

基于有限元分析的特定拱形钢结构 承载能力影响因素研究

苗莉娟, 赵海凤

(浙江建设职业技术学院建筑工程系, 浙江 杭州 311231)

摘 要:建立拱形钢结构有限元计算模型,通过数值分析的方法找出特定拱形钢结构在主拱结构刚度、主拱支座边界约束刚度、主拱使用环境温度等不同影响因素作用下主拱内力和拱支座位移的变化规律。指出温度应力是影响拱形钢结构承载能力的关键因素,并提出减少或释放温度应力的措施。

关键词:拱形钢结构;承载能力影响因素;拱刚度;拱支座边界约束刚度;温度差

中图分类号:TU 312

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2013)06-0870-05

随着我国经济和工程技术水平的快速发展,大跨度公共建筑日益增多,其结构形式也丰富多彩^[1]。拱形钢结构是众多结构形式中的一种,常应用于大跨度体育场馆项目中,如沈阳奥体中心体育场^[2]、山东潍坊奥体中心体育场^[3]、宁夏中卫体育馆等,其主拱跨度分别为 360 m、300 m 和 150 m。

拱形钢结构不仅能提供较大的跨度,并且其主拱弦杆内力以轴向压力为主,能够使构件截面的承载能力得到充分发挥,减少工程用钢量,因而被广大结构设计人员采用^[4-6]。在拱形钢结构的工作过程中,有许多因素会影响其承载能力,主要有主拱的矢跨比、主拱的刚度^[7]、支座约束^[8]、使用环境温度变化^[9]等。设计人员对结构进行设计优化时,应当充分考虑这些因素对结构的影响,并了解各种因素对结构承载力的影响规律,这样有助于设计人员理清优化思路,增加优化的针对性,减少优化的盲目性。本文主要对矢跨比为定值的拱形钢结构的主拱刚度、主拱支座边界约束刚度和环境温度变化对承载能力的影响进行研究,旨在为结构设计人员在拱形钢结构优化设计中做一些参考。主拱的矢跨比一般受建筑外形及使用功能的限制,设计时优化的空间较小,故对矢跨比这一承载力影响因素不做研究。

1 特定拱形钢结构承载能力影响因素的作用机理

不同的影响因素,其影响拱形钢结构承载能力的作用机理不同。正确认识各影响因素的作用机理有助于拱形钢结构的优化设计。

环境温度的变化是一个客观存在的自然现象,随时随地发生着随机的变化。传统的拱形钢结构的两端常固结或铰接于与大地相连的基础之上,温度的变化必将使拱形钢结构的长度发生改变,当拱形钢结构在改变其长度过程中受到约束时,拱的内部将产生温度应力^[9],该应力的存在会影响拱形钢结构的承载能力。

从前述可以看出,温度应力是因拱形钢结构的支座阻碍了结构的自由变形而产生的,改变支座的约束刚度将改变支座对拱形钢结构的约束能力^[8,10],即改变了拱形钢结构自由变形的能力,拱形钢结构的内力也将同时发生改变。

拱的外形一般为单一圆、三心圆或抛物线等。当拱形钢结构受到环境温度的变化时,其长度往往随着温度的升降而增减。当长度的增减受到边界支座的阻碍时,拱形钢结构本身会自动调整其矢高来达到释放温度应力的目的。拱的刚度及支座刚度不同,其释放温度应力的能力也会不同^[7],其原理类似于供

收稿日期:2013-05-20 修改稿日期:2013-12-03

基金项目:浙江省教育厅资助项目(Y201225885)

作者简介:苗莉娟(1971-),女,河北邢台人,高级工程师,主要从事大跨度钢结构方面研究。

热管道的温度变形调节器.

2 特定拱形钢结构的有限元分析模型

本文采用数值分析的方法对特定拱形钢结构承载能力的影响因素进行研究. 拱形结构的截面形式有格构式和实腹式两种, 本文以实腹式拱形结构作为研究对象, 其有限元分析模型见图 1. 该计算模型由两个单跨拱及其之间的连系杆构成, 拱与连系杆之间刚性连接, 拱的计算跨度为 200 m, 矢高为 15 m. 拱的计算边界如图 2 所示, 为了便于得到与边界刚度相对应的拱的轴向内力, 在拱与基础之间设置 3 根二力连杆, 其中连杆 1 位于 XOZ 平面内并且垂直于连杆 2、连杆 3 形成的平面, 连杆 2 的方向与 y 轴相同, 连杆 3 在 XOZ 平面内并且与拱轴线相切, 连杆 1、连杆 2、连杆 3 的一端铰接于支座 O 处(拱轴线也位于 XOZ 平面内), 另一端铰接固定. 应用该计算模型, 只需计算连杆 1、连杆 2、连杆 3 在各种不同工况下的轴力, 根据节点 O 的平衡方程即可得出: 支座处的剪力等于连杆 1、连杆 2 的轴力, 支座处主拱的轴力等于连杆 3 的轴力, 通过该方法可将求拱轴力的问题转换为求连杆 3 的轴力的问题进行研究.

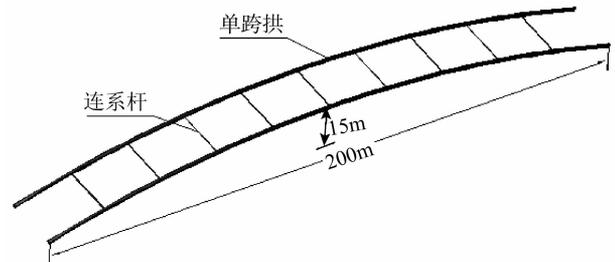


图 1 计算模型三维图

Fig. 1 3D calculation model

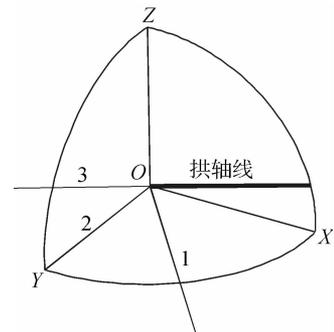


图 2 计算模型边界图

Fig. 2 Calculation model for border

根据前述分析, 本研究共涉及三个变量, 即环境温度差、拱支座边界约束刚度、主拱结构自身刚度. 这三个因素中任何一个或多个因素的变化都将影响到拱形钢结构的承载能力. 主拱结构自身刚度的变化采用改变主拱材料弹性模量的方式来实现. 为了详细分析每个影响因素对拱形钢结构承载能力的影响程度, 每次有限元分析均假定只有一个影响因素发生改变而其他的两个因素不变, 各变量及其参数取值见表 1 所示.

本次研究共进行了 1 015 个模型的分析计算, 通过研究在上述影响因素变化的情况下, 主拱的弦杆内力和支座位移量的变化规律, 从而得到拱形钢结构承载能力的变化规律.

表 1 变量及其参数

Tab. 1 Variables and parameters

变量名称	变量值						
温度差/°C	0	5	10	15	20	25	30
	10 300	14 832	20 188	26 368	33 372	41 200	92 700
支座边界约束刚度 /N · mm ⁻¹	164 800	257 500	370 800	504 700	659 200	834 300	1 030 000
	1 246 300	1 483 200	1 740 700	2 018 800	2 317 500	2 636 800	2 976 700
	3 337 200	3 718 300	4 120 000	4 542 300	4 985 200	5 448 700	5 932 800
	103 000 000						
主拱结构弹性模量 /N · mm ⁻²	2.06 × 10 ⁵	2.06 × 10 ⁶	2.06 × 10 ⁷	2.06 × 10 ⁸	2.06 × 10 ⁹		

3 不同影响因素作用下特定拱形钢结构的弦杆内力及支座位移

3.1 温度和主拱结构弹性模量不变(弹性模量取 2.06 × 10⁵ N/mm²), 仅支座边界约束刚度发生变化

主拱的弦杆内力在支座边界约束刚度 257 500 N/mm 以前, 随着支座边界约束刚度的增大而不断增大, 前期增加较快, 后期增加较慢; 而在 257 500 N/mm 以后, 主拱的弦杆内力几乎不再随支座边界约

束刚度的变化而发生改变(见图 3 所示). 而主拱支座的位移在 257 500 N/mm 以前是随着支座边界约束刚度的增大而不断减小, 前期减小较快, 后期减小较慢; 而在 257 500 N/mm 以后, 主拱支座的位移几乎不再随支座边界约束刚度的变化而发生改变(见图 4 所示).

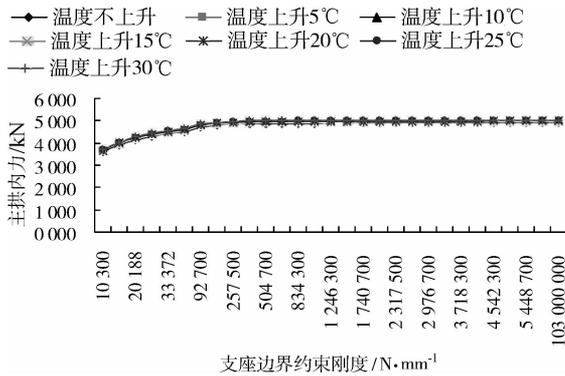


图 3 主拱弦杆内力(支座边界约束刚度由小到大)

Fig. 3 Main arch internal force of chords
(Boundary restraint stiffness of support increase)

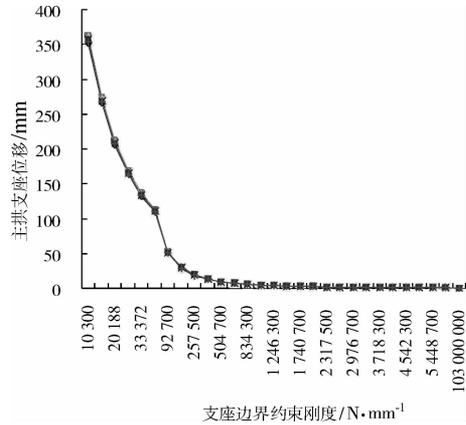


图 4 支座位移(支座边界约束刚度由小到大)

Fig. 4 Support displacement
(Boundary restraint stiffness of support increase)

3.2 温度(温度差取 10℃)和支座边界约束刚度不变, 仅主拱结构弹性模量发生变化

主拱弦杆内力在支座边界约束刚度 370 800 N/mm 以前, 随着主拱结构弹性模量的增大而不断减小, 但减小的幅度很缓慢; 在 370 800 N/mm 以后, 主拱弦杆内力随着主拱结构弹性模量的增大而不断增大, 特别是在主拱结构弹性模量 2.06×10^7 N/mm² 之后主拱刚度越大, 增长越迅速(见图 5 所示). 支座位移在支座边界约束刚度 370 800 N/mm 以前, 随着主拱结构弹性模量的增大而不断减小, 特别是在主拱结构弹性模量 2.06×10^7 N/mm² 之前, 主拱刚度越小, 减小越迅速; 而在 370 800 N/mm 以后, 随着主拱结构弹性模量的增大而不断增大, 但增大较缓慢(见图 6 所示).

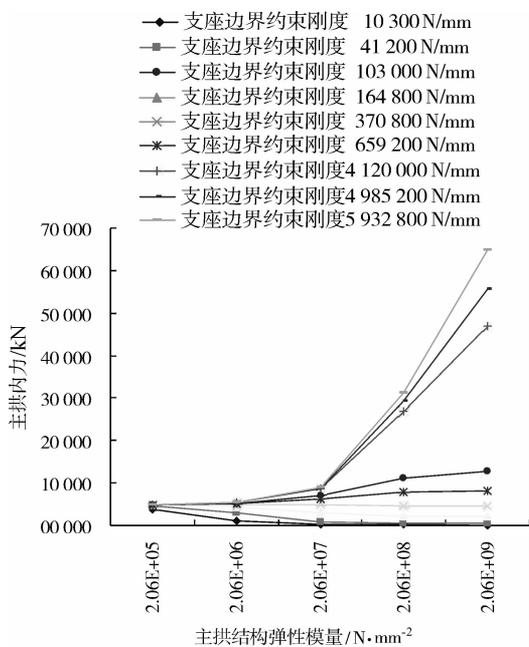


图 5 主拱弦杆内力(支座边界约束刚度由小到大)

Fig. 5 Main arch internal force of chords
(Elastic modulus of main arch structure from small to big)

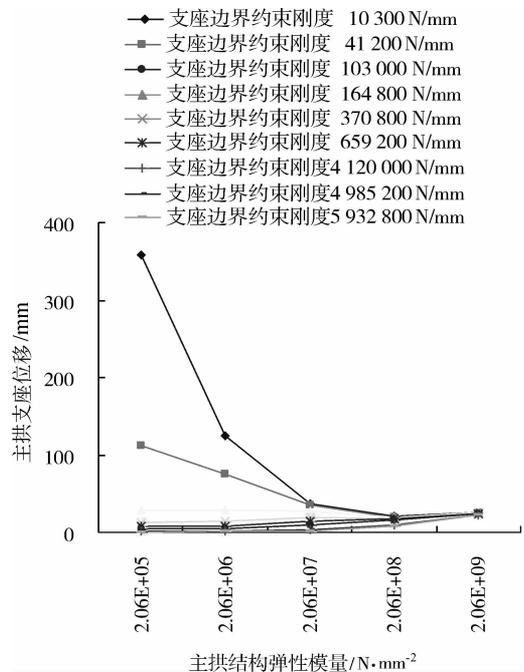


图 6 支座位移(支座边界约束刚度由小到大)

Fig. 6 Support displacement
(Elastic modulus of main arch structure from small to big)

3.3 支座边界约束刚度和主拱弹性模量不变 (取 $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$), 仅温度发生变化

主拱弦杆内力随着温度的升高而不断增大,且支座边界约束较大时,内力也较大(见图 7 所示). 主拱支座的位移随着温度的升高而不断增大,且支座边界约束较小时,位移较大;当支座边界约束刚度超过 $1\ 030\ 000 \text{ N/mm}$ 时,主拱支座的位移几乎不再随温度的变化而发生改变(见图 8 所示).

4 有限元计算结果分析

从图 3、图 4 可以看出,支座边界约束刚度对主拱内力及支座位移将产生影响. 当环境温度差及主拱刚度一定时,随着支座边界约束刚度的增大,支座约束了拱随温度升高而发生自由伸长的能力,拱的内力也随之增大;同时,阻止拱支座产生位移的能力越来越大,支座的位移也将随之减小. 当支座边界约束刚度继续增加接近无穷,此时支座约束接近刚性,拱弦杆内力最大,支座位移最小.

从图 5、图 6 可以看出,主拱弦杆内力及支座位移,不但与主拱结构刚度有关,而且与支座约束刚度有关. 当支座约束刚度较小时,随着主拱的刚度逐渐加大,拱弦杆内力和支座位移均逐渐减小,但内力减小较缓,位移减小较多. 当支座约束刚度较大时,随着主拱的刚度逐渐加大,拱弦杆内力和支座位移均逐渐增加,但内力增加较多,位移增加较缓.

从图 7、图 8 可以看出,环境温度的变化对拱的内力及支座位移将产生影响. 当支座边界约束刚度和主拱结构刚度不变时,随着温度的升高,拱将伸长,但由于支座的约束作用,拱的长度不能自由变化,导致其内力随之增加,同时,支座位移也将增加,当支座边界约束刚度接近无穷时,支座位移接近于 0.

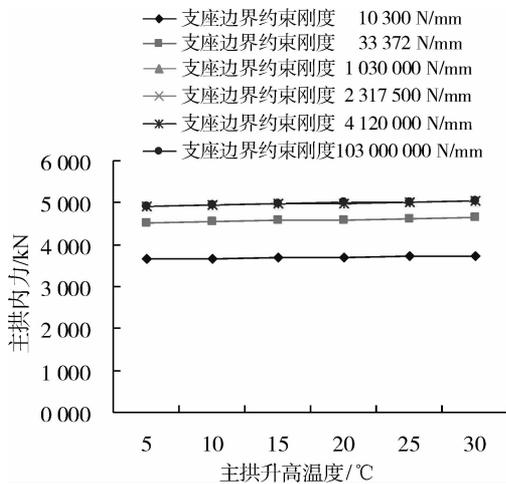


图 7 主拱弦杆内力(温度升高)

Fig. 7 Main arch internal force of chords (Temperature increases)

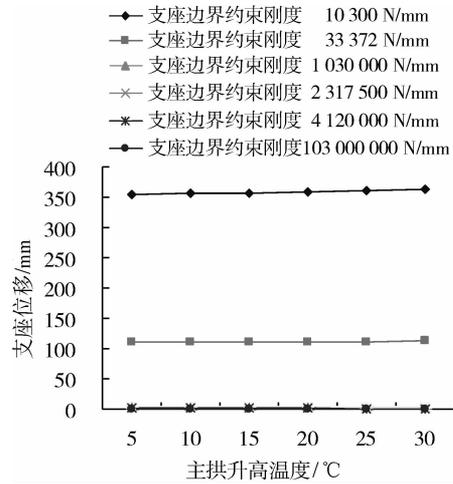


图 8 支座位移(温度升高)

Fig. 8 Support displacement (Temperature increases)

5 结 语

根据以上计算分析可以看出:拱的刚度、拱的支座边界约束刚度以及环境温度变化对拱的承载能力均有较大的影响. 在三个影响因素中,温度是主因,拱的刚度以及拱支座边界约束刚度对拱结构承载能力的影响是以拱结构对温度作用释放程度来体现的,释放的温度应力越多对结构的承载能力越有利. 既然温度作用不可避免,在具体应用时,可以采用一些有效的措施来降低温度对钢拱结构的不利影响,如避免阳光直接照射,涂刷浅色防火涂料,在满足结构承载能力及变形能力要求的前提下尽量降低拱结构及其支座边界约束刚度等,均可达到降低温度应力、提高拱结构承载能力的目的.

参考文献 References

[1] 蓝 天. 空间钢结构研究与应用的进展[J]. 建筑钢结构进展, 2004, 6(1): 1-6.
LAN Tian. Advances in research and application of steel spatial structures[J]. Progress in Steel Building Structures, 2004, 6(1): 1-6.

- [2] 马卫国,潘杰,刘欢. 沈阳奥体中心体育场主拱墩基础水平位移监测[J]. 黑龙江科技信息,2008(24):261.
MA Wei-guo,PAN Jie,LIU Huan. Horizontal displacement monitoring for Pier foundations of main Arch of the main stadium of Shenyang Olympic sports center [J]. Heilongjiang Science and Technology Information,2008(24):261.
- [3] 李振谭,朱宝喜,李杰. 大跨度钢管桁架钢结构监理控制要点[J]. 建设管理,2010(10):79-80.
LI Zhen-tan,ZHU Bao-xi,LI Jie. Supervision controls points of large span steel-pipe arch truss steel structure [J]. Project Management,2010(10):79-80.
- [4] 郭彦林,窦超. 我国拱形钢结构设计理论研究现状与展望[J]. 建筑结构学报,2012,33(7):1-17.
GUO Yan-lin,DOU Chao. Research status and expectation of design theory of steel arch structure in China [J]. Journal of Building Structures,2012,33(7):1-17.
- [5] 王小惠. 桁架拱结构的截面优化与程序[D]. 山东:山东大学,2007.
WANG Xiao-hui. Sectional optimization and procedures on steel truss arch structure [D]. Shandong; Shandong University,2007.
- [6] JGJ/T 249-2011 拱形钢结构技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
JGJ/T 249-2011 Technical specification for Steel Arch Structure [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [7] 韦建刚,陈宝春,彭桂瀚. 钢管混凝土单圆管拱刚度取值对静力计算的影响[J]. 公路交通科技,2004,21(11):47-51.
WEI Jian-gang,CHEN Bao-chun,PENG Gui-han. Analysis of Rigidity of Concrete Filled Steel Tubular (Single tube) Arch [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2004,21(11):47-51.
- [8] 杨永华,陈乙一. 支座约束对钢拱弯扭屈曲荷载的影响[C]//第六届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 北京:工业建筑杂志社,2006. 1378-1380.
YANG Yong-hua,CHEN Yi-yi. Support constraint effect on flexural-torsional buckling load of steel arch [C]//The sixth national conference on structural engineering. Beijing: Industrial Construction magazine, 2006,1378-1380.
- [9] 边广生. 空间结构温度效应理论分析与试验研究[D]. 南京:东南大学,2004.
BIAN Guang-sheng. A dissertation submitted to southeast university for the academic degree of master of engineering [D]. Nanjing: Southeast University,2004.
- [10] 童根树,杨洋. 集中荷载下水平弹性约束圆弧拱的屈曲分析 [J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2010,42(2):163-168.
TONG Gen-shu,YANG Yang. In-plane buckling analysis of the horizontal spring circular arch under concentrated load at the mid-span [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.; Natural Science Edition,2010,42(2):163-168.

Study on the factors affecting the bearing capacity of arched steel structure based on the finite element analysis

MIAO Li-juan, ZHAO Hai-feng

(Zhejiang College of Construction, Hangzhou 311231, China)

Abstract: A finite element calculation model is established for arched steel structure. When affected by factors such as main arch's structural stiffness, boundary restraint stiffness of support, and environmental temperature, variety laws of main arch internal force and arch support displacement were found out. Temperature stress proves to be the critical factor to the bearing capacity of arched steel structure. Measures which can reduce or release temperature stress were also suggested.

Key words: arched steel structure; factors affecting the bearing capacity; arch stiffness; boundary restraint stiffness of support; temperature contrast