

文章编号:1671-8879(2009)02-0051-05

## 拱肋内倾角对钢管混凝土拱桥静动力学的影响

黄平明,任翔,李文杰

(长安大学桥梁与隧道陕西省重点实验室,陕西西安 710064)

**摘要:**利用有限元程序,对不同拱肋内倾角的钢管混凝土拱桥在恒载作用下的静力、稳定性以及结构的自振特性进行了计算,分析了结构位移、内力、稳定安全系数和自振频率值与拱肋内倾角的关系。结果表明:拱肋内倾角增大,有效地提高了拱桥结构的面外稳定性和横向刚度,拱肋控制截面的弯矩和拱脚的水平推力也均有大幅度的减小,当拱肋内倾角为 $8^\circ$ 时,拱脚处弯矩和水平推力均达到最小值;但拱肋内倾角在 $3^\circ$ 以下、 $8^\circ$ 以上时,对拱肋横向刚度的影响较小;结构面内稳定、面内刚度、扭转刚度及拱肋控制截面的竖向位移受拱肋内倾角的影响较小。综合静、动力学分析结果来看,拱肋内倾角以 $8^\circ$ 为宜。

**关键词:**桥梁工程;拱桥;钢管混凝土;内倾角;力学

**中图分类号:**U448.22; U448.55 **文献标志码:**A

### Influence of leaning angle of arch rib on concrete-filled-steel-tube arch bridge's static and dynamic mechanics properties

HUANG Ping-ming, REN Xiang, LI Wen-jie

(Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** The static stress, stability and natural vibrating frequency of concrete-filled-steel-tube arch bridge with different arch rib leaning angles under constant load are calculated by finite element program. The relations of structural displacement, internal force, stable coefficient and natural vibrating frequency with leaning angles of arch rib are analyzed. The results show that: when the leaning angle of arch rib is increased, the structure's lateral stability and lateral stiffness can be increased effectively, and member moments in the middle span and horizontal force in the arch skew can be decreased greatly, and they will reach the minimum values when the leaning angle is  $8^\circ$ ; but when the leaning angle is below  $3^\circ$  or over  $8^\circ$ , to increase the leaning angle has little influence for increasing lateral stiffness; the changing of leaning angle also has little influence on arch stability, torsion rigidity and the vertical displacement of structure. The above analysis means that  $8^\circ$  is an appropriate value to arch rib from the views of static and dynamic mechanics. 3 tabs, 8 figs, 8 refs.

**Key words:** bridge engineering; arch bridge; concrete-filled-steel-tube; leaning angle; mechanics

收稿日期:2008-04-15

基金项目:国家自然科学基金青年项目(50808018)

作者简介:黄平明(1965-),男,湖北当阳人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:renxiang798@163.com.

## 0 引言

钢管混凝土拱桥是由组合材料集成的一种新型的结构形式。它利用钢管和混凝土两种材料在受力过程中的相互作用,使混凝土的强度得以提高,塑性和韧性大为改善;同时,混凝土的存在也使得钢管避免或延缓发生局部屈曲,可以保证其材料性能的充分发挥<sup>[1]</sup>。近十几年来,钢管混凝土拱桥的应用在中国得到迅速的发展,但随着钢管混凝土拱桥跨径的增大,横向稳定问题比较突出。当宽跨比较小的情况下,一般采用拱肋内倾的方式来提高整体横向稳定性<sup>[2-8]</sup>。因此,对内倾角的合理取值的研究极为重要。中国许多学者对钢管混凝土拱桥的静、动力学性能进行了研究,文献<sup>[1]</sup>认为大跨度钢管混凝土拱桥的面内基频一般较面外基频大,并建议采取适当的措施提高其横向刚度,以满足全桥的稳定性要求;文献<sup>[2]</sup>分析了大跨度拱桥在静风作用下的非线性稳定性,认为在静风作用下结构的局部失稳往往发生在整体失稳之前,失稳形式为空间弯扭失稳;文献<sup>[3]</sup>分析了上承式钢桁拱桥面内极限承载力,认为上承式钢桁拱桥的破坏始于拱脚下弦的屈服等。上述文献对用拱肋内倾来提高拱桥的稳定性问题研究较少,仅有文献<sup>[5]</sup>对钢管混凝土提篮拱力学特性进行了分析。因此,研究内倾角变化引起的提篮拱桥力学性能变化规律有助于该类桥型的研究。为此,本文以某跨径为 260 m 钢管混凝土提篮拱桥为例,计算分析不同拱肋内倾角度对结构力学特性的影响,以此来确定拱肋内倾角的合适取值范围。

## 1 计算分析基础

### 1.1 工程概况

如图 1 所示,某大跨径钢管混凝土提篮式拱桥主跨跨径为 260 m,矢高为 47.764 m,矢跨比为 1/5.443。两桁拱肋拱顶处拱轴线中心距 7 m,起拱点处拱轴线中心距 20.492 m;主拱肋线形采用悬链线。两桁拱肋均采用 4 根主钢管(内部填充 C50 微膨胀混凝土)形成,单桁拱肋为平行四边形,桁高 4 m(上、下弦杆中心距),桁宽 1.8 m(左、右侧弦管中心距),弦管外径为 0.8 m,壁厚分两种,拱脚段壁厚为 0.02 m,中间拱段壁厚为 0.014 m。拱肋为空腹拱,设上、下平联及腹杆均采用空心钢管,与弦杆焊接成整体。腹杆分直腹杆和斜腹杆。主拱肋上共设 7 道横撑,6 道“K”字形和 1 道“口”字形,横撑采用钢管桁架结构,与拱肋固结;主拱肋上共设 4 道拱上

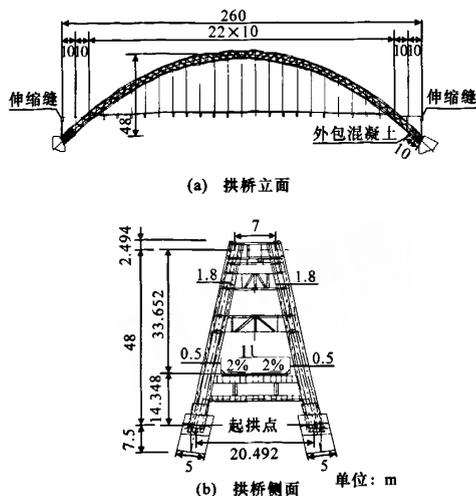


图 1 拱桥结构

横梁。1\* 横梁上设置拱上立柱,采用外径为 0.5 m,壁厚为 0.014 m 的圆形钢管,内填 C50 微膨胀混凝土,立柱下端与支承板周边焊接,上端伸入柱顶盖梁内;2\* 横梁与主拱肋固结,上部纵铺桥面纵梁;吊杆采用成品索。

### 1.2 基本假定

为了更好地反映拱肋内倾角对提篮拱力学性能的影响,对计算模型有以下基本假定:①横桥向两起拱点的距离不变;②倾角变化时,拱顶、拱脚和桥面宽度是变化的,但是与起拱点等高处的拱肋宽度保持不变;③拱肋间的横向联系方式不变,仅在宽度方向随肋间距离变化;④内倾角参数  $\theta$  从  $0^\circ$  变化到  $12^\circ$ ;⑤边界条件保持一致。

### 1.3 结构计算模型

在考虑横向作用和结构动力学性能时,钢管混凝土拱桥的计算一般采用空间杆系有限元方法。本文计算分析采用大型通用程序,计算模型以设计图为依据。主桥除吊杆采用杆单元模拟外,其余均采用梁单元模拟,桥面系采用梁格法模拟。全桥一共分为 800 多个节点,各类单元约 1 500 个,其中杆单元 42 个。本文建立的有限元模型如图 2、图 3(见下页)所示。

钢管混凝土构件在正常使用极限状态下的综合弹性模量、面积和惯性矩根据《钢管混凝土结构设计施工规程》给出,其计算公式为

$$E_{ac}A_c = E_cA_c + E_sA_s \quad (1)$$

$$E_{ac}I_{sc} = E_cI_c + E_sI_s \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可得

$$(E_cA_c + E_sA_s)I_{ac}/A_{ac} = E_cI_c + E_sI_s \quad (3)$$

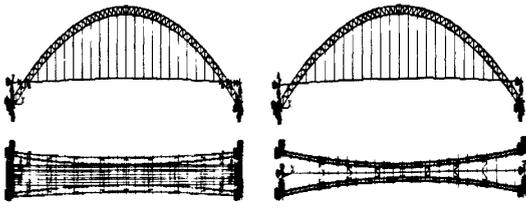


图 2 内倾角为 3°

图 3 内倾角为 8°

式中:  $E_{sc}A_{sc}$  为钢管混凝土压缩或拉伸刚度;  $E_{sc}I_{sc}$  为钢管混凝土弯曲刚度;  $E_c$  为混凝土弹性模量;  $A_c$  为混凝土的截面面积;  $I_c$  为混凝土的惯性矩;  $E_s$  为钢管弹性模量;  $A_s$  为钢管的截面面积;  $I_s$  为钢管的惯性矩;  $E_{sc}$  为钢管混凝土弹性模量;  $A_{sc}$  为钢管混凝土截面面积,  $A_{sc} = \pi D_c^2/4$ ;  $I_{sc}$  为钢管混凝土的惯性矩,  $I_{sc} = \pi D_c^4/64$ ,  $D_c$  为名义直径。

将  $A_{sc}$  和  $I_{sc}$  代入后可以求出名义直径  $D_c$ , 进而可以求出  $E_{sc}$ 。

钢管混凝土材料常数如表 1 所示。

表 1 钢管混凝土材料常数

构件	混凝土弹性模量/GPa	钢材弹性模量/GPa	截面面积/m <sup>2</sup>	组合弹性模量/GPa	组合密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
拱脚段	34.5	205	0.502 7	44.2	2 764
中间段	34.5	205	0.502 7	40.8	2 686
拱立柱	34.5	205	0.283 0	41.4	2 864

## 2 拱肋内倾角对拱桥静动力学的影响

### 2.1 拱肋内倾角对拱桥静力特性的影响

结构静力分析主要包括内倾角对结构位移、内力及稳定性的影响,且只考虑自重荷载,未考虑活载的影响。

#### 2.1.1 拱肋内倾角对结构竖向位移的影响

拱肋内倾角在不同的取值下,计算得到主拱肋跨中(1/2跨)、3L/4跨、L/4跨(L为主拱圈计算跨径)的竖向位移变化,如图 4 所示。

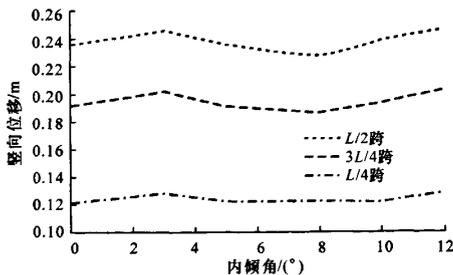


图 4 控制截面竖向位移随拱肋内倾角的变化

从图 4 可以看出,主拱肋跨中、3L/4跨、L/4跨的竖向位移随拱肋内倾角的变化曲线明显分为 3 个

区段:当内倾角从 0°变化到 3°时,结构竖向位移逐渐增大;当内倾角从 3°变化到 8°时,结构竖向位移逐渐减小;当内倾角从 8°变化到 12°时,结构竖向位移又有增大的趋势。且拱肋内倾角为 12°时,3L/4跨、L/4跨竖向位移最大;拱肋内倾角为 8°时,主拱跨中、3L/4跨、L/4跨竖向位移最小。

#### 2.1.2 拱肋内倾角对结构内力的影响

拱肋内倾角在不同的取值下,计算得到主拱内力变化如图 5、图 6 所示。

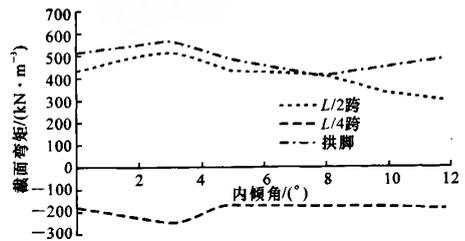


图 5 控制截面弯矩随拱肋内倾角的变化

由图 5 可知,当拱肋内倾角从 0°变化到 3°时,主拱肋跨中、L/4跨及拱脚的弯矩逐渐增大,且内倾角为 3°时,上述各截面的弯矩最大;内倾角从 3°变化到 12°时,1/2跨弯矩一直减小;内倾角从 3°变化到 5°时,L/4跨弯矩减小;当内倾角从 5°变化到 12°时,L/4跨弯矩变化较小;拱脚弯矩随内倾角从 3°变化到 8°时减小,从 8°变化到 12°时有增大的趋势,且拱脚在内倾角为 8°时产生最小弯矩。与平行拱相比,1/2跨弯矩和拱脚弯矩分别减少约 52%和 24%。

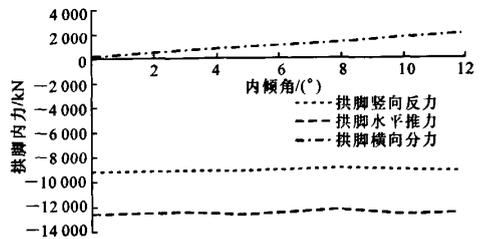


图 6 拱脚内力随拱肋内倾角的变化

由图 6 可见,当拱肋内倾角从 0°变化到 8°时,拱脚水平推力和竖向反力逐渐减小;当拱肋内倾角从 8°变化到 12°时,二者均有增大的趋势。内倾角为 0°时,拱脚水平推力和竖向反力有最大值;内倾角为 8°时,二者达到最小值,与平行拱相比,其值减小约 5%;而拱脚横向分力则随内倾角的逐渐增大而近似线性增大,与拱脚的水平推力和竖向反力值相比,拱脚的横向分力值小的多。

上述分析结果表明,与平行拱相比,拱肋内倾角为 8°时,拱顶、拱脚弯矩和拱脚水平推力均有大幅

度的减小。

### 2.1.3 拱肋内倾角对结构稳定特性的影响

根据线性屈曲理论,拱肋内倾角从 $0^\circ$ 变化到 $12^\circ$ 时,计算不同模型在恒荷载作用下的稳定安全系数如表2、图7所示。

表2 结构稳定安全系数随拱肋内倾角的变化

内倾角/ $^\circ$	0	3	5	8	10	12
面外稳定安全系数	2.913	3.920	3.541	4.104	4.614	5.214
面内稳定安全系数	8.778	7.573	8.791	9.017	8.600	8.086
扭转稳定安全系数	8.796	7.807	8.984	9.135	8.612	8.112

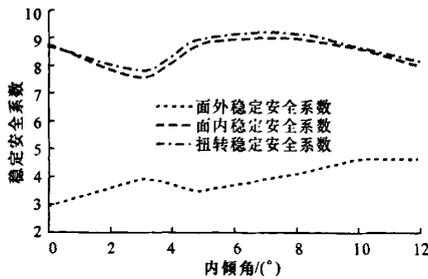


图7 结构稳定安全系数随拱肋内倾角的变化

由表2及图7可以看出,面外稳定安全系数随拱肋内倾角从 $0^\circ$ 变化到 $12^\circ$ 时逐渐增大,与平行拱相比,其最大提高幅度达79%。面内和扭转稳定安全系数随拱肋内倾角的变化大致分3个区间:当内倾角从 $0^\circ$ 变化到 $3^\circ$ 时,其值减小;当内倾角从 $3^\circ$ 变化到 $8^\circ$ 时,其值逐渐增大;当内倾角从 $8^\circ$ 变化到 $12^\circ$ 时,其值有减小的趋势。但面内和扭转稳定安全系数不论是增大还是减小,其变化幅度都比较小。

### 2.2 拱肋内倾角对拱桥动力特性的影响

不同拱肋内倾角对应的自振频率变化如表3和图8所示。

表3 结构自振频率随拱肋内倾角的变化

振型描述	不同内倾角( $^\circ$ )的自振频率/Hz					
	0	3	5	8	10	12
1阶主拱和桥面系侧弯振动	0.283	0.305	0.320	0.341	0.342	0.348
1阶主拱和桥面系竖弯振动	0.486	0.484	0.482	0.478	0.478	0.469
1阶主拱侧弯振动	0.563	0.632	0.625	0.670	0.720	0.735
1阶主拱和桥面系扭转振动	1.338	1.339	1.344	1.484	1.484	1.483

由表3和图8可以看出,当内倾角从 $0^\circ$ 变化到 $12^\circ$ 时,主拱与桥面系侧弯振动和主拱侧弯振动第1阶频率均随内倾角的增大而增大,且内倾角为 $12^\circ$ 时比平行拱对应的第1阶频率分别增大23%和31%。内倾角为 $3^\circ$ 时,主拱与桥面系侧弯振动和主拱侧弯振动第1阶频率比平行拱对应的第1阶频率仅增大7%和12%;内倾角为 $12^\circ$ 时,主拱与桥面系侧弯振动和主拱侧弯振动第1阶频率与内倾角为 $8^\circ$ 相比,

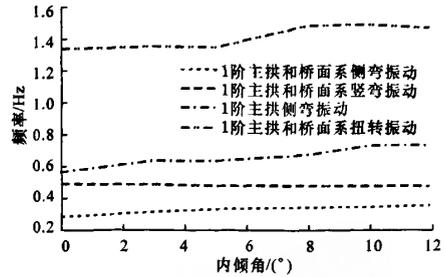


图8 结构自振频率随拱肋内倾角的变化

其值仅增大2%和9%。这表明,内倾角在 $3^\circ\sim 8^\circ$ 之间时,对拱肋的横向刚度影响较大;而内倾角在 $3^\circ$ 以下、 $8^\circ$ 以上时,对拱肋的横向刚度影响较小。空间扭转振动频率也随着内倾角的增大而增大,但是频率增量的幅度并没有面外侧弯振动显著,内倾角为 $12^\circ$ 时,第1阶空间扭转振动频率只比平行拱对应的频率增大11%;主拱与桥面系面内振动对应的第1阶振动频率却是随着内倾角的增大而减小,但是频率变化十分微小,与平行拱相比,内倾角为 $12^\circ$ 时,仅降低了3%。

## 3 结语

(1)拱肋内倾角可有效地提高钢管混凝土拱桥结构的面外稳定性和结构的横向刚度,但有一定的限度,当内倾角在 $3^\circ$ 以下、 $8^\circ$ 以上时,对拱肋的横向刚度影响较小。

(2)钢管混凝土拱桥结构的内力随拱肋内倾角的变化而变化,当内倾角为 $8^\circ$ 时,拱肋控制截面的弯矩和拱脚的水平推力均达到最小值。

(3)拱肋内倾角的变化对钢管混凝土拱桥结构的面内稳定性、竖向刚度和结构的竖向位移的影响比较小。

(4)综合静、动力学分析结果来看,拱肋内倾角以 $8^\circ$ 为宜。

### 参考文献:

#### References:

- [1] 韩艳,陈政清.茅草街大桥动力特性有限元模拟与分析[J].公路,2003(3):66-70.  
HAN Yan, CHEN Zhen-qing. Modeling and analysis of finite element of dynamic characteristics for Maocaojie bridge[J]. Highway, 2003(3): 66-70.
- [2] 陈峰,胡大琳.大跨径钢管混凝土拱桥非线性静风稳定性[J].长安大学学报:自然科学版,2006,26(2):42-46.  
CHEN Feng, HU Da-lin. Aerostatics stability of long-

- span concrete-filled steel tube arch bridge[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2006, 26(2): 42-46.
- [3] 赵灿晖. 上承式钢桁拱桥面内极限承载力分析[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(6): 80-85.  
ZHAO Can-hui. In-plane ultimate bearing capacity analysis of deck-type steel braced arch bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(6): 80-85.
- [4] 张阳, 邵旭东, 蔡松柏, 等. 大跨桁式钢管混凝土拱桥空间非线性有限元分析[J]. 中国公路学报, 2006, 19(4): 65-70.  
ZHANG Yang, SHAO Xu-dong, CAI Song-bai, et al. Spatial nonlinear finite element analysis for long-span trussed CFST arch bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 65-70.
- [5] 赵跃宇, 劳文全, 冯锐, 等. 内倾角对钢管混凝土提篮拱力学性能影响的分析[J]. 公路交通科技, 2007, 24(3): 56-58.  
ZHAO Yue-yu, LAO Wen-quan, FENG Rui, et al. Effects of leaning angle on concrete-filled steel tube X arch bridge's mechanical properties analysis[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(3): 56-58.
- [6] 胡庆安, 丁鹏程, 刘建新. 工序变化对钢管混凝土拱桥应力的影响[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(5): 54-57.  
HU Qing-an, DING Peng-cheng, LIU Jian-xin. Effect of different construction processes on steel-pipe-concrete arch bridge stress[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2006, 26(5): 54-57.
- [7] 涂光亚, 颜东煌, 邵旭东. 脱黏对桁架式钢管混凝土拱桥受力性能的影响[J]. 中国公路学报, 2007, 20(6): 61-66.  
TU Guang-ya, YAN Dong-huang, SHAO Xu-dong. Influences of depending on mechanical behavior of trussed concrete-filled steel tubular arch bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 2007, 20(6): 61-66.
- [8] Nazmy A S. Stability and load-carrying capacity of three-dimensional long-span steel arch bridges[J]. Computer and Structures, 1997, 65(6): 857-868.
- .....
- (上接第27页)
- [2] 郑健龙, 田小革, 应荣华. 沥青混合料热粘弹性本构模型的实验研究[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2004, 1(1): 1-7.  
ZHENG Jian-long, TIAN Xiao-ge, YING Rong-hua. A laboratory research on the thermo-viscoelastic constitutive model of bituminous mixture[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology; Natural Science Edition, 2004, 1(1): 1-7.
- [3] 延西利, 封晨辉, 梁春雨. 沥青与沥青混合料的流变特性比较[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2002, 22(5): 5-8.  
YAN Xi-li, FENG Chen-hui, LIANG Chun-yu. Comparison of mechanical behavior between bitumen and bituminous mix[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2002, 22(5): 5-8.
- [4] 黄卫东, 吕伟民. 沥青及沥青混合料流变性质与动稳定度的关系[J]. 同济大学学报, 2000, 28(增刊): 501-504.  
HUANG Wei-dong, LU Wei-ming. Relationship between rheological indexes and dynamic stability of rutting test[J]. Journal of Tongji University, 2000, 28(S): 501-504.
- [5] 周志刚, 傅博峰. 用粘弹性理论评价沥青混合料的高温稳定性[J]. 公路交通科技, 2005, 22(11): 54-56.  
ZHOU Zhi-gang, FU Bo-feng. Applying the theory of viscoelasticity to evaluate thermal stability of asphalt mixtures[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(11): 54-56.
- [6] 杜顺成, 戴经梁. 沥青混合料永久变形评价指标[J]. 中国公路学报, 2006, 19(5): 18-22.  
DU Shun-cheng, DAI Jing-liang. Permanent deformation evaluation index of asphalt mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(5): 18-22.
- [7] Witczak M W, Kaloush K, Pellinen T. Simple performance test for superpave mix design[R]. Washington DC: National Academy Press, 2002.
- [8] 沈金安. 沥青与沥青混合料路用性能[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [9] 邓学钧. 中国江阴长江大桥桥面沥青铺装层高温稳定性[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(2): 1-7.  
DENG Xue-jun. Asphalt pavement stability at high temperature for the Jiangyin bridge in China[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2002, 2(2): 1-7.
- [10] 张肖宁. 沥青与沥青混合料的粘弹性原理及应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.