, LU Sanping, HE Xuhui, et al. Analysis of influence of arch rib angle on dynamic characteristics and seismic response of long span steel box basket arch bridge[J]. Journal of China & foreign highway, 2012, 32(6):137-142.)
- [23] 戚原. 特大跨钢箱提篮拱桥稳定性分析[D]. 重庆:重庆交通大学, 2012.  
(QI Yuan. Stability analysis of the long span basket handle arch bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012.)
- [24] 方晓. 上承提篮式拱桥的稳定性及自振特性分析[D]. 兰州:兰州交通大学, 2015.  
(FANG Xiao. Deck arch bridge vibration characteristics of stability and vibration analysis [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015.)