

# 施威德勒穹顶弹塑性稳定性能研究\*

卢成江, 曹正罡, 孙 瑛

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090)

**摘要:**通过有计划地对 400 余例实际尺寸的施威德勒型单层球面网壳进行双重非线性全过程分析,求得网壳的极限承载力,系统地考察了初始缺陷和荷载不对称以及考虑材料非线性等因素对网壳稳定性能的影响,较全面了解了施威德勒型单层球面网壳弹塑性稳定的规律性,为此类网壳结构的工程实践提供了理论依据和设计参考。并得出以下几点结论:(1)为保证网壳的安全性,网壳的极限承载力应由双重非线性全过程分析确定。(2)施威德勒穹顶属于缺陷敏感性结构。(3)竖向荷载不对称分布对网壳极限承载力影响较小。(4)工程设计中应适当考虑支承条件变化对网壳极限承载力的影响。

**关键词:**单层球面网壳; 稳定; 极限承载力; 弹塑性

**中图分类号:** TU33.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7329(2007)01-0052-04

## Research on Behavior of Elasto - Plastic Stability of Schwedler Domes

LU Cheng - jiang, CAO Zheng - gang, SUN Ying

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, P. R. China)

**Abstract:** More than 400 tests for the complete - process analysis considering geometry nonlinearity and material nonlinearity of Schwedler single - layer latticed domes with various geometries have been carried out and the critical load is obtained. The effect of initial imperfection, asymmetric load distribution, especially the effect of material nonlinearity on the stability behavior of this kind of domes is considered, and the rule about the elasto - plastic stability behavior is concluded. Based on the work introduced in present paper, people can get useful information for engineering design or theoretical study. And some conclusions could be drawn: (1) To ensure security of the dome, the critical load of the dome must be confirmed by the complete - process analysis considering geometry nonlinearity and material nonlinearity; (2) Schwedler single - layer latticed domes belongs to structure of imperfection sensitivity; (3) The critical load of the dome is affected a little by the asymmetric load distribution; (4) The effect of change of supporting condition on the critical load of the dome should be considered properly in engineering design.

**Keywords:** single layer latticed domes; stability; critical loads; elasto - plasticity

施威德勒穹顶网格均匀,造型美观,是一种常用的球面网壳型式,作为球面网壳的一类重要代表,施威德勒穹顶的稳定性能也一直是国内外学者所关注的重点问题,文献 [1]曾对一种改进的施威德勒型网壳弹性稳定性能进行过较为系统和深入的研究,但要对此类网壳的弹塑性稳定性能有更全面的了解,必须运用双重非线性求解方法对大量实际尺寸网壳结构进行更全面,更系统的分析研究,本文就是在这一基本构思的基础上,利用大型通用有限元软件 ANSYS 对施威德勒穹顶进行了 400 余例双重非线性全过程分析,得到了较为精确的网壳结构稳定极限承载力,并对所得计算结果进行了统计和归纳,考察了网壳弹塑性稳定的变化

规律,比较真实地反映了此类结构的稳定性能,因而更具有理论与实用价值。

### 1 参数方案与算例验证

施威德勒型球面网壳结构布置见图 1。

网壳的杆件采用 BEAM189 单元模拟,材料采用理想弹塑性模型,屈服应力 235 MPa;屈服准则采用 Von Mises 屈服准则<sup>[2]</sup>。从实用角度,选择 40 m 和 50 m 两种跨度,对每一种跨度的网壳均选用二套不同的截面尺寸,按截面增强顺序排列为 1、2 套。每套截面中主肋(径向)采用较大截面,环杆(纬杆)和斜杆采用较小截面,具体参数方案见表 1。据此对施威德勒型

\* 收稿日期: 2006 - 08 - 21

作者简介: 卢成江 (1974 - ),男,山东人,助理研究员,博士生,主要从事空间结构和结构抗震研究。

球面网壳进行了 430 余例结构的弹塑性全过程分析。为便于对比,还进行了同样数量的弹性全过程分析。

表 1 参数分析方案

跨度 /m	杆件截面	矢跨比 ( $f/L$ )	竖向不对称荷载	缺陷 $r/cm$	支座
40	127 $\times$ 3, 133 $\times$ 4	1/5, 1/6, 1/7, 1/8	$p/g=0, 1/4, 1/2$	$r=0, L/1000, L/500, L/300$	铰接
	部分算例考虑了				
50	140 $\times$ 6, 146 $\times$ 5			$r=0 \sim 60$ cm	固接
	152 $\times$ 5, 168 $\times$ 6			(0, 3, 6, 10, 20, 30, 40, 50, 60)	

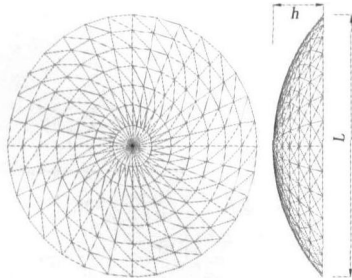


图 1 网壳的结构示意图

进行大规模数值计算前,先利用 ANSYS 程序对图 2 中空间刚架体系进行了弹塑性全过程分析,计算中假定六个边结点均为滑动铰支座,每个杆件取四个计算单元。数值计算得到的临界荷载和屈曲路径与 Meek 和 Tan<sup>[3]</sup>采用弧长法得到的结果以及与 Papadrakakis<sup>[4]</sup>采用两向量迭代法得到的荷载位移曲线完全吻合。本文还对国内外一些典型算例进行了对比分析,限于篇幅,此处未详细列出。结果表明,利用 ANSYS 进行网壳结构弹塑性稳定分析得到的结果是完全可信的。

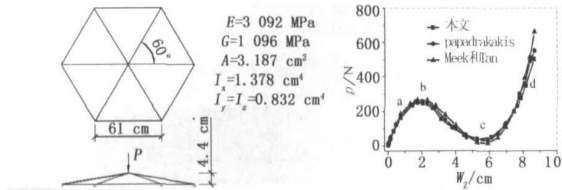


图 2 六角空间刚架

## 2 弹塑性稳定性

### 2.1 全过程曲线及失稳模态

结构的荷载—位移曲线能够直观,全面地体现结构的稳定性能,作为代表,图 3 给出了 50 m 跨度,矢跨比为 1/5, 1/8 网壳在均布荷载作用下的弹塑性全过程曲线,实线代表完整网壳结构,虚线代表具有  $L/1000$  初始缺陷网壳,可以看到,网壳的整个弹塑性全过程曲线是异常复杂和变化多端的。网壳结构的全过程曲线在过临界点后始终呈现下降趋势,这主要是由于在加荷过程中杆件部分截面屈服而导致网壳整体或局部的刚度急剧削弱,结构承担外荷载的能力持续降低而造成。考虑初始缺陷影响的荷载极值点明显低于完整网壳结构。整条曲线没有表现出上下波动的情况,结构始终没有达到反向稳定位置,截面的塑性发展导致结

构的整体刚度是持续削弱的。图 4 为 50 m 跨施威德勒型球面网壳的失稳模态,可以清楚地看到完整网壳的失稳是从中心算起第三环上结点环状凹陷开始(图 4a),对于具有缺陷网壳结构由于初始几何缺陷分布的影响,失稳区域已经不呈现环形分布,而表现为个别壳面上节点凹陷,但失稳节点位置与完整网壳基本一致(4b)。

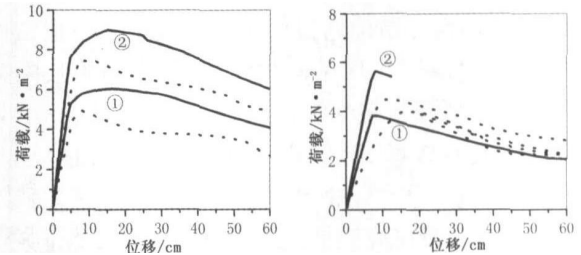


图 3 均布荷载作用下全过程曲线

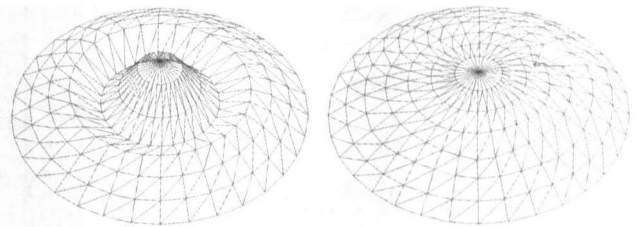


图 4 施威德勒型球面网壳失稳模态

### 2.2 材料非线性的影响

以往的研究和设计过程中,网壳结构弹塑性稳定承载力通常是在几何非线性全过程分析基础上给出一定的折减,而具体折减多少则缺乏足够的依据。为了更准确,全面地了解材料非线性对于施威德勒型球面网壳极限承载力的影响,本文对此类网壳的弹塑性与弹性极限承载力进行归纳总结,两者比值定义为弹塑性折减系数<sup>[5]</sup>,列于表 2 中,可以看出表中最低可达 0.26,平均值为 0.56,材料非线性对于施威德勒型球面网壳极限承载力的影响是非常明显的。同时应当指出:当结构的矢跨比一致时,杆件截面越大,值越小;当跨度一致时,矢跨比越大,值越小,这表明随着网壳结构整体刚度的增强,几何非线性的影响逐渐减弱,而材料非线性对于结构极限承载力的影响明显增大。在表 2 中数值小于 0.5 的数值比例为 42%,这样可以认为以往按弹性稳定承载力的 50% 估算弹塑性承载力

传统设计方法,会使得部分网壳结构变的不安全,所以进行弹塑性全过程分析对更精确地估算网壳结构的临界荷载是非常必要的。

表 2 弹塑性折减系数  $C_p$

失跨比	截面	$r=0$		$r=L/1\ 000$		$r=L/500$		$r=L/300$	
		$L=40\text{ m}$	$L=50\text{ m}$	$L=40\text{ m}$	$L=50\text{ m}$	$L=40\text{ m}$	$L=50\text{ m}$	$L=40\text{ m}$	$L=50\text{ m}$
$f/l=1/5$		0.35	0.38	0.42	0.60	0.47	0.72	0.44	0.68
		0.32	0.31	0.35	0.53	0.44	0.64	0.38	0.60
$f/l=1/6$		0.43	0.40	0.56	0.67	0.65	0.72	0.59	0.73
		0.31	0.26	0.52	0.57	0.61	0.69	0.60	0.66
$f/l=1/7$		0.36	0.46	0.75	0.75	0.71	0.80	0.69	0.78
		0.36	0.35	0.63	0.67	0.66	0.61	0.64	0.70
$f/l=1/8$		0.37	0.43	0.61	0.80	0.46	0.84	0.52	0.82
		0.34	0.36	0.53	0.61	0.43	0.80	0.58	0.76

2.3 初始缺陷的影响

对每一个网壳计算模型均进行了初始几何缺陷 ( $L/1\ 000 \sim L/300$ )影响分析,利用网壳结构的特征值屈曲模态,即网壳结构的最低阶失稳模态来模拟结构的初始缺陷分布,在均布荷载作用下,当初始缺陷为  $L/1\ 000$ 时,网壳弹塑性极限承载力与理想网壳承载力平均比值为 0.85,最低达 0.66;初始缺陷为  $L/300$ 时,平均比值为 0.52,最低可达 0.47。可见初始缺陷对于施威德勒型网壳的极限承载力的影响是非常显著的。

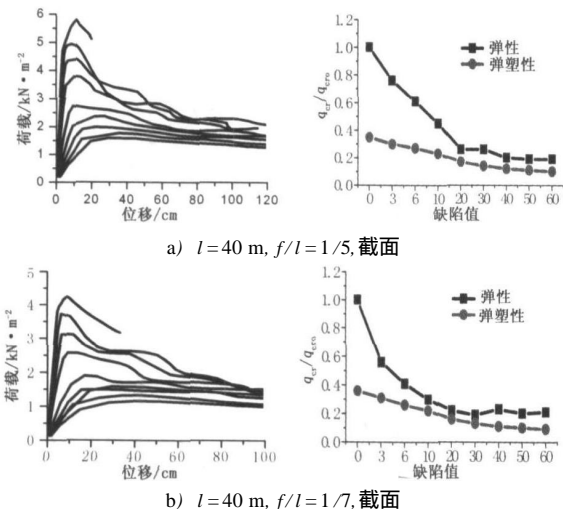


图 5 不同初始缺陷时的全过程曲线及临界荷载变化曲线

为了对缺陷的影响有一个完整概念,我们进一步研究了不同大小的初始缺陷对网壳性能的影响。选择 40 m 跨,矢跨比为 1/5、1/7,1号截面的施威德勒型网壳,考虑九种不同大小的初始缺陷 ( $r=0, 3, 6, 10, 20, 30, 40, 50, 60\text{ cm}$ )进行分析。为便于对比分析,将仅考虑几何非线性和考虑双重非线性所得到的网壳极限荷载随缺陷值变化的曲线列于图 5 中。如图所示,可以看到在开始阶段,对于弹性网壳的极限荷载随缺陷增大迅速下降,当缺陷值接近  $L/100$ 时,个别网壳出现承载力提高的“畸变现象”(图 5b)。而对于弹塑性网壳极限荷载始终随缺陷增大而降低,但下降幅度非常平

缓,可以看出弹塑性施威德勒型球面网壳对于缺陷的敏感性明显低于弹性网壳。按照规程(JGJ61-2003)<sup>[6]</sup>规定当最大初始缺陷值为  $L/300$ 时,在本文研究范围内,网壳极限荷载下降到完整网壳的 47%~64%;所以由于初始缺陷存在的不可避免性,在实际工程中严格控制安装误差对于保证施威德勒型网壳临界荷载是非常关键的。

2.4 竖向不对称荷载分布的影响

对每例网壳均按三种竖向荷载比例 ( $p/g=0, 1/2, 1/4$ ,活荷载  $p$ 按半跨分布)的不对称布置进行了全过程分析。所得到的曲线非常有规律性,为了节省篇幅,图 6 给出了跨度为 40 m,矢跨比为 1/5、1/7 球面网壳在不对称荷载作用下的全过程曲线,这些曲线均以总荷载(即  $p+g$ )作为纵坐标。我们发现每个小图中对应三条曲线的极限荷载(均以  $p+g$ 作为指标)数值相差非常接近。显然在考虑材料非线性的情况下,施威德勒型球面网壳对竖向不对称荷载作用也是很敏感的,极限承载力降低幅度通常小于 5%,与以往研究<sup>[7]</sup>获得的球面网壳属于对不对称荷载作用不敏感结构的结论一致。

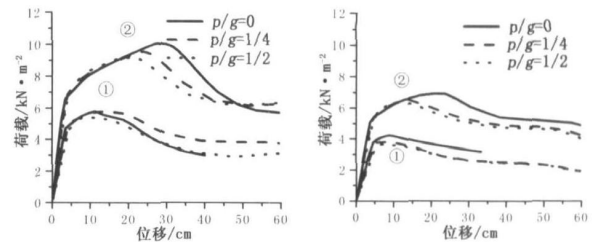
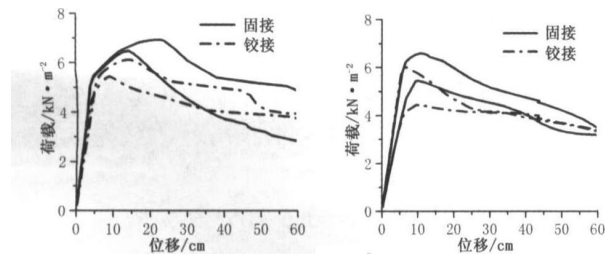


图 6 不对称荷载作用下全过程曲线

2.5 支承条件的影响

考虑到实际工程中支承条件的多样性,针对以上参数方案的支承条件进行了专门的研究。为节省篇幅这里只列出 40 m、50 m,矢跨比 1/7、1号截面的全过程分析曲线(图 7),同时给出了具有  $L/1\ 000$ 初始缺陷的网壳在两种支承条件(周边固接和周边铰接)的全过程曲线。可以看出,对于完整结构,铰接支承条件

下的极限稳定承载力明显低于固接支承条件,降低率 13% ~ 26%,说明支承条件的改变对于施威德勒型球面网壳的弹塑性极限承载力影响较大。由于实际工程中结点的安装误差是不可消除的,因此我们可以得到这样的结论,即在工程设计中应适当考虑不同支承条件对于施威德勒型球面网壳极限承载力的影响。



a)  $l=40\text{m}, f/l=1/7$ , 截面  
b)  $l=50\text{m}, f/l=1/7$ , 截面  
图 7 不同支承条件下的全过程曲线

### 3 结论

通过对于施威德勒型球面网壳双重非线性全过程分析结果的统计、归纳,发现施威德勒型球面网壳稳定性能有着非常好的规律性,这些有价值的规律使我们对施威德勒型球面网壳的弹塑性稳定性能有了一个全面、准确的认识,并得出以下几点结论。

1) 材料非线性对于施威德勒型球面网壳极限稳定承载力的影响相当显著,考虑材料非线性影响的网壳极限承载力最低可达到网壳弹性极限承载力的 26%,平均为 56%。

2) 竖向不对称荷载作用对于施威德勒型球面网壳弹塑性极限稳定承载力的影响与弹性分析结果基本

一致,表明此类网壳对于竖向不对称荷载分布不敏感。

3) 而对于初始缺陷的影响与弹性分析结果不同在于,初始缺陷对于网壳弹塑性极限承载力的影响较小,按初始缺陷为跨度的  $1/300$  计算,弹塑性极限承载力与理想网壳极限承载力的平均比值为 62%,偏于保守可按降低率为 50% 考虑。

4) 由于实际工程中支承条件于理想条件很难保持一致,建议在工程设计中应适当考虑支承条件变化对于施威德勒型球面网壳极限承载力的影响。

### 参考文献:

- [1] 沈世钊,陈昕.网壳结构稳定性[M]北京:科学出版社,1999.
- [2] 刘涛,杨凤鹏.精通 ANSYS[M]北京:清华大学出版社,2002.
- [3] J L Meek H S Tan Geometrically non-linear analysis of space frames by an incremental iterative technique[J] Comput Meth Appl Mech Engng, 1984, 47: 261 - 282.
- [4] M. Papadrakakis, Post-Buckling Analysis of Structures by Vector Iteration Methods[J] Comput and Struct, 1981, 14, 393 - 402.
- [5] 沈世钊.大跨空间结构理论研究若干新进展[A]第十一届空间结构学术会议论文集[C]2005,南京,26 - 40.
- [6] JGJ61 - 2003,网壳结构技术规程[S]
- [7] 张春丽,李正良,赵一,等.荷载非对称分布对单层球面网壳稳定性的影响[J]重庆建筑大学学报,2004,26(2): 65 - 69.

(上接第 48 页)

的特征与品质,使整个空间环境产生意境,启发联想,这与以“意”为主的中国传统美学思想不谋而合。

由于不同地域及不同时代的社会、文化因素的影响,门的形态千差万别。南方建筑的门轻灵通透,北方建筑的门则较为稳重厚实。同时,在装饰领域,门时常被设计成一种装饰图案或隔断来表现一种风格与地域文化。此时,门这一符号更多地表现出其物质形态掩盖下的文化内涵。

### 3 结语

“门”作为中国古典建筑的核心艺术之一,作为儒家“礼制”传统的象征物之一,渗透着中国传统伦理文化的精髓以及强烈的民族情趣、地方气息和艺术文化内涵,应在更高层面上得到重视。在现代建筑的创作中,门作为一种常用的建筑造型语汇,应汲取门的传统

内涵,使其自在生成于建筑之中,并使整个建筑空间形态得到和谐的升华。

### 参考文献:

- [1] 梁振学.建筑入口形态与设计[M]天津:天津大学出版社,2001.
- [2] 吴裕成.中国的门文化[M]天津:天津人民出版社,1998.
- [3] 侯幼彬.中国建筑美学[M]哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1997.
- [4] 楼庆西.中国建筑的门文化[M]郑州:河南科学技术出版社,2001.
- [5] 刘敦桢.中国古代建筑史[M]北京:中国建筑工业出版社,1980.
- [6] 杜娟.中国传统庭院模式之起源与涵义[J]重庆建筑大学学报,2004,26(3): 6 - 9.