

文章编号:1671-6833(2008)03-0099-04

空腹网壳结构的静力稳定性与极限承载力研究

杜文风, 朱黎明, 张 慧, 杨国忠

(河南大学 土木建筑学院, 河南 开封 475004)

摘 要: 针对空腹网壳结构的静力稳定性及其极限承载力问题, 应用非线性有限元法进行了研究. 采用特征值屈曲分析和非线性屈曲分析两种分析方式考查了空腹网壳结构的屈曲模态和失稳全过程, 通过大规模的几何参数分析, 计算得到了矢跨比、网壳厚度、腹杆截面等参数取不同数值时的结构极限承载力, 并与单层网壳结构进行了对比. 结果表明, 空腹网壳结构以整体失稳为主, 在用钢量相同的情况下极限承载力比单层网壳结构提高 2.87 倍. 空腹网壳结构既具有单层网壳结构简洁美观, 又有双层网壳结构的稳定性好和承载力高的优点, 是一种优良的结构形式.

关键词: 空腹网壳结构; 几何非线性; 极限承载力; 单层网壳结构

中图分类号: TU 356 **文献标识码:** A

0 引言

网壳结构是一种曲面形空间网格结构, 有单层网壳和双层网壳之分, 是大跨度空间结构中一种举足轻重的主要结构形式^[1]. 单层网壳结构形式美观, 结构简单, 但是它的稳定性问题突出, 材料的强度不能充分发挥. 双层网壳结构受力性能较好, 但杆件繁多, 影响建筑效果. 空腹网壳结构是在双层网壳结构的基础上引入空腹的概念, 去除斜腹杆而形成的一类现代新型空间网壳结构, 可以达到单层网壳结构杆件清晰的效果, 又可以改善单层网壳结构的稳定问题^[2-3].

自 2006 年我国采用空腹网壳结构建成标志性建筑国家大剧院以来, 这类结构引起学者的广泛关注. 之前, 只有 1990 年建造完毕的日本秋田天空穹顶采用了空腹网壳结构. 目前对空腹网壳结构的研究文献较少, 文献[2]对空腹网壳结构的静动力性能作了基础性的研究, 文献[3]对空腹网壳结构进行了抗震分析, 了解了空腹网壳结构抗震性能, 但分析时参数较少. 由于空腹网壳结构是由多榀空腹拱结构组成的, 文献[4]对空腹拱结构进行了力学性能分析, 对理解空腹网壳结构的传力机制和承载特点提供了帮助. 为了深入掌握空腹网壳结构的静力稳定性和其极限承载力, 笔者进一步应用非线性有限元法进行了研究,

计算得到了不同矢跨比、网壳厚度、腹杆截面配置的结构极限承载力, 并为了了解空腹网壳结构与其它类型空间结构力学性能的相对情况, 与单层网壳结构进行了对比分析.

1 计算模型及参数分析方案

为了说明空腹网壳结构的受力性能和特点, 选择平面圆形正交空腹网壳结构为研究对象, 如图 1 所示. 结构跨度 120 m, 网壳厚度 2 m, 网格水平面投影尺寸 6 m × 6 m, 支承条件为圆周各节点三向铰支; 模型的矢跨比 H/L 、网壳厚度 Δ 、腹杆截面尺寸为可变参数. 考虑初始缺陷时, 施加最大缺陷为 $L/300$ 的一致模态缺陷(取特征值屈曲的第一阶).

2 静力稳定性分析

2.1 分析方法

静力稳定性分析是网壳结构研究的关键问题. 稳定性分析的目的是确定结构从稳定的平衡状态变为不稳定的平衡状态时的临界荷载及屈曲模态形状. 普遍采用的两种方法是理想结构的特征值屈曲分析和非线性全过程屈曲分析^[5]. 特征值屈曲分析用于预测一个理想弹性结构的理论屈曲强度, 优点是无须进行复杂的非线性分析, 即可获得结构的临界荷载和屈曲形状, 并可为非线性屈曲分析提供可供参考的荷载值. 非线性屈曲分

收稿日期: 2008-04-18; 修订日期: 2008-06-26

资助项目: 国家自然科学基金资助项目(50478079); 河南大学校自然科学基金资助项目(07YB2R035)

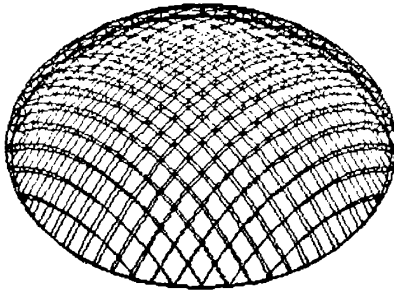
作者简介: 杜文风(1981-), 男, 吉林榆树人, 河南大学讲师, 博士, 研究方向为空间结构, E-mail: dwf@henu.edu.cn.

析则考虑网壳变形对结构内力的影响,网壳的平衡方程建立在变形以后的基础上,它比较真实地反映了结构的实际情况,笔者采用了空间梁元及弧长法对非线性平衡路线进行跟踪,研究结构的稳定特性^[6].

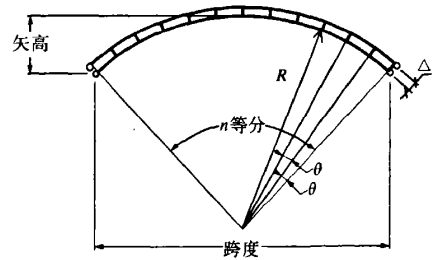
2.2 空腹网壳结构特征值屈曲模态

要掌握一个结构的非线性极限承载力的变化

规律,对该结构的特征值屈曲研究是有必要的.基本结构的前四阶特征值屈曲模态如图2所示.特征值屈曲模态的分析结果显示,正交空腹网壳结构的前几阶屈曲模态都以整体屈曲为主,这与单层网壳结构局部屈曲有很大不同,表明结构的整体刚度较好;另外分析第一阶屈曲模态表明,该结构的扭转变形很大,曲面内的剪切刚度不足.



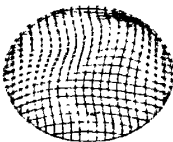
(a) 轴侧图



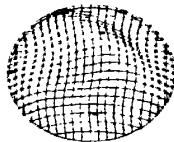
(b) 剖面图

图1 空腹网壳模型

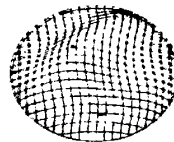
Fig.1 Modal of vierendeel latticed shell



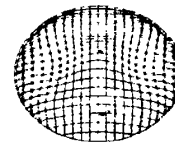
(a) 第一阶屈曲模态



(b) 第二阶屈曲模态



(c) 第三阶屈曲模态



(d) 第四阶屈曲模态

图2 前4阶屈曲模态

Fig.2 The front 4 buckling modals

2.3 参数分析

矢跨比是壳体类结构一个敏感参数,它的大小直接影响结构的受力性能,取下列4种矢跨比 $H/L = 1/5, 1/6, 1/7, 1/8$ 进行分析;取第一阶特征值屈曲模态为初始缺陷,缺陷大小为 $L/300$. 图3给出了4种矢跨比下,最大位移点的荷载-位移曲线,不同矢跨比下的极限承载力分别为:44.16, 39.73, 33.89, 30.72 kN/m^2 . 由图3可见,随着矢跨比的增加,结构刚度随之增加,极限承载力呈线性增大. 结构在达到极限承载力后曲线平坦,承载力没有突然下降,是一种延性破坏,这与一般单层网壳结构不同.

网壳厚度的变化对空腹网壳非线性稳定性有影响. 分析时,结构模型及其它参数同上,但矢跨比确定为 $1/5$, 并选择下列4种网壳厚度:1, 1.5, 2, 2.5 m. 在4种不同厚度下,缺陷空腹网壳的荷载-位移曲线如图4所示. 由图4可知,在截面不变的情况下,随着网壳厚度的增加,结构刚度也随

之增加,极限承载力亦增大,但是极限承载力的增大幅值逐渐减小. 因此空腹网壳结构的网壳厚度有一个合适取值,可以使结果具有最佳的经济性.

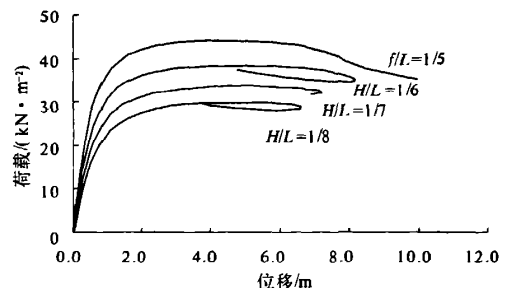


图3 不同矢跨比空腹网壳的荷载-位移曲线

Fig.3 Load-displacement curve with different rise-span ratio

腹杆在空腹网壳中的作用是非常重要的,它连接上下两层弦杆,使之协同工作,其截面大小的变化对该结构的力学性能影响究竟有多大是值得关

注的. 腹杆截面的大小直接影响到结构的刚度和极限承载力. 分析时, 仍取上面的计算模型, 矢跨比 $1/5$, 网壳厚度 2 m , 腹杆选取 5 种截面尺寸, 如表 1 所示, 其它参数同前. 其中, 以第 3 种截面为基础, 分别增大和减小各取两种截面, 取用上述截面的目的在于研究截面刚度成倍变化时, 空腹网壳结构的刚度和极限承载力的变化情况, 以便对合理选择腹杆的截面有 1 个定性的把握. 计算结果如图 5 所示, 从图 5 可知: 空腹网壳的刚度随截面尺寸的增大而增大, 其极限承载力也随之增大, 但是截面尺寸增大到一定程度后, 效果不再明显.

表 1 腹杆截面性质

Tab. 1 Characters of areas of web members

截面类型	截面 1	截面 2	截面 3	截面 4	截面 5
尺寸/mm	$\Phi 273 \times 8$	$\Phi 351 \times 8$	$\Phi 402 \times 10$	$\Phi 500 \times 10$	$\Phi 630 \times 10$
惯性矩 I/cm^4	5 851.71	12 684.36	23 676.21	46 231.77	93 639.59
比值 I_1/I_3	0.25	0.53	1.00	1.96	3.96

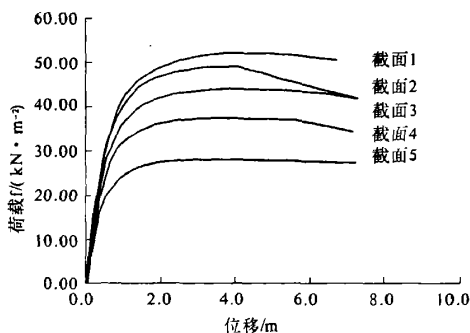


图 5 不同腹杆截面空腹网壳荷载-位移曲线

Fig. 5 Load - displacement curve with different areas of web member

在上面的参数分析过程中, 对有初始缺陷情况下网壳结构的最终变形进行了观察, 发现所有的计算模型其最终的变形形状是一致的, 并没有因为参数的改变而改变, 其变形图见图 6. 在最终变形图上可以清楚地看到, 该结构在竖向均布荷载下, 极限承载力作用下的变形与第一阶屈曲模态一致, 结构保持良好的整体性, 以整体失稳为主, 但结构的抗扭性能值得关注. 当采用如图 7 所示的三向球面空腹网壳时, 结构的抗扭性能有明显改观.

2.4 与单层网壳结构的对比

为了更直观地理解空腹网壳结构的力学性能指标, 与单层网壳结构的极限承载能力进行了比较. 对单层网壳结构进行分析时, 结构跨度同样取 120 m , 矢跨比为 $1/8, 1/7, 1/6, 1/5$ 4 种情况, 周边节点三向铰支, 结构形式为双向正交单层网壳,

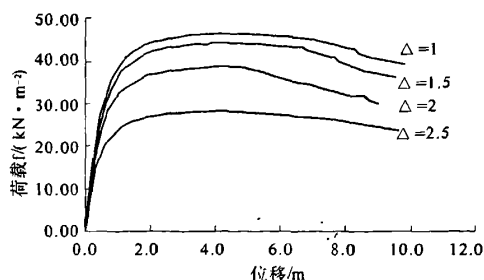


图 4 不同网壳厚度空腹网壳荷载-位移曲线

Fig. 4 Load - displacement curve with different thickness

如图 8 所示, 其用钢量与对应的空腹网壳结构相同, 二者的计算结果如表 2 所示. 比较可知, 正交空腹网壳结构的极限承载力比单层网壳结构要提高很多, 矢跨比越小提高的幅度越大, 矢跨比为 $1/5$ 时仍可提高到 2.87 倍, 这是非常可观的; 从屈曲变形图以及全过程曲线来看, 正交空腹网壳结构整体稳定性比正交单层网壳有了显著提高, 空腹网壳的变形以第一阶屈曲模态的整体变形为主, 而单层网壳的变形以局部区域的凹陷为主.

表 2 正交空腹网壳与正交单层网壳极限承载力比较

Tab. 2 Comparison of limited load with orthogonal vierendeel latticed shell and single-layer latticed shell

承载力	矢跨比			
	1/8	1/7	1/6	1/5
空腹网壳 $f_{\text{极限}}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	30.72	33.89	39.73	44.16
单层网壳 $f_{\text{极限}}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	6.13	8.92	11.21	15.35
比值(空腹/单层)	5.01	3.80	3.54	2.87

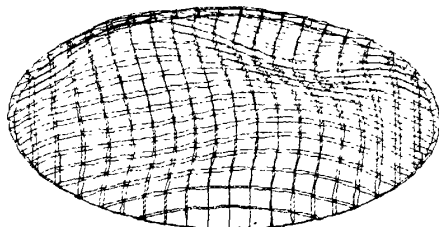


图 6 极限荷载时结构变形

Fig. 6 Deformation of structure under limited load

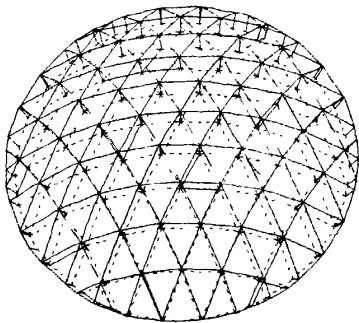


图7 三向空腹网壳结构

Fig.7 Three dimension vierendeel latticed shell

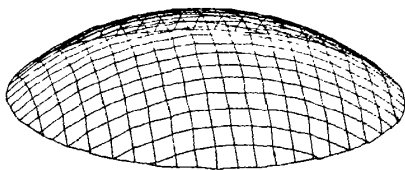


图8 正交单层网壳

Fig.8 Orthogonal single-layer latticed shell

3 结论

(1) 底面为圆形的正交空腹网壳结构在静力作用下的稳定性分析结果显示:该结构以第一阶屈曲模态变形为主,结构呈现整体屈曲变形,结构

在达到极限承载力后仍有很大变形能力而承载力并没有明显下降,为延性破坏。

(2) 不同参数分析的结果表明:矢跨比对结构的极限承载力有较大影响,随网壳厚度或腹杆截面的增大,结构极限承载力增加。

(3) 比较正交空腹网壳结构与正交单层网壳结构的极限承载力,可知正交空腹网壳结构的极限承载力较正交单层网壳有极大提高。

参考文献:

- [1] 董石麟,罗尧治,赵阳.大跨度空间结构的工程实践与学科发展[C]//第十一届空间结构学术会议论文集.北京:中国建筑科学研究院,2005:1-11.
- [2] 鲍科峰.正交空腹网壳结构的静动力性能研究[D].杭州:浙江大学硕士学位论文,2004.
- [3] 王正光,刘福祺,林胜良.某正交空腹网壳结构抗震性能分析[J].钢结构,2006,21(6):1-3.
- [4] 鲍科峰,马文宏,杜文凤,等.平面空腹拱静力性能分析[J].工业建筑,2006,36(3):91-94.
- [5] 沈世钊.网壳结构的稳定性[J].土木工程学报,1999,32(6):11-25.
- [6] 秦力一,许德刚,周爱民.空间网架焊接空心球节点承载力研究[J].郑州大学学报:工学版,2006,27(7):25-29.

Study on Static Stability and the Limited Load Carrying Capacity of Vierendeel Latticed Shells

DU Wen-feng, ZHU Li-ming, ZHANG Hui, YANG Guo-zhong

(College of Civil and Architecture Engineering, Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: In view of the problems of stability and limited load carrying capacity of the vierendeel latticed shell structure, study is carried out based on nonlinear finite element method. The buckling modal and the whole course of instability are shown by two analysis method, the eigen-buckling analysis and the geometrical nonlinear finite element method. Through many geometric parameters analyses, including the rise-to-span, thickness of the shell and sizes of member sections, the limited load carrying capacity is obtained by summarizing large amount of computation data. Moreover, the comparison with the single layer lattice shell is carried out. Results show that the limited load of the vierendeel latticed shells is improved 2.87 times than that of the single layer lattice shell with the same steel consumption. Vierendeel latticed shell structure not only has the strongpoint of concision and slinky like the single layer latticed shell structure, but also has the stability and carrying capacity like double-layer latticed shell structure, therefore it is an excellent structural form in new spatial structures.

Key words: the vierendeel latticed shell structure; geometrical nonlinear; limited load carrying capacity; single layer latticed shell structure