



# 大跨度拱桥施工阶段的有限元数值分析\*

张丽萍<sup>1</sup>, 吴高峰<sup>2</sup>, 虞庐松<sup>2</sup>

(1. 兰州铁道学院 基础科学系, 甘肃 兰州 730070; 2 兰州铁道学院 土木建筑学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要 随着施工技术的发展, 拱桥的施工安全性是大跨度拱桥设计中的一个关键问题. 采用大型有限元分析程序 ANSYS 对大跨度拱桥施工过程中拱架、拱肋的静力及稳定性进行了分析计算, 为大跨度拱桥的施工安全提供了理论依据.

关键词 拱桥 稳定性 有限元 施工

中图分类号: U312.1

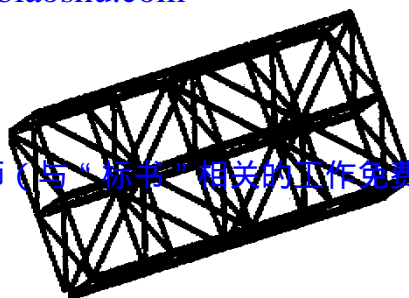
文献标识码: A

## 0 概 述

拱桥在竖向荷载作用下, 两端支承处不仅有竖向反力, 还将产生较大的水平推力. 正是这一水平推力, 使拱内产生强大的轴向力, 并能有效地减小跨中弯矩, 充分发挥主拱材料的强度, 增大跨越能力, 因此拱桥是我国公路上常用的一种桥梁型式. 拱桥的修建过去常采用支架施工法, 随着无支架施工技术的发展, 大跨度拱桥施工过程中的稳定性是否满足要求往往成为一个控制因素, 施工计算的重要性愈显突出. 本文研究的某大跨度拱桥先采用拱架法施工, 即先拼装拱架, 然后在拱架上浇注拱肋. 拱架采用万能杆件拼装形成空间桁架. 每片拱架横向宽度为 2 m, 高度为 4 m. 共 17 个预拼段经浮运后由缆索吊悬臂拼装而成.



a 拱架有限元模型



b 拱架标准节段杆件布置

图 1 拱型计算模型

斜杆:  $0.006\ 68\ \text{m}^2$  (7.5 号和 10 号角钢各 2 肢).

拱架在施工过程中所受荷载包括拱架自重、拱肋重量及施工荷载等, 拱架单位长度上的自重约为  $q_{\text{拱架}} = 18.88\ \text{kN/m}$ . 拱肋各节段的重量及施工荷载如图 2 所示, 其中:

$$q_1 = 54.159\ \text{kN/m}, q_2 = 39.016\ \text{kN/m}, q_3 = 44.605\ \text{kN/m}, q_4 = 41.524\ \text{kN/m};$$
$$q_1 = 43.479\ \text{kN/m}, q_2 = 39.553\ \text{kN/m}, q_3 = 37.018\ \text{kN/m}, q_0 = 7.0\ \text{kN/m} \text{ (模板重量)}$$

加载顺序为:  $q_0 \rightarrow q_1 \rightarrow q_2 \rightarrow q_3 \rightarrow q_4 \rightarrow q'_1 \rightarrow$

## 1 计算模型

拱架的各杆件采用 ANSYS 程序中的 LINK8 单元模拟, 按铰结空间桁架进行分析计算. 整个有限元模型中, 单元总数为 4 356 个, 如图 1a 所示. 标准节段的杆件布置如图 1b 所示.

拱架各杆件由肢数和型号不同的角钢构成, 分别采用以下三种截面:

立杆和横支撑:  $0.004\ 6\ \text{m}^2$  (4 肢  $75 \times 75 \times 8$  角钢).

上下弦杆:  $0.019\ 498\ \text{m}^2$  (8 肢  $120 \times 120 \times 10$  角钢).

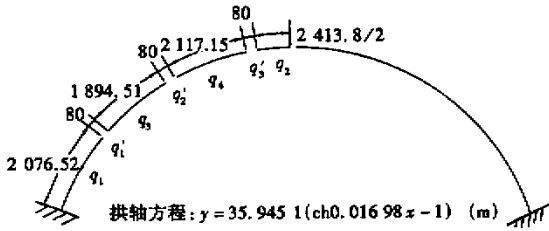


图2 拱架施工荷载 (单位: cm)

考虑到空间桁架模型上加载的难度和施工荷载的均匀性, 整体静力计算时按拱架自重的倍数施加全部荷载, 材料的容许应力按 140 MPa 设计。

## 2 拱架整体稳定计算<sup>[1]</sup>

对于第一类弹性稳定问题, 考虑轴向力影响的刚度矩阵

$$[K] = [K_0] + [K_\sigma] \quad (1)$$

式中  $[K_0]$  为单元的弹性刚度矩阵,  $[K_\sigma]$  为单元的几何刚度矩阵或在应力状态  $\{\sigma\}$  下的应力矩阵。

由结构的平衡方程  $([K_0] + [K_\sigma])\{\delta\} = \{Q\}$  可求得结构的位移:

$$\{\delta\} = ([K_0] + [K_\sigma])^{-1}\{Q\} \quad (2)$$

当外荷载从  $\{Q\}$  改变为  $\lambda\{Q\}$  时, 几何刚度矩阵  $K_\sigma$  也相应地改为  $\lambda[K_\sigma]$ , 于是有  $\{\delta\} = ([K_0] + \lambda[K_\sigma])^{-1}\lambda\{Q\}$ 。当  $|[K_0] + \lambda[K_\sigma]| = 0$  时, 位移  $\{\delta\}$  将趋向无穷大, 即结构丧失稳定性。因此, 稳定问题的有限元解可以归结为特征值问题的求解。

稳定计算中, 几何刚度矩阵  $K_\sigma$  与结构受力有关, 通常可采用单位荷载计算特征值, 失稳荷载即为特征值乘以单位荷载; 也可通过反复试算荷载直至特征值为 1, 此时试算荷载即为失稳荷载。本文采用拱架自重求得拱架整体稳定的前 5 阶特征值分别为 27.911, 54.694, 71.677, 82.681, 96.557, 一阶失稳模态如图 3 所示, 属面外失稳。

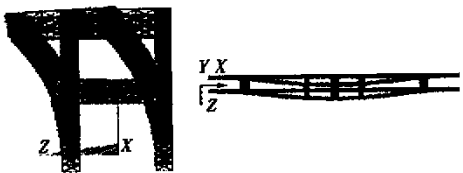


图3 整体拱架的第1阶失稳模态

拱架整体稳定计算表明, 当外荷载 (含自重) 均布于拱架上, 为拱架自重的 27.911 倍时整体结构才

失稳, 而实际外荷载约为拱架自重的 3.13 倍, 故拱架在所有外施工荷载作用下的安全系数为 8.6。拱架的整体稳定性满足要求<sup>[2]</sup>, 由于采用万能杆件按特定的方式进行拼接, 拱架各杆件的局部稳定性在应力满足容许应力的条件下可以得到满足。

## 3 拱架施工过程中的变形及稳定计算

按照实际施工过程, 计算从一节段到八节段悬臂施工的整个过程中拱架的变形、内力、应力。计算中只考虑了拱架重力, 未考虑斜向施工扣索。若还存在其它荷载, 对于线性分析, 只需将其余荷载作用下的计算结果迭加即可。

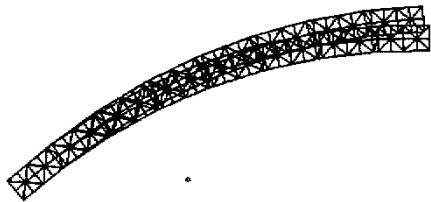


图4 8节段拱架在自重作用下的变形

按照前述稳定性分析理论, 采用拱架自重对拱架施工过程中的稳定性进行分析, 其中 8 节段拱架的前 5 阶特征值分别为: 24.733, 32.423, 35.728, 36.117, 40.899, 第一阶失稳模态如图 5 所示。



图5 8节段拱架的第1阶失稳模态

静力计算表明, 拱架杆件在悬臂施工过程中的应力在第 6 节段完成后将超过许用应力, 施工中应加入斜向扣索, 否则某些杆件会出现强度或局部失稳破坏。在保证杆件强度的前提下, 拱架在施工过程中的稳定性是有保证的。

## 4 拱肋的整体稳定计算

拱肋采用箱形截面, 底宽为 1.5 m, 箱高在拱脚处为 3.0 m, 拱顶处为 2.6 m, 箱内挖空面积为 1.2 m × 2.1 m, 且在全拱肋保持不变, 固定横梁采

截面,共 8 根横梁.采用 ANSYS 中的 BEAM 189 单元模拟.

采用拱肋自重计算得到其前 5 阶特征值分别为 12.989,22.154,45.510,47.617,49.078,其中前 4 阶为面外失稳模态,第 5 阶为面内失稳模态.如图 6 所示.

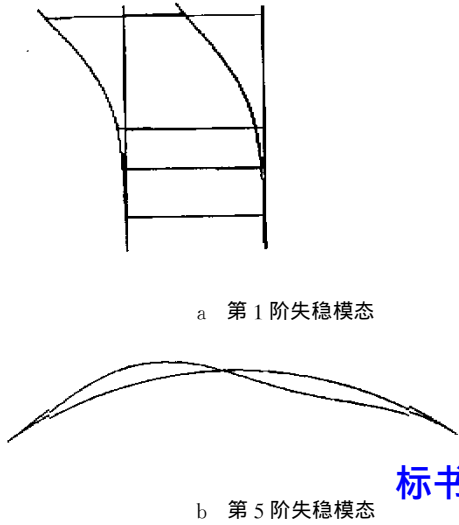


图 6 拱肋自重下的失稳模态

由于稳定计算时所施加荷载为一倍重力,故当外荷载(均布)为拱肋重力  $G$  的 11.989 倍时整体结构才失稳,结构的稳定安全系数约为 12.

考虑侧向荷载(如风载)作用下拱架和拱肋的稳定性分析可采用前述第 2 种方法:即在结构上施加实际风荷载,通过调整竖向荷载使得  $[K_0] + [K_s]$  的特征值为 1.经计算,由此计算的各阶特征值略有减小,拱架施工各阶段及拱肋的稳定性均能满足要求.

### 5 结论

1)拱架在分段施工过程中应加入斜向扣索.计算表明:在悬臂施工过程中(在第 6 节段完成后)某些杆件的应力将超过容许应力,出现强度不足或局部失稳破坏.加入斜向扣索后,拱架杆件的应力会相应降低,变形值减小.

2)在保证杆件强度安全的前提下,拱架在拼装施工过程中的整体稳定性是有保证的;选用 8 肢 120 角钢组成拱架的弦杆在拱肋施工过程中的稳定性满足要求.

3)采用上述截面的拱肋在拱架落架后的稳定性满足要求.

### 参考文献:

[1] 李国豪.桥梁结构稳定与振动[M].北京:中国铁道出版社,1992.  
 [2] JTG 021-89,公路桥涵设计规

标书网地址导航 [www.biaoshu.com](http://www.biaoshu.com)

## FEM Numerical Analysis in Constructing Phase of Long-Span Arch Bridges

Zhang Liping<sup>1</sup>, Wu Gaofeng<sup>2</sup>, Yu Lusong<sup>2</sup>

(1. Basic Science Department, Lanzhou Railway University, Lanzhou 730070, China;

2. Civil Engineering and Architecture College, Lanzhou Railway University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract** Safety during construction is the key problem in designing long-span arch bridges. Based on the finite element method, the paper gives a detailed analysis on static strength and stability of the arch scaffolding and arch rib during the construction of a long-span arch bridge. The results can provide a theoretical basis for the safety during constructing a long-span arch bridge.

**Key words** arch bridge; stability; FEM; construction