

Analysis of Influence of Temperature Stress on Bolted Ball Reticulated Shell Structure

Wenpeng Huang, Honggang Lei*

School of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi
Email: *lhgang168@126.com

Received: Mar. 3rd, 2019; accepted: Mar. 20th, 2019; published: Mar. 27th, 2019

Abstract

The interaction between the bolt-and-ball shell structure and its supporting structure is often very complicated. Therefore, the overall modeling analysis should be considered when considering the interaction between the two. In addition to the routine analysis and overall analysis of the bolt-and-ball shell structure, a supplementary analysis of the temperature stress is required. In this paper, the finite element analysis software Midas gen is used to measure the length of different bolt-and-wire shell structures (120 m, 168 m, 200 m), different lower reinforced concrete structures (3 m, 6 m, 9 m) and different lower support structures (fixed hinges) under temperature stress. The bolt ball net shell structure model of the seat, the elastic support and the overall model are compared and analyzed. By comparing the influence of different models and temperature stress on the reticulated shell structure, the appropriate bearing structure and the elastic stiffness of the bearing are selected to reduce or eliminate the adverse effects of temperature on the structure.

Keywords

Bolt Ball Net Shell Structure, Overall Analysis, Temperature Stress, Bearing Stiffness

温度应力对螺栓球网壳结构的影响分析

黄文鹏, 雷宏刚*

太原理工大学, 建筑与土木工程学院, 山西 太原
Email: *lhgang168@126.com

收稿日期: 2019年3月3日; 录用日期: 2019年3月20日; 发布日期: 2019年3月27日

*通讯作者。

摘要

螺栓球网壳结构与其支承结构之间的相互作用影响往往十分复杂, 因此对结构模型分析时应考虑两者之间相互作用的影响而进行整体建模分析。对于螺栓球网壳结构除需进行常规分析及整体分析外, 还需要做温度应力的补充分析。本文利用有限元分析软件Midas gen对温度应力作用下不同螺栓球网壳结构长度(120 m、168 m、200 m)、不同下部钢筋混凝土结构高度(3 m、6 m、9 m)、不同下部支承结构(固定铰支座、弹性支座、整体模型)的螺栓球网壳结构模型进行对比分析。通过对比不同模型及温度应力作用对网壳结构的影响, 选择出合适的支座结构以及支座弹性刚度来减少或者消除由温度作用对结构产生的不利影响。

关键词

螺栓球网壳结构, 整体分析, 温度应力, 支座刚度

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国经济的快速发展, 社会对能源的需求不断增长, 电力、煤炭等行业中的储煤仓结构得到很大的发展与应用。由于螺栓球网壳结构具有很好的受力性能、工厂化机械加工和现场拼装性能, 以及在经济性、施工周期、安全性等方面的优越性, 使得螺栓球网壳结构逐渐成为了大型储煤仓结构的主要形式[1] [2]。由于储煤仓结构的工艺要求高、结构跨度大、设计和施工难度大, 因而需要充分重视对储煤仓结构力学性能的分析研究。

大跨度屋盖结构应考虑构件变形、支承结构位移、边界约束条件和温度变化等对其内力产生的影响, 同时可根据结构的具体情况采用能适应变形的支座释放附加内力[3] [4]。螺栓球网壳结构支座的约束刚度大小与因温度作用而产生的温度应力的的大小成正比。约束刚度越大, 结构因温度变化而产生的应力也就越大, 在支座区域的温度应力不容忽视[5]。因此, 在设计阶段温度作用应当引起结构工程师的高度重视。

由于结构设计分工的原因, 常把上部屋盖结构与下部混凝土结构分开来考虑, 用固定铰支座去模拟螺栓球网壳结构的边界支承条件, 这显然是不妥的[6]。由此造成的结果将是结构安全上的不可靠和巨大的经济浪费[7]。本文以某大型储煤仓项目为研究对象, 利用有限元分析软件 Midas gen 对温度作用下不同长度(120 m、168 m、200 m)、不同下部结构高度(3 m、6 m、9 m)、不同下部支承结构(固定铰支座、弹性支座、整体模型)的螺栓球网壳结构模型进行对比分析。

2. 工程概况

1) 工程背景

该工程的上部屋盖结构为三心圆柱面网壳结构, 下部支承结构为钢筋混凝土柱结构。屋盖结构的平面尺寸为 117 m × 168 m, 网壳结构的厚度为 3 m, 网壳结构的高度约为 42.5 m, 带天窗高度约为 45.5 m。网格形式为正放四角锥形式, 节点形式为螺栓球节点, 屋面板为压型钢板, 支撑方式为周边多点支承。本工程抗震设防烈度: 7 度(0.10 g), 设计地震分组: 第三组; 场地类别: II 类。本地区基本风压: 0.40 kN/m²。

本地区基本雪压: 0.35 kN/m^2 。结构的杆件为 Q235 无缝钢管, 设计优化后取 9 种不同的钢管截面, 最大钢管截面为 $\phi 219 \times 16 \text{ mm}$, 最小钢管截面为 $\phi 75.5 \times 3.75 \text{ mm}$ 。结构示意图如图 1~3。

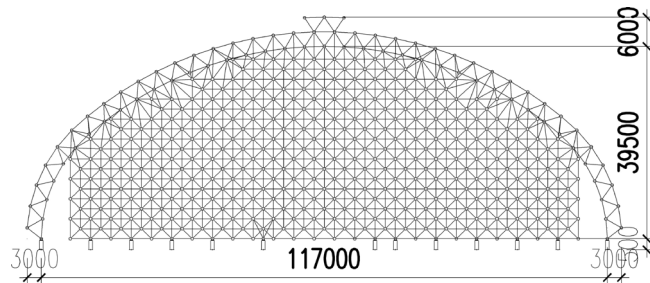


Figure 1. Structure right view
图 1. 结构右视图

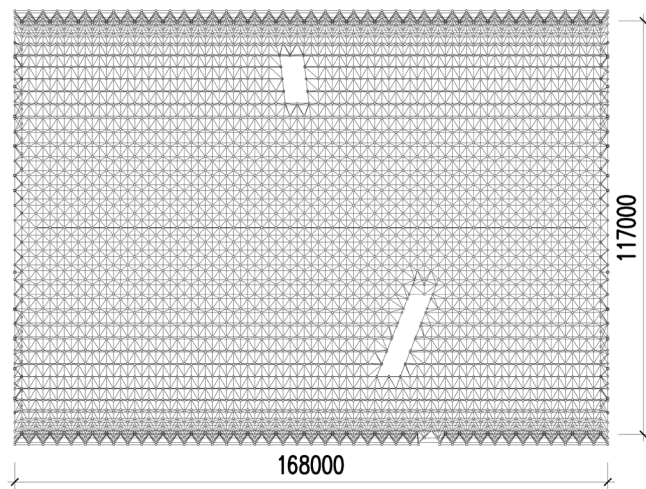


Figure 2. Structure top view
图 2. 结构俯视图

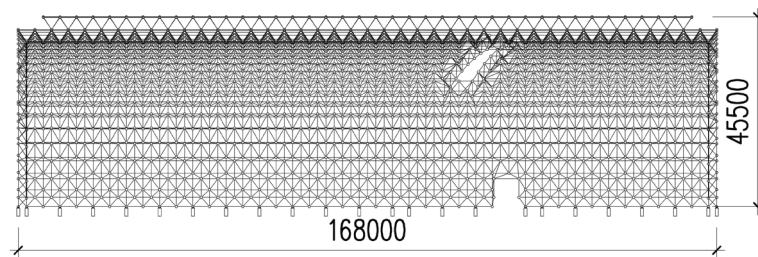


Figure 3. Structure front view
图 3. 结构正视图

2) 设计荷载

上弦: 静载标准值: 0.3 kN/m^2

活载标准值: 0.5 kN/m^2

下弦: 静载标准值: 0.1 kN/m^2

3) 温度作用

温度作用以该螺栓球网壳结构的合拢温度为基准, 螺栓球网壳结构的温度效应应考虑温升和温降[8]。

该工程以阳泉地区年平均最高和最低温度为参考, 选择温升 $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$

4) 荷载组合

组合 1: $1.2 \times \text{恒载} + 1.4 \times \text{活载}$

组合 2: $1.2 \times \text{恒载} + 1.4 \times \text{活载} + 1.4 \times \text{温度升}$

组合 3: $1.2 \times \text{恒载} + 1.4 \times \text{活载} + 1.4 \times \text{温度减}$

5) 边界支承条件

边界支承条件的选择对螺栓球网壳结构的计算结果有很大的影响。因此, 在螺栓球网壳结构的整体设计中, 应当特别注意边界支承结构的设计与验算。因为这不仅会影响网壳结构设计的结果, 而且会对工程造价有非常大的影响。该工程的边界支承条件为图 4, 图 5 所示结构。

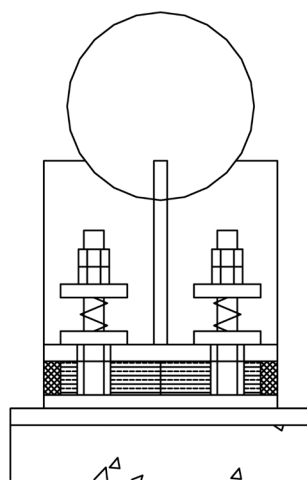


Figure 4. Tablet support

图 4. 平板支座

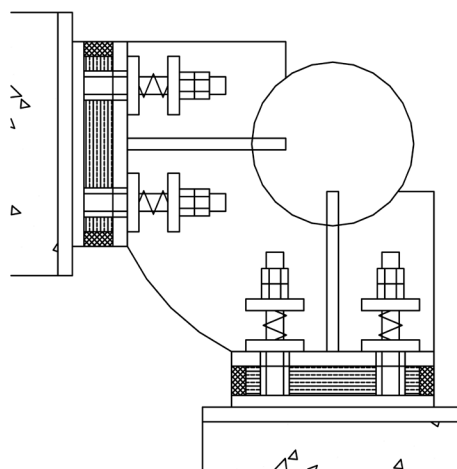


Figure 5. Two-way plate rubber bearing

图 5. 双向板式橡胶支座

3. 结构计算模型

该项目使用通用有限元分析软件 Midas gen 进行结构的整体建模和分析。整体模型如图 6 所示。在建模过程中用桁架单元模拟三心圆柱面网壳结构, 用梁单元模拟钢筋混凝土柱结构。建模过程中忽略杆件

连接节点的刚度, 假设节点的连接为铰接, 荷载都作用在连接节点上。多年来, Midas gen 已被世界各地的大中型工程项目所采用。对于螺栓球网壳结构, 除常规分析和整体分析外, 常需做温度应力补充分析、屈曲分析、线弹性时程分析, Midas gen 都可以实现, 且可以说是完美实现。

本工程螺栓球网壳结构的边界支撑结构简化为模型一(边界支承结构简化为固定铰支座)、模型二(边界支承结构简化为弹性支座), 并把计算的结果与整体模型[9] (上部屋盖结构和下部钢筋混凝土柱结构整体建模)进行对比分析。

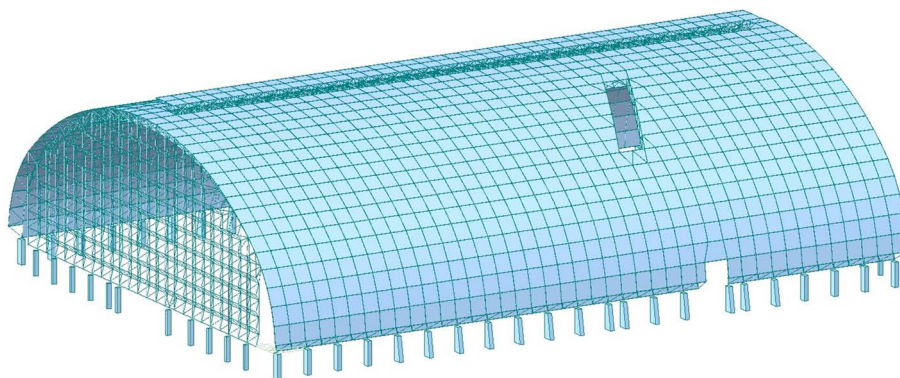


Figure 6. Overall model
图 6. 整体模型

4. 结构模型分析

1) 不同长度的螺栓球网壳结构模型的温度影响分析

对于螺栓球网壳结构不仅需要进行常规分析和整体分析, 还需要对网壳结构进行温度应力的分析。

表 1 分析了温升 30 ℃ 作用下, 120 m 和 200 m 的螺栓球网壳结构模型与 168 m 螺栓球网壳结构模型的最大杆件轴力和位移的变化情况。

Table 1. The change of axial force and displacement of the largest rod
表 1. 结构最大杆件轴力和位移的变化情况

结构模型	120 m	168 m	200 m
杆件轴力	-242.69	-269.12	-287.86
位移	37.6	42.07	43.43

由表 1 可知, 随着螺栓球网壳结构模型长度的增加, 在温度作用下结构产生的杆件轴力和位移也在不断增加。120 m 结构模型的杆件轴力比 168 m 的结构模型降低约 10.9%, 200 m 的结构模型杆件轴力比 168 m 的结构模型增加约 7%。由于温度作用对螺栓球网壳结构的杆件轴力和位移有影响, 因而需要采取一定的措施来释放温度作用对螺栓球网壳结构产生的影响。

2) 不同温度值作用对不同高度的钢筋混凝土柱的螺栓球网壳结构的对比分析

对三种不同高度(3 m、6 m、9 m)的钢筋混凝土柱的螺栓球网壳结构在不同温度应力作用下的最大内力和最大位移对比分析。

由图 7, 图 8 可以看出钢筋混凝土柱结构越高, 不同温度值作用产生的内力越小。不同钢筋混凝土柱结构的高度对网壳结构的最大位移影响差异并不明显。这是因为钢筋混凝土柱结构越高, 钢筋混凝土柱结构的刚度就越低, 导致整体模型的刚度也越低, 所以不同温度作用产生的内力就越小。因此, 钢筋

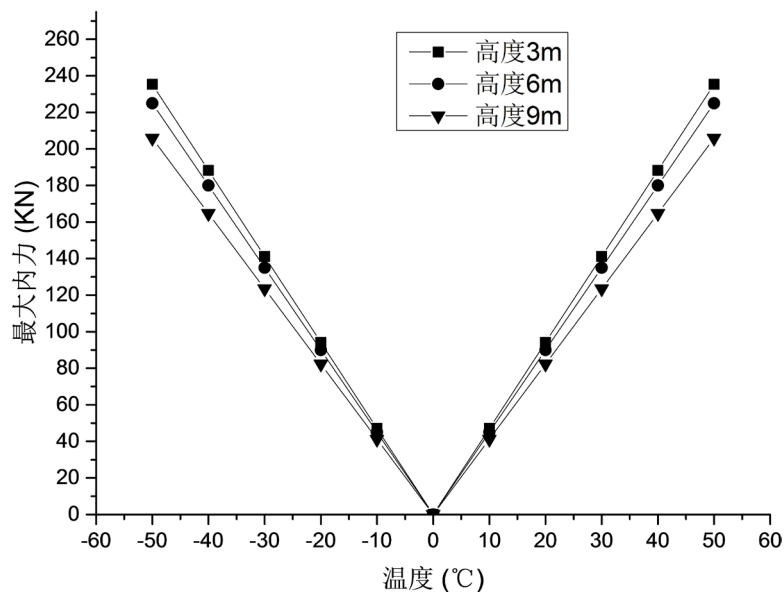


Figure 7. Maximum internal force of structure acting at different temperature values

图 7. 不同温度值作用的结构最大内力

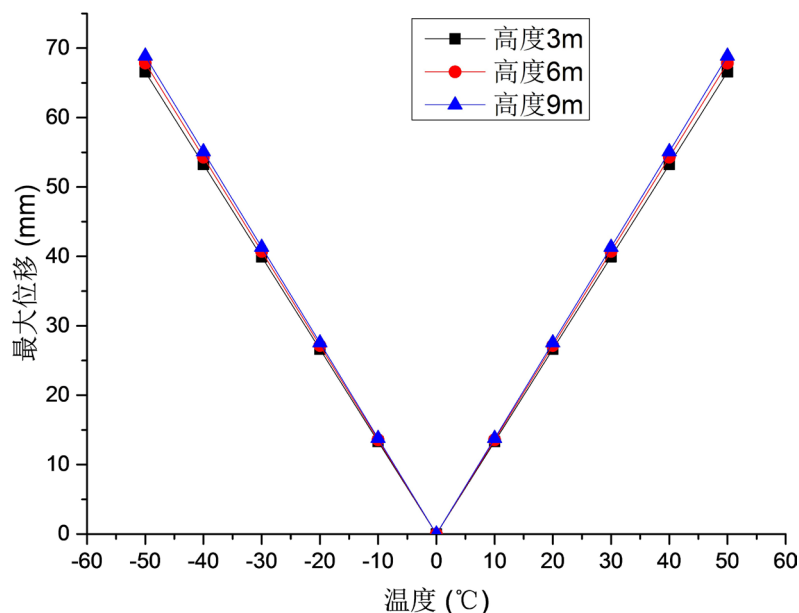


Figure 8. Maximum displacement of the structure acting at different temperature values

图 8. 不同温度值作用的结构最大位移

混凝土柱结构的高度不宜取得太高。

3) 不同温度值作用对不同边界支撑的螺栓球网壳的对比分析

均匀温度作用不仅对螺栓球网壳结构的影响非常大,也是设计时最常考虑的[10]。对不同的温度值作用下螺栓球网壳结构产生的最大内力和位移进行对比分析。

由图9和图10知采用固定铰支座因不同温度值而产生的内力和位移变化比弹性支座和整体模型的都大,弹性支座和整体模型因不同温度值而产生的内力和位移较为接近。因此在实际工程中,采用弹性支座可以释放温度作用产生的不利影响,而且考虑下部结构的整体模型是最经济的。

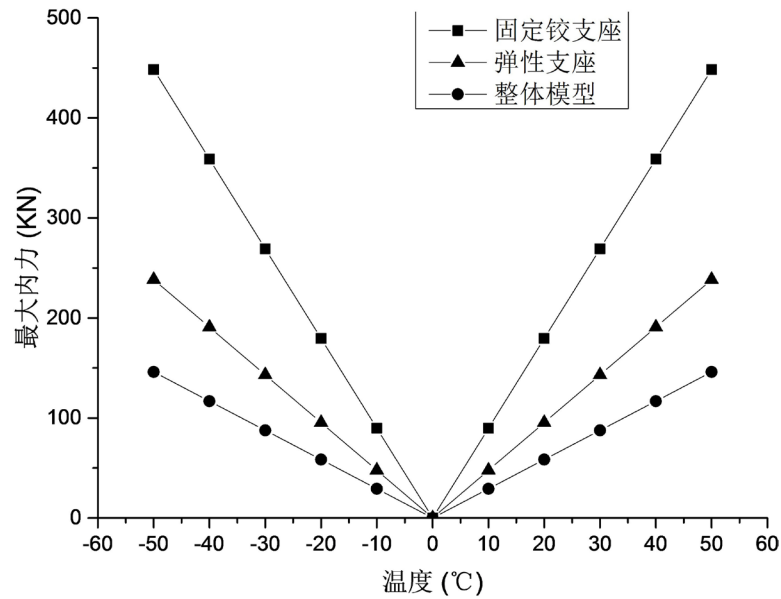


Figure 9. Maximum internal force of structure acting at different temperature values
图 9. 不同温度值作用的结构最大内力

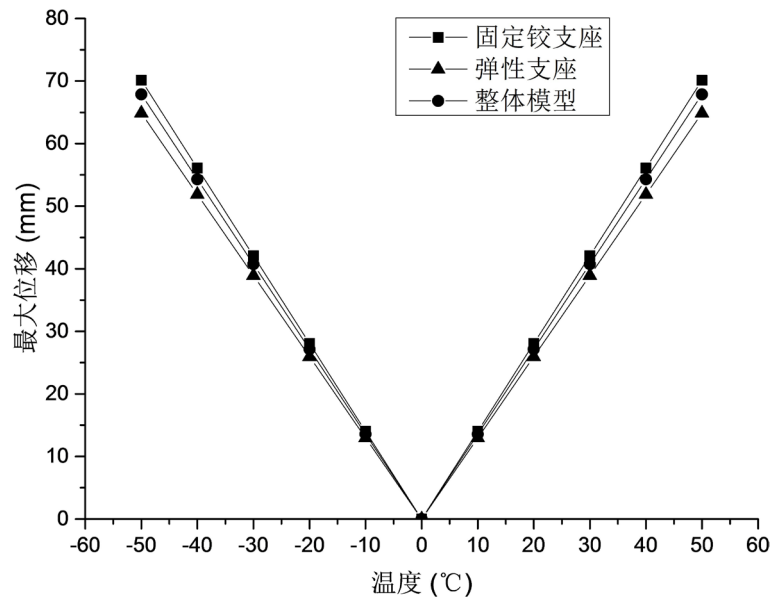


Figure 10. Maximum internal force of structure acting at different temperature values
图 10. 不同温度值作用的结构最大内力

4) 温度作用对螺栓球网壳结构杆件轴力的对比分析

由于杆件的轴力大小与杆件强度是否满足有关, 所以螺栓球网壳结构杆件轴力的大小是影响结构设计是否合理的重要因素[11]。本工程螺栓球网壳结构的边界支承方式为下弦支承, 下弦杆受到的约束大于上弦杆。在螺栓球网壳结构的长度方向上, 选择从结构端部到中间在荷载组合 1、2、3 的作用下, 螺栓球网壳的跨度方向下弦最大杆件的轴力进行对比分析。

由表 2 可知螺栓球网壳结构的长度方向弦杆轴力大小受温度作用的影响较大, 尤其是支座附近处的杆件轴力最大。荷载组合 2 作用下杆件轴力要远大于不考虑温度的荷载组合 1 作用下的杆件轴力, 荷载

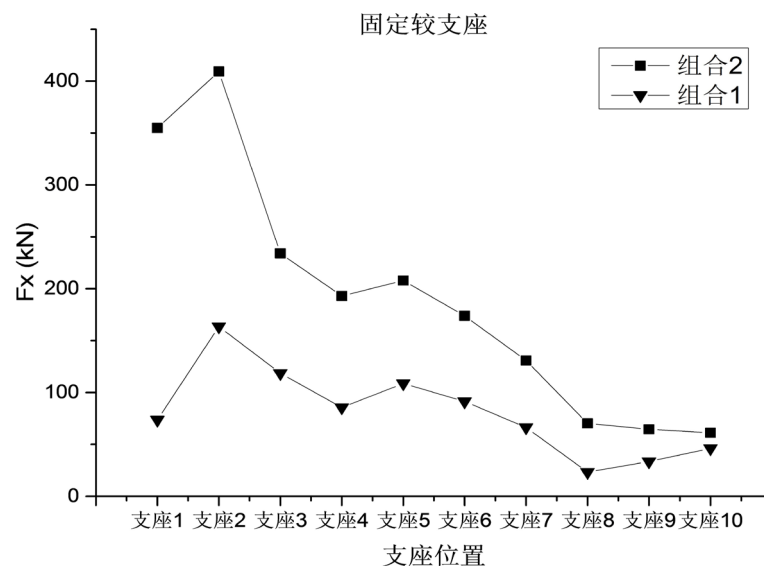
Table 2. The maximum axial force comparison of the longitudinal members of the structure under load combinations 1, 2, and 3.**表 2.** 结构纵向杆件在荷载组合 1, 2, 3 下的最大轴力对比

荷载组合	支座 1	支座 2	支座 3	支座 4	支座 5	支座 6	支座 7
1	-40.03	-28.86	-29.63	-23.62	-20.07	-12.41	-13.93
2	-210.55	-166.78	-165.53	-156.253	-147.76	-135.98	-128.98
3	130.85	120.25	111.67	114.22	111.48	112.88	124.73

组合 3 作用的杆件受力状态与不考虑温度作用的荷载组合 1 的杆件轴力, 由受压变为受拉。由于支座附近处杆件的轴力受温度作用影响很大, 所以, 需要采取弹性支座来释放温度作用对结构产生的不利影响。

5) 不同边界支承条件的支座反力对比分析

由于结构设计分工的原因, 常把上部屋盖结构与下部结构分开来考虑, 现在建立上部结构和下部结构整体分析模型, 通过对比三种模型来分析不同边界支承条件对螺栓球网壳支座反力的影响。现选取网壳纵向从端部到中间共 10 个支座作为分析对象, 通过对比不同工况组合对三种不同模型下的支座反力来分析温度应力对支座的影响。

**Figure 11.** Supporting force of the fixed hinge bearing model**图 11.** 固定铰支座模型的支座反力

从图 11~图 13 可以发现, 螺栓球网壳结构的长度方向支座水平反力 F_x , 在温度荷载作用下, 从中间向两端逐渐增大, 且在荷载组合 1、2 作用下, 网壳结构的端部支座水平反力 F_x 变化最大, 然后从端部到中间开始依次递减。通过对比三种边界支承条件可以发现, 采用弹性支座和整体模型时, 支座的水平反力 F_x 明显减少, 说明采用弹性支座可以释放和消除部分温度应力对结构产生的影响。整体模型的支座弹性刚度为上部结构和下部结构的组合刚度, 更符合工程实际, 最终结果也更安全和经济。

6) 不同弹性刚度对支座水平反力 F_x 的对比分析

螺栓球网壳结构的支座弹性刚度大小与因温度作用而产生的温度应力大小成正比。支座的约束刚度越大, 螺栓球网壳结构因温度变化而产生的应力也就会越大。因此, 我们对于支座附近区域的温度应力应引起充分的重视。

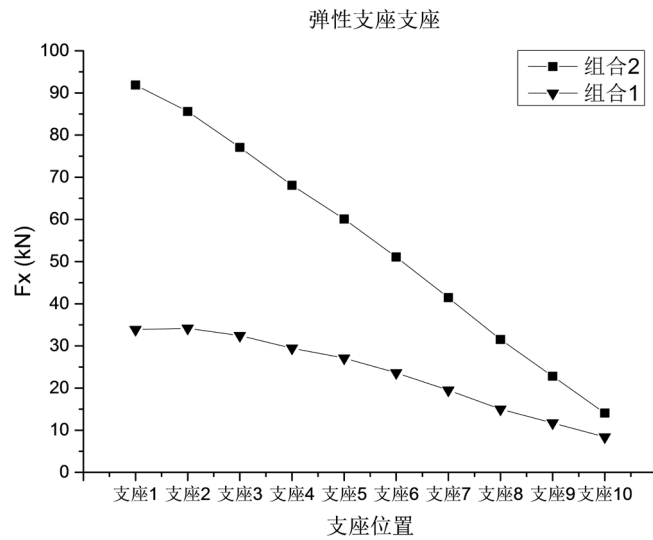


Figure 12. Support force of the elastic bearing model
图 12. 弹性支座模型的支座反力

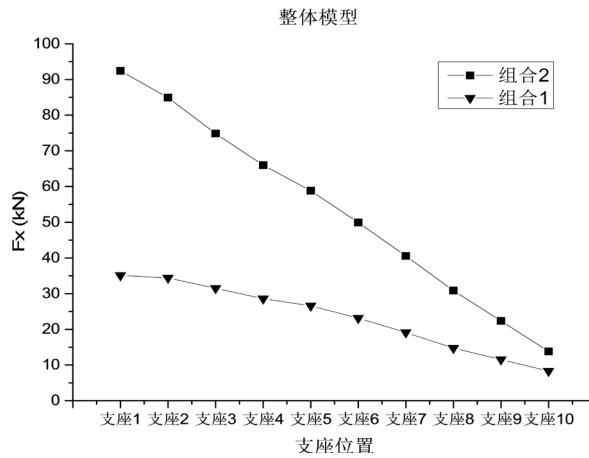


Figure 13. Supporting force of the overall model
图 13. 整体模型的支座反力

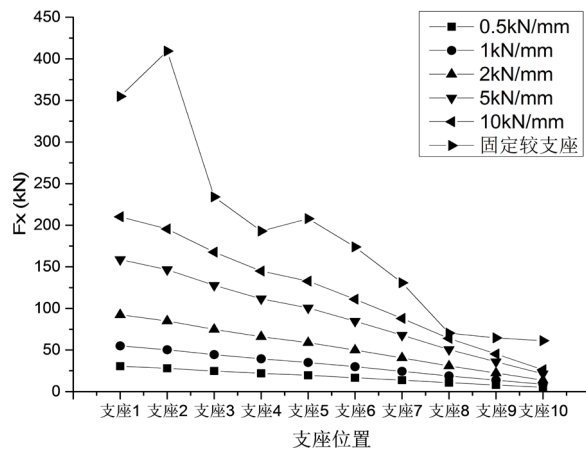


Figure 14. Structural support reaction force of different elastic stiffness
图 14. 不同弹性刚度的结构支座反力

从图 14 可以看出结构纵向靠近端部的支座受刚度影响比中间的支座要大, 随着支座刚度的逐渐增大, 支座的水平反力 F_x 也越大。支座的水平反力 F_x 越小说明支座释放的越充分。由于螺栓球网壳结构需要抵抗水平荷载和地震的影响, 支座的弹性刚度取值也不是越小越好, 取值太小会导致支座在水平荷载的作用会产生很大的水平位移, 这将影响结构的安全。支座的弹性刚度选择应为考虑上部结构和下部结构的组合刚度, 也即是考虑整体模型进行计算, 结果更符合实际[12] [13]。该工程选择 2 kN/mm 的支座弹性刚度, 验算结果满足规范要求。

5. 结论

1) 通过分析可知, 螺栓球网壳结构模型长度越长受温度应力的影响也越大, 而且温度应力对支座附近杆件影响较大。对于长度超过 120 m 的结构应该考虑温度应力和温度变形的影响, 且需要采取一定措施来释放温度应力。

2) 选择弹性支座的结构最大杆件轴力比固定铰支座的结构最大杆件轴力小 60%以上, 从支座结构选型对网壳结构杆件的受力影响来看, 使用弹性支座对结构来说更有利。

3) 在结构设计时应协同分析上部结构和下部结构的整体模型, 且弹性支座刚度的选择应该考虑上部结构和下部结构的组合刚度, 而不是只考虑上部结构的刚度。该工程选择 2 kN/mm 的支座刚度, 可以有效地降低支座反力, 从而达到减少或者消除由温度变化对结构产生的不利影响。

参考文献

- [1] 罗尧治. 大跨度储煤结构: 设计与施工[M]. 中国电力出版社, 2007.
- [2] GB 50017-2017. 钢结构设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [3] JGJ7-2010. 空间网格结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [4] 刘军. 某大型储煤仓双层柱面网壳结构的温度应力及风荷载效应分析[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2011.
- [5] 刘登明. 大跨度钢屋盖结构与下部支承结构协同工作的研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [6] 郝志勇. 超长跨网壳结构温度应力分析[D]: [硕士学位论文]. 邯郸市: 河北工程大学, 2015.
- [7] 赵中伟. 大跨度复杂钢结构温度效应及合拢温度研究[J]. 空间结构, 2015, 21(2): 40-45.
- [8] 沈祖炎, 严慧, 马克俭, 等. 空间网架结构[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1987: 30-55.
- [9] 张智升, 刘红波, 陈志华, 王小盾. 地基及支承结构协同变形对椭圆形单层网壳结构温度效应的影响[J]. 工业建筑, 2016, 46(2): 162-168.
- [10] 刘红波, 湛绍尧, 陈志华, 陈滨滨. 大跨度铝合金储煤仓结构温度场及温度效应研究[J]. 工业建筑, 2018, 48(1): 179-183.
- [11] 闫翔宇, 张玉轩, 于敬海, 陈志华, 贾莉, 何彩云. 考虑节点刚度影响的新型大跨弦支穹顶结构温度效应分析[J]. 中国科技论文, 2017, 12(13): 1452-1458.
- [12] 刘红波, 陈志华, 王哲, 周翠竹, 张智升. 考虑下部支承结构协同变形的椭圆形弦支穹顶结构温度效应研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(5): 10-13.
- [13] Bradford, M.A., Luu, T.K. and Heidarpour, A. (2007) Generic Nonlinear Modelling of a Steel Beam in a Frame Sub-Assembly at Elevated Temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, 64, 732-736. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2007.12.015>

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3458，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org