

文章编号:1671-6833(2007)03-0020-04

单层椭圆抛物面网壳结构非线性整体稳定研究

车伟¹,李海旺²,罗奇峰³

(1. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 太原理工大学 土木系, 山西 太原 030024; 3. 同济大学 上海防灾救灾研究所, 上海 200092)

摘要:以具有实际工程意义的30 m×30 m跨度的单层椭圆抛物面网壳为研究对象,利用ABAQUS有限元程序对网壳的非线性整体稳定性能进行系统的分析,同时考虑矢跨比、初始几何缺陷、约束条件等因素对该网壳稳定性的影响.考察网壳的屈曲模态、屈曲路径,求出了全过程曲线和极限稳定承载力,全面了解单层椭圆抛物面网壳整体非线性失稳的规律性.研究表明:网壳极限承载力随着结构矢跨比的增加而逐渐增大;对竖向荷载的不对称分布和初始几何缺陷比较敏感,半跨竖向的屈曲荷载仅为满跨竖向的70%;支座刚度的增大可适当提高网壳的极限承载力.

关键词:结构工程;单层椭圆抛物面网壳;非线性稳定;极限承载力

中图分类号: TU 311.2 文献标识码: A

0 引言

由于单层网壳的承载力主要由其稳定性能确定,所以近年来网壳的稳定性能研究,特别是其非线性稳定性的研究,一直是空间结构的主要课题之一.单层椭圆抛物面网壳结构美观、简洁明快,杆件、节点少,已成为大跨空间结构中较常用的一种结构形式.但其跨越能力较差(不宜超过60 m),结构的稳定性是其设计的关键.因此该问题的解决有着重要的理论和应用价值.

笔者选取具有实际工程意义的30 m×30 m跨度的单层椭圆抛物面网壳为研究对象,利用考虑几何非线性及几何初始缺陷的ABAQUS有限元程序对其节点进行荷载一位移全过程分析,通过跟踪网壳节点的非线性荷载一位移全过程响应,完整地解该类网壳结构非线性整体失稳的规律性.

1 分析理论

1.1 非线性屈曲

实际网壳结构不可避免地具有各种初始缺陷,包括曲面形状的安装偏差、杆件的初弯曲、杆件对节点的初偏心、各种原因引起的初应力等,在按规范规定选择杆件截面时已经做了考虑.对网

壳整体来讲,曲面形状的安装偏差应是一个主要的初始几何缺陷^[1-2].为考虑初始几何缺陷对结构理论屈曲强度的影响,必须对结构进行基于大挠度有限元理论的非线性屈曲分析^[3].

非线性屈曲是用一种逐渐增加荷载的非线性静力分析技术(Modify Newton-Raphson Method)求得使结构开始变得不稳定的临界荷载.笔者在计算中采用弧长法渐次加载.在结构的非线性有限元分析过程中,任意时刻的平衡方程都可以写成如下形式:

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{R} - {}^{t+\Delta t}\mathbf{F} = 0 \quad (1)$$

式中: ${}^{t+\Delta t}\mathbf{R}$, ${}^{t+\Delta t}\mathbf{F}$ 分别为 $t + \Delta t$ 时刻外部所施加的节点荷载向量和相应的杆件节点内力向量.在进行平衡路径跟踪时,采用改进的牛顿法(Modified Newton-Raphson Method),且假定荷载与结构变形无关,式(1)变为:

$${}^t[\mathbf{K}]\{\Delta u\}^{(i)} = {}^{t+\Delta t}\{\mathbf{R}\} - {}^{t+\Delta t}\{\mathbf{F}\}^{(i-1)} \quad (2)$$

式中: ${}^t[\mathbf{K}]$ 为 t 时刻结构的切线刚度矩阵, $\{\Delta u\}^{(i)}$ 为当前节点位移的迭代增量.

在分析时假定结构按比例加载,用 λ 表示荷载比例系数,式(2)变为:

$${}^t[\mathbf{K}]\{\Delta u\}^{(i)} = {}^{t+\Delta t}\lambda^{(i)}\{\mathbf{R}\} - {}^{t+\Delta t}\{\mathbf{F}\}^{(i-1)} \quad (3)$$

应用 Batoz 和 Dhatt 的两个位移向量同时求解技术,可以将方程(3)分解为:

收稿日期:2007-04-23;修订日期:2007-05-31

基金项目:山西省归国留学基金项目(200335).

作者简介:车伟(1981-),男,陕西合阳人,同济大学博士研究生,主要从事结构抗震防灾方面的研究工作.

$${}^t[\mathbf{K}]\{\Delta u\}^{(i)} = {}^{t+\Delta t}\lambda^{(i-1)}\{\mathbf{R}\} - {}^{t+\Delta t}\{\mathbf{F}\}^{(i-1)} \quad (4)$$

$${}^t[\mathbf{K}]\{\Delta u_c\}^{(i)} = \mathbf{R} \quad (5)$$

其中:

$$\{\Delta u\}^{(i)} = \{\Delta u_s\}^{(i)} + \Delta\lambda^{(i)}\{\Delta u_c\}^{(i)} \quad (6)$$

$${}^{t+\Delta t}\{\Delta u\}^{(i)} = {}^{t+\Delta t}\{\Delta u\}^{(i-1)} + \Delta\{\Delta u\}^{(i)} \quad (7)$$

$${}^{t+\Delta t}\lambda^{(i)} = {}^{t+\Delta t}\lambda^{(i-1)} + \Delta\lambda^{(i)} \quad (8)$$

由于方程(4) - (8)含有 $(N+1)$ 个未知数 $\Delta u^{(i)}$ 和 $\Delta\lambda^{(i)}$, 而只有 N 个线性方程组, 因此还需要引入一个确定控制参数的约束方程:

$$f(\Delta\lambda^{(i)}, \Delta u^{(i)}) = 0 \quad (9)$$

求解过程中采用把弧长法和改进的牛顿法 (Modified Newton - Raphson Method) 相结合的增量迭代法. 荷载增量采用弧长法自动加载, 用曲线弧长来控制荷载步长, 使改进的牛顿法平衡迭代沿一条弧收敛, 避免矩阵在奇异点处变为奇异矩阵, 从而避免了结构在加载时可能出现的不稳定 (即结构节点的荷载一位移曲线的斜率为零或负值), 同时通过控制荷载增量 $\Delta\lambda$ 和位移增量 δ 控制收敛性.

1.2 弧长法

弧长法一般只用于施加等比荷载的静态分析中, 参考弧长半径的计算来自第一子步第一次迭代的荷载增量为^[4]: 参考弧长半径 = 总荷载/子步数

控制荷载因子增量的约束条件为

$$[({}^{t+\Delta t}\lambda^{(i-1)} - {}^t\lambda) + \Delta\lambda^{(i)}]^2 + [u^{(i)}]^T u^{(i)} = (\Delta l)^2 \quad (10)$$

式中: Δl 为每步迭代的弧长增量; $u^{(i)} = {}^{t+\Delta t}u^{(i)} - {}^t u$.

2 计算模型及参数

该结构为单层椭圆抛物面网壳 (双曲扁网壳), 平面尺寸为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$, 按常用范围选择下列矢跨比 $1/6, 1/7, 1/8, 1/9$, 网壳的 2 个方向取相同的矢跨比; 杆件截面为 $\Phi 114 \times 3$, 网格形式为单向斜杆正交正放的网格; 分别考虑了荷载的满跨和半跨分布; 支承条件选取 4 边可动铰支且 4 角点固定铰支和 4 边均为固定铰支两种情况, 采用 Q235 钢, 其弹性模量 $E = 206\text{ GPa}$, 泊松比 $\mu = 0.3$. 该模型中有 320 个杆单元; 121 个节点. 其计算模型如图 1 所示.

3 非线性稳定分析

3.1 全过程曲线及失稳形态

结构的稳定性能可以从其节点的荷载一位移万方数据

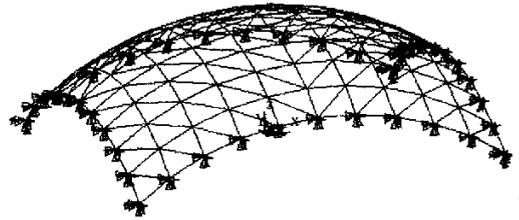
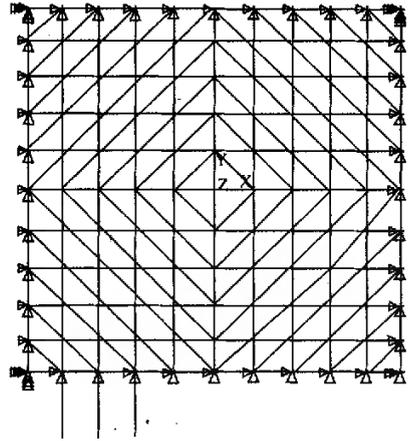


图 1 单层椭圆抛物面网壳结构有限元模型

Fig.1 Finite element model of the single-layer elliptical paraboloid latticed shells

全过程曲线中得到完整的表现, 我们首先在这里讨论一种基本情况, 即网壳在满跨均布荷载作用下的全过程分析结果.

图 2 给出了 4 种矢跨比网壳在满跨均布荷载作用下发生首次屈曲的节点的荷载一位移全过程失稳曲线, 作为对应, 图 3 给出了网壳的整体非线性失稳模态. 在竖向荷载作用下, 网壳杆件的主要内力是轴力, 且多为压力, 但此类结构, 有可能在结构的边缘部位少许杆件受拉^[5]. 而极大多数杆件的弯曲应力和剪应力所占比例较小, 整个网壳基本以薄膜力的方式承受荷载作用, 杆件轴力变化比较平缓, 分布也比较均匀, 荷载主要是通过横纵向主肋和斜向杆来传递的. 结构边缘杆件, 剪力和弯矩所引起的应力与轴力引起的应力相比较, 其比值向跨中迅速衰减.

从失稳过程可看出, 理想 (无初始缺陷) 网壳总体失稳的特征明显, 网壳许多中部节点的位移均比角部最大节点位移大一个甚至几个量级; 而有初始缺陷的网壳具有局部失稳的特点, 即表现为个别节点的显著位移 (壳面局部凹陷). 发生屈曲的节点位于网壳边缘的中央部位. 失稳破坏经历了多次屈曲, 表现为荷载一位移曲线的多次上下波动, 每波动一次都代表以某一个节点为主的

跳跃屈曲,随着屈曲次数增加,网壳的局部凹陷越大,进而结构发生破坏。

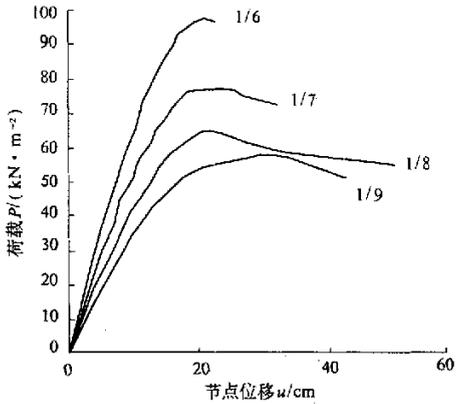


图2 单层椭圆抛物面网壳荷载—首次屈曲节点位移曲线

Fig. 2 The curve of the loads versus the nodal displacements of first buckling

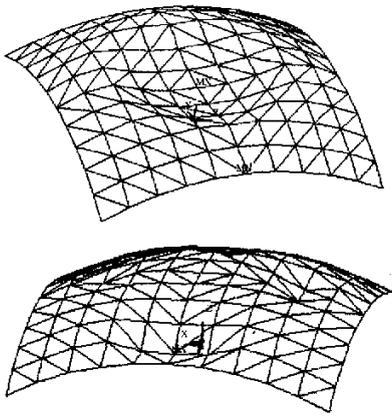


图3 单层椭圆抛物面网壳失稳模态

Fig. 3 Buckling modes of the single-layer elliptical paraboloid latticed shells

3.2 矢跨比的影响

在跨度为30 m的情况下,不同矢跨比对单层椭圆抛物面网壳极限承载力的影响见图4。可以看出,网壳极限承载力随着结构矢跨比的增加而逐渐增大。原因为跨度不变时,矢跨比的增大实质上代表曲面曲率半径的减小,网壳承载力增大。

3.3 初始几何缺陷的影响

对每种网壳考虑 $L/300$ 初始几何缺陷,均按“一致缺陷模态法”进行缺陷影响分析^[6-8],图4给出所分析的网壳当存在 $L/300$ 初始几何缺陷时对其承载力的影响。经分析得到的结论是:单层椭圆抛物面网壳对初始几何缺陷也比较敏感,当结构具有 $L/300$ 初始缺陷时,其极限承载力约下降到理想结构的55%~75%。事实上,当初始缺陷

万方数据

超过一定限度后,网壳已严重偏离原来的球形形状,受力也偏离薄膜内力主导状态,超过结构正常使用的容许范围,变成了一种“畸形结构”。

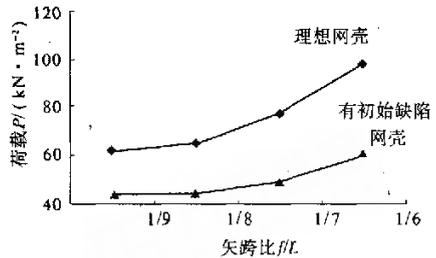


图4 网壳极限承载力随矢跨比变化曲线

Fig. 4 The curve of buckling critical loads versus rise-to-span ratio's

3.4 荷载不对称分布的影响

表1给出了荷载不对称分布对网壳承载力的定量影响,结果发现:半跨竖向荷载作用下单层椭圆抛物面网壳的极限承载力与满跨竖向荷载作用时的极限承载力比较,下降了30%左右,说明该类网壳对荷载的不对称分布是相当敏感的。

表1 荷载不对称分布时网壳的极限承载力 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)

Tab. 1 The buckling critical loads under different vertical loading distribution

矢跨比(f/L)	1/9	1/8	1/7	1/6
满跨荷载	62.15	65.04	77.27	97.47
半跨荷载	40.40	46.18	57.18	66.28
比值	0.65	0.71	0.74	0.68

3.5 支承条件的影响

为了进行比较,引入另一种边界条件,即假定网壳沿4边均为固定铰支。其计算结果见表2,由此可以看出,支座变为固定铰支以后,承载力比可动铰支情形提高15%以上。结构荷载不对称分布时,得到的情形也一样。说明支座刚度的增大可提高网壳的极限承载力,但不会减小其对荷载不对称分布的敏感情况。

表2 支承条件不同时网壳的极限承载力 $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$

Tab. 2 The buckling critical loads under different Supporting term

矢跨比(f/L)	1/9	1/8	1/7	1/6
4边固支	71.78	76.29	91.44	118.09
4边铰支	62.15	65.04	77.27	97.47
比值	1.15	1.17	1.18	1.21

4 结论

通过对单层椭圆抛物面网壳的非线性整体全

过程分析,我们得出以下结论:

(1)特征值屈曲和弧长法相结合是解决结构非线性屈曲问题的一种有效方法,可以方便地得到结构变形的失稳全过程,并求得临界荷载。

(2)理想网壳发生整体失稳的特征明显,而有初始缺陷的网壳具有明显局部失稳的特点,发生屈曲的节点位于网壳边缘的中央部位。一般来说,虽然单层椭圆抛物面网壳在角区受力比较集中,但由于在实际的截面设计时对角区斜杆进行了局部加强,使网壳边缘中点成为薄弱部位,在设计中应引起重视。

(3)网壳极限承载力随矢跨比变化的影响比较敏感,且随着结构矢跨比的增加而增大。

(4)单层椭圆抛物面网壳对初始几何缺陷表现出高度的敏感性;对荷载不对称分布也比较敏感。

(5)支座刚度的增大可适当提高网壳的极限承载力,但不会减小其对荷载不对称分布的敏感情况。

参考文献:

- [1] 第十一届空间结构学术会议论文[C],2005,205 - 210.
- [2] COAN C H, PLAUT R H. Dynamic stability of a lattice dome [J]. Earthquake Eng and Struct Dyna, 1983, 11 (3):269 - 274.
- [3] 沈世钊,陈昕.网壳结构稳定性[M].北京:科学出版社,1999.
- [4] 梁根.结构分析的荷载效应组合及图形绘制的计算机方法[M].重庆:重庆大学出版社,1990.
- [5] 尹德钰,刘善维,钱若军.网壳结构设计[M].北京:中国建筑工业出版社,1996.
- [6] 罗永峰.网壳结构弹塑性稳定及承载全过程研究[D].同济大学博士学位论文,1991.
- [7] FUNK G E, LEE L H N. Dynamic buckling of inelastic spherical shells[J]. Pressure Vessel Tech, 1982, 104: 79 - 87.
- [8] 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 (3):25 - 29.

Study on Nonlinear Stability of Single - Layer Elliptical Paraboloid Latticed Shells

CHE Wei¹, LI Hai - wang², LUO Qi - feng³

(1. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 3. Shanghai Institute of Disaster Prevention and Relief, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The nonlinear stability of single - layer elliptical paraboloid latticed shells with 30 m × 30 m span has been carried out based on ABAQUS finite element program in the paper. The effects of all kinds of parameters (such as rise - to - span ratio, initial geometric imperfection and supporting term of lattice shells etc.) are analyzed on the structural nonlinear stability. In order to find the rules of nonlinear stability of the latticed shells, the time - history curves and buckling critical loads are calculated and the buckling modes and paths of lattice shells are tracked. The results show that with rise - to - span ratio's aggrandizement, the buckling critical loads are increasing. The latticed shells are highly sensitive to unsymmetric vertical loading distribution and initial geometric imperfection. The buckling critical load under half span vertical loading distribution is only seventy percent of the critical load under the whole span loads. When supporting stiffness of latticed shell strengthens, the critical loads heighten.

Key words: structure engineering; single - layer elliptical paraboloid latticed shell; nonlinear stability; critical load