

单层柱面网壳有限元 精细化建模与分析

Fine Modeling and Analysis of Single-layer Cylindrical Reticulated Shell
by Finite Element Method

王 宁 陈建伟 尤志国 蔡丽坤 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

单层柱面网壳有限元 精细化建模与分析

王 宁 陈建伟 著
尤志国 蔡丽坤



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

单层柱面网壳有限元精细化建模与分析/王宁等著. —武汉:武汉大学出版社, 2015. 12

ISBN 978-7-307-17360-6

I. 单… II. 王… III. 网壳结构—精细化—有限元分析—应用软件
IV. TD353-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 295734 号

责任编辑:路亚妮 方竞男

责任校对:谢丽娟

装帧设计:吴 极

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: whu_publish@163.com 网址: www.stmpress.cn)

印刷:虎彩印艺股份有限公司

开本: 787×1092 1/16 印张: 7.75 字数: 171 千字

版次: 2015 年 12 月第 1 版 2015 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-17360-6 定价: 43.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购买我社的图书, 如有质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

空间结构是近三十多年发展最快的结构形式之一,因其超大的室内空间和美丽的外形而受到人们的青睐,被越来越广泛地应用到体育场馆、火车站和会展中心等重要的公共建筑中。这些建筑除了满足其自身建筑功能要求外,大多成为地区乃至国家的标志性建筑或文化活动中心。因此,此类结构的安全性至关重要,一旦它们发生破坏或倒塌,直接和间接造成的损失和不良影响都是巨大的。我国处在地震多发区,地震发生频繁,个别地震异常猛烈,特别是2008年发生的汶川地震,达到了空前的8.0级,造成大量建筑物倒塌,生命和经济损失惨重。随着震级的加大,空间结构的安全性势必受到威胁。因此,汶川地震后越来越多的学者投入到了空间结构的抗震研究中。

空间结构在罕遇地震作用下的倒塌机理研究是此类结构抗震研究和设计的前提与基础,对于确保其高烈度地区的安全具有重要的理论意义和应用价值。空间结构中采用焊接空心球节点的单层网壳结构,因其施工方便且外形美观而逐渐被广泛应用,已成为最常用的空间结构之一。对于此类单层网壳,传统的建模方法因没有考虑汶川地震这样的罕遇地震作用,而采用了简化节点,即直接用刚性节点代替空心球节点。显然这种模型不能考虑球节点在罕遇地震作用下的屈服和损伤带来的节点刚度变化,因此,对于罕遇地震作用下的倒塌分析,传统模型得出的结果可能存在较大误差。为了进行罕遇地震作用下单层网壳倒塌机理的研究,需要开发能够考虑节点刚度变化的精细化模型。

本书汇总了作者近几年在精细化模型建模和计算方面的研究成果,主要包括:单层柱面网壳精细化模型的建模过程研究,传统模型和精细化模型的地震响应对比分析,损伤累积本构模型的研究及等效简化模型的开发。希望本书能为进行精细化模型方面研究的读者提供一些参考。

本书的研究工作得到了唐山市科技计划项目(14130207a)的支持,且得到了北京工业大学薛素铎教授的指导和帮助,在此一并表示感谢。

由于著者水平和学识有限,书中不足之处在所难免,望读者多提宝贵意见。

本书有关彩图及扩展阅读材料可扫描书末二维码获取。

著 者

2015年8月于华北理工大学

目 录

1	绪论	(1)
1.1	引言	(1)
1.2	单层柱面网壳简介	(2)
1.3	精细化模型的研究概况	(3)
	参考文献	(6)
2	单层柱面网壳精细化模型研究	(8)
2.1	球节点承载力研究	(8)
2.2	壳单元 S4R	(9)
2.3	材料本构	(11)
2.4	单元网格划分	(11)
2.5	钢管的单元网格划分	(21)
2.6	整体网壳力学性能分析	(23)
2.7	本章小结	(28)
	参考文献	(29)
3	节点刚度对单层柱面网壳动力特性的影响分析	(30)
3.1	网壳动力失效分析概述	(30)
3.2	常用模型与精细化模型动力特性的差别	(33)
3.3	精细化模型节点刚度变化对结构动力特性的影响	(51)
3.4	本章小结	(61)
	参考文献	(61)
4	壳单元网壳模型损伤本构研究	(64)
4.1	网壳考虑材料损伤的研究概况	(64)
4.2	损伤理论应用于壳单元	(67)
4.3	壳单元损伤材料模型的建立	(69)
4.4	双向损伤本构模型的建立	(76)
4.5	损伤模型在网壳失效分析中的应用	(81)
4.6	本章小结	(84)
	参考文献	(85)

5 精细化模型的等效简化模型研究..... (88)

5.1 确定简化模型杆件单元划分数目..... (88)

5.2 节点区杆件刚度对结构地震响应的影响..... (90)

5.3 结构参数对等效简化模型模拟精度的影响..... (96)

5.4 地震动峰值加速度对简化模型模拟精度的影响 (102)

5.5 地震波种类对等效简化模型模拟精度的影响 (107)

5.6 本章小结 (110)

参考文献..... (110)

附录..... (111)

1.1 引言

空间结构主要的结构形式有:实体结构、网格结构、张力结构及柔性构件和刚性构件组成的组合结构体系^[1]。其中网格结构具有多向受力性能好、空间作用整体性好、施工方便等特点,是适用于大跨度建筑的良好结构形式。

网壳结构是网格结构中常用的一种外形美观的结构形式。网壳按外形不同可分为:球面网壳、柱面网壳、圆锥形网壳、双曲扁网壳、双曲抛物面网壳等。具有现代意义的穹顶网壳可追溯到 1863 年,是由“穹顶之父”施威德勒(Schwedle)设计的直径 30m 的钢网壳。后来发展的许多网壳结构形式都是在施威德勒穹顶的基础上变化而成的,可以说施威德勒穹顶是空间结构中单层球面网壳的雏形。

网壳结构不但具有受力合理、空间跨越能力强的优点,而且这种结构由小型构件组装而成,不需要大型设备,现场安装简便,施工速度快。网壳结构中的小型构件和连接节点都可以在工厂预制,便于走工业化道路。由于其综合经济技术指标好,因此这类结构的应用范围越来越广泛。在中、小跨度的民用和工业建筑中,在大跨度、超大跨度的各种建筑中都可以见到它的身影。可以说经过几十年的发展,网壳结构已经成为发展最快、应用最广的空间结构形式之一。

如今,空间结构大多成为地区、城市甚至国家的标志性建筑,如果其发生破坏或倒塌,后果将不堪设想。众所周知,我国处在地震多发地区,地震发生频繁且猛烈。1949—2000 年间发生 7 级以上地震有 14 次,造成伤亡人数达 49.0 万,地震成灾面积达 28.42 万平方千米,房屋倒塌达 896.8 万多间^[2]。2008 年发生的汶川地震,达到了空前的 8.0 级,造成大量建筑物倒塌,生命和经济损失惨重。从世界范围内看,强震也时有发生,而且有增长的趋势,如 2010 年智利“2·27 地震”达到了 8.8 级,2011 年日本“3·11 地震”达到了 9.0 级,震级之大甚至连坚固的核电站都没能幸免。从这些震害中可以看到,震级的加大使结构的抗震研究面临着新的挑战。为了保证网壳结构能够抵抗罕遇地震,学者们进行了大量

的研究。本书所介绍的单层柱面网壳精细化建模等内容就是这些研究中的一部分,它是国家基金重大研究计划“大跨空间结构强震灾变行为精细化研究”的一个分支。

1.2 单层柱面网壳简介

单层柱面网壳(图 1-1)是单层网壳结构中常用的一种结构形式。因其纵向侧面图是一个圆弧形(图 1-2),便于标准化生产,所以应用比较广泛。单层柱面网壳常用于干燥棚、游泳池和火车站房等大跨度建筑中。其组成主要包括两部分:钢管杆件和节点。钢管杆件常用的有方钢管和圆钢管两种;节点常用的有螺栓球节点、焊接空心球节点和铸钢节点三种,如图 1-3 所示。其中焊接空心球节点由于施工方便而应用相对广泛;螺栓球节点多用于双层网壳,在单层网壳中多用于跨度较小的临时结构中。

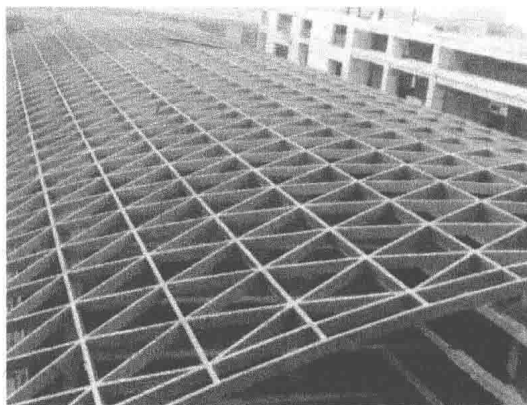


图 1-1 单层柱面网壳

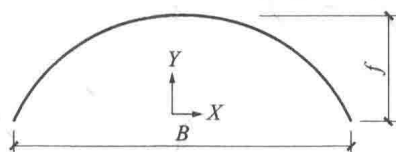
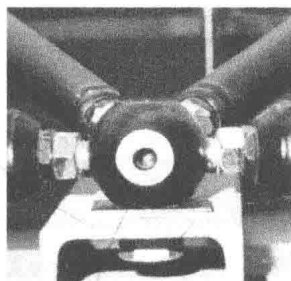
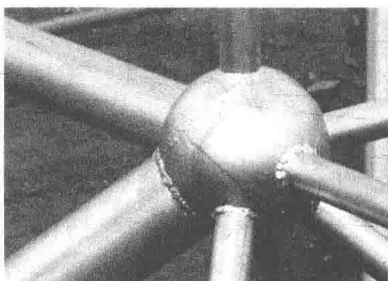


图 1-2 单层柱面网壳侧面图



(a)



(b)



(c)

图 1-3 网壳常用节点形式

(a)螺栓球节点;(b)焊接空心球节点;(c)铸钢节点

1.3 精细化模型的研究概况

为了简化计算,以前在进行单层网壳的静力或动力分析时,常用的建模方法都对节点采用了简化处理。例如:双层网壳常用的螺栓球节点和单层网壳常用的焊接空心球节点,在分析时把它们分别简化为无摩擦的铰节点和刚性节点^[3-6]。由于网壳抗震能力较好,对于设防烈度较低的地区(如6度区和7度区),网壳在设计地震动峰值加速度作用时一般是处于弹性工作阶段。这种情况下把焊接空心球节点看作刚性节点进行分析是可以的,但是把螺栓球节点看成铰节点就会使结果偏保守。因为螺栓球节点中的螺栓杆能够承担一部分弯矩作用,如果把它看作无摩擦的铰节点进行设计计算,其结果必然会浪费材料。

随着试验手段和计算机运算能力的快速发展,很多学者进行了更深入的研究,他们希望计算结果更接近实际情况。马会环等^[7]较早进行了节点中螺栓弯曲刚度的试验研究,他们发现其刚度值不小,若把螺栓球节点假设为无摩擦的铰节点并不合理。同时,一些理论方面的研究得出节点的弯曲刚度对结构的静力稳定性有影响,而且影响是比较明显的^[8-12]。其中,哈尔滨工业大学的范峰等^[10]得出的结论是:半刚性节点的弯曲刚度是影响单层球面网壳稳定性能的重要因素之一;谢志红等^[11]通过改变节点刚度,对一双层球面网壳进行了水平地震作用下的时程分析,发现采用半刚性节点更接近实际情况;López等^[12]对一网壳模型进行了静力稳定性分析,变化节点转动刚度,由铰接变为刚性连接,得出的两条曲线如图1-4所示[图1-4(a)为铰接,图1-4(b)为刚性连接],可见转动刚度的影响是比较大的。

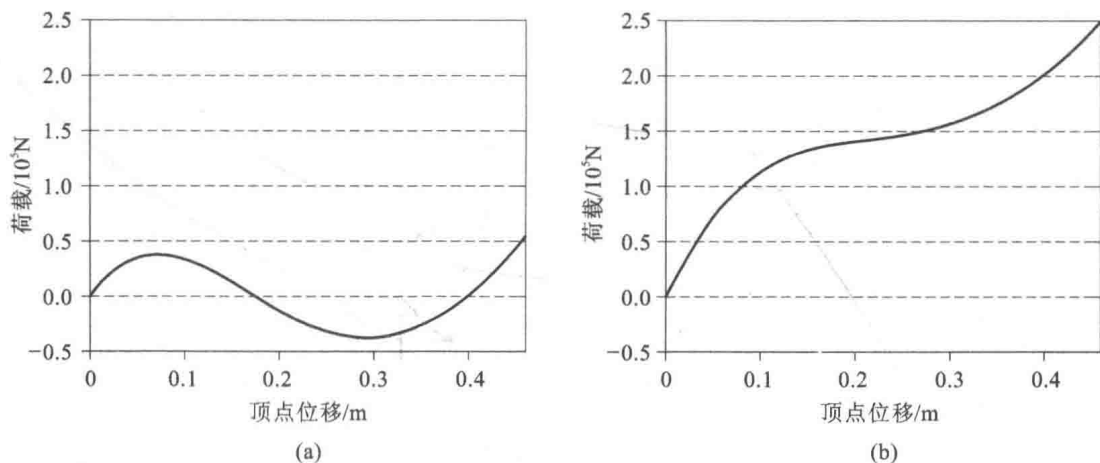


图 1-4 顶点位移与外力的关系曲线^[13]

(a)铰节点;(b)刚性节点

基于对螺栓球节点弯曲刚度的研究,修订后的 Eurocode 3 标准(钢结构设计)中要求:进行单层网壳的设计时要考虑节点的实际刚度^[13]。López 等^[14]在理论研究的基础上进一步采用了试验研究,试验采用螺栓圆柱节点,如图1-5所示,通过变化螺栓距离

和直径等参数改变节点的抗弯刚度,加载方式如图 1-6 所示,中间是节点两边是方钢管,由试验结果得出节点抗弯刚度的变化会明显影响构件的承载能力。因此,现在大部分学者在建立采用螺栓球节点或螺栓圆柱节点的网壳模型时都用半刚性节点,考虑节点的弯曲刚度。

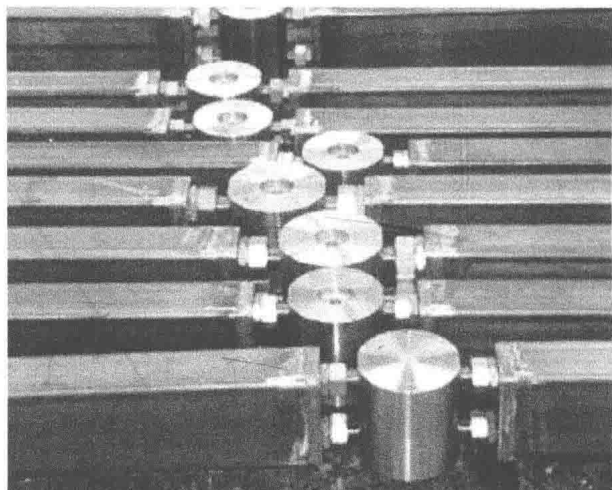


图 1-5 螺栓圆柱节点

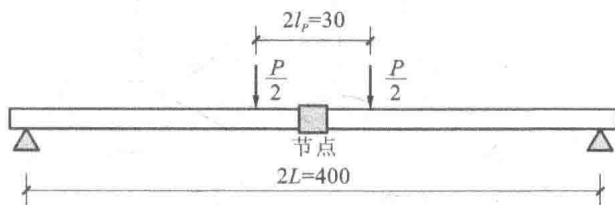


图 1-6 含螺栓圆柱节点的杆件加载示意图(单位:cm)

与螺栓球节点相比,焊接空心球节点的优点较多,如:刚度大、质量轻、制造工艺简单和价格便宜等,所以它被广泛应用于各种空间网壳和网架的实际工程中,尤其是在单层网壳实际工程中的应用更为普遍。现在,学者们在研究中都采用精细化模型以考虑螺栓球节点的弯曲刚度,而对于更常用的焊接空心球节点,大多数学者还是没有采用精细化模型考虑其刚度。虽然空心球节点的刚度较大,但是它也不是完全的刚体,试验证明在较大的杆件压力下会发生较大的变形^[15],所以只能称它为相对刚性节点。在单层网壳抗震设计或地震响应的研究中,常用的传统模型是把空心球节点假设为刚性节点,直接与周围钢管杆件连接(图 1-7)^[16-19]。在多遇地震作用下构件处于弹性变形阶段,其分析误差可能较小,但是在罕遇地震作用下,特别是在 8 度或 9 度设防区,其节点很可能进入塑性阶段工作。比如:在汶川地震中,有些地方的地震动加速度峰值接近甚至超过 $1.0g$,这远超出《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)中时程分析的最大加速度值 $620gal$ (gal 即 cm/s^2 , $1.0g=1000gal$),在如此强烈的地震动作用下,部分空心球节点很可能会发生较大塑性变

形甚至破坏。如果用传统的单层网壳模型进行强震下的动力响应分析,因它无法考虑到节点的变形或失效,分析结果可能会存在较大的误差,如果按照此结果进行设计,结构会偏于不安全。

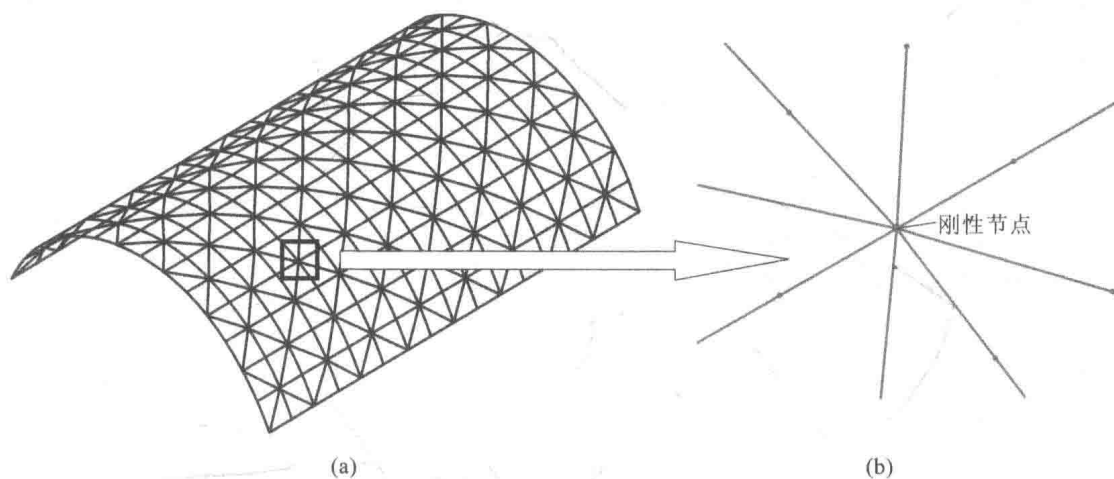


图 1-7 单层柱面网壳常用模型及其局部图

(a)单层柱面网壳;(b)节点处放大图

为了结构更安全,人们开始越来越关注网壳结构在罕遇地震作用下的真实动力响应特性和失效机理。因此,传统的弹性分析方法已经不能满足要求,分析中要考虑结构的几何非线性和材料的非线性。在弹性分析时,建模中忽略的节点刚度等因素在罕遇地震分析时需要重新确定其对结构地震响应影响的程度。对于采用空心球节点的网壳,在经历汶川地震这样的罕遇地震作用时,分析模型要能够按照实际情况模拟出节点的刚度和变形。有了这样的模型才可以研究节点刚度变化对结构地震响应的影响,进而研究不同节点刚度情况下结构的失效机理。

20 世纪 90 年代后期,国内在焊接空心球节点精细化模型方面的研究成果主要来自王星和罗永峰等,他们分别研究了节点刚度对网架挠度和网壳稳定性的影响^[20,21],他们得出的结论是节点刚度的影响不能忽略。2008 年汶川地震后,研究者开始增多^[22-24],其中北京工业大学的廖俊、张毅刚等^[22]提出了一种“短杆模型”来等效网壳空心球节点的刚度,采用梁单元杆件代替空心球节点(图 1-8),这样可以方便地调节节点区杆件的刚度,使其与球节点的刚度接近。但是这些研究采用的等效节点模型不能同时考虑节点轴向刚度与弯曲刚度的耦合,而且等效模型的分析结果没有与试验结果或实体模型的分析结果进行对比,所以得出的分析结果可能与实际情况有一定的差距。

针对此研究背景,著者在 2010 年^[25]开发了一种能够按照实际情况考虑节点刚度的单层柱面网壳有限元模型以研究结构的失效机理,本书第 2 章将详细论述此模型的建模过程,此处不再赘述。

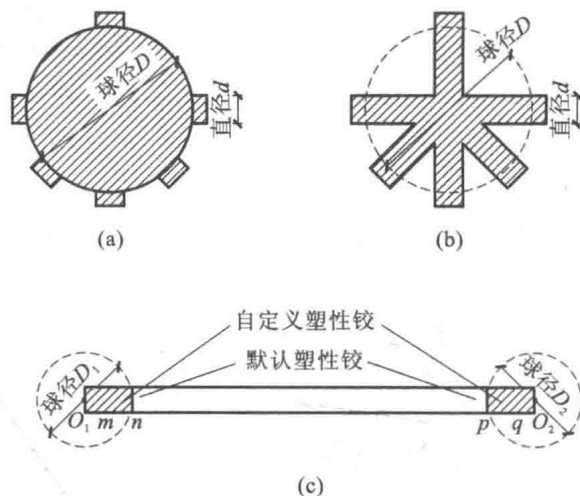


图 1-8 等效杆件示意图

(a) 空心球节点; (b) 短杆等效节点; (c) 等效节点的塑性铰区域

【参考文献】

- [1] 张毅刚, 薛素铎, 杨庆山, 等. 大跨空间结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 1-50.
- [2] 沈聚敏, 周锡元, 高小旺, 等. 抗震工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 22-50.
- [3] Tsuboi Y. Analysis, design and realization of space frames a state-of-the-art report[J]. Bulletin of the International Association for Shell and Spatial Structures, 1984: 114.
- [4] 陈务军, 董石麟, 付功义, 等. 凯威特型局部双层网壳结构特性分析[J]. 空间结构, 2001, 7(1): 25-33.
- [5] 薛素铎, 曹资, 王健宁. 单层柱面网壳弹塑性地震反应特征[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(1): 56-60.
- [6] 林智斌, 桂国庆, 钱若军. 单层球壳结构在简单荷载作用下的动力稳定分析[J]. 工程力学, 2006, 23(6): 6-10.
- [7] 马会环, 范峰, 柯嘉, 等. 网架网壳结构半刚性节点试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(11): 65-71.
- [8] 郭小农, 沈祖炎. 半刚性节点单层球面网壳整体稳定性分析[J]. 四川建筑科学研究, 2004, 30(3): 10-12.
- [9] 张竞乐, 赵金城. 节点刚度对凯威特型单层球面网壳稳定性的影响[J]. 空间结构, 2004, 10(2): 43-45.

- [10] 范峰,曹正罡,崔美艳.半刚性节点单层球面网壳的弹塑性稳定性分析[J].哈尔滨工业大学学报,2009,41(4):1-6.
- [11] 谢志红,常晓霞,刘锋,等.半刚性连接球面网壳结构的动力分析[J].空间结构,2009,15(2):42-47.
- [12] López A, Puente I, Serna M A. Numerical model and experimental tests on single-layer latticed domes with semi-rigid joints[J]. Computers and Structures, 2007, 85(7-8):360-374.
- [13] EN 1993-1-8, Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-8: Design of joints, 2005.
- [14] López A, Puente I, Aizpurua H. Experiment and analytical studies on the rotational stiffness of joints for single-layer structures[J]. Engineering Structures, 2011, 33(3):731-737.
- [15] 韩庆华,潘延东,刘锡良.焊接空心球节点的拉压极限承载力分析[J].土木工程学报,2003,36(10):1-6.
- [16] 王秀丽,王磊.单层椭球网壳的动力性能研究[J].四川建筑科学研究,2009,35(1):19-22.
- [17] 杨大彬,张毅刚,吴金志.增量动力分析在单层网壳倒塌评估中的应用[J].空间结构,2010,16(3):91-96.
- [18] 曹资,薛素铎.空间结构抗震理论与设计[M].北京:科学出版社,2005:1-35.
- [19] 曹正罡,孙瑛,范峰,等.单层柱面网壳弹塑性稳定性能研究[J].土木工程学报,2009,42(3):55-59.
- [20] 王星,董石麟,完海鹰.焊接球节点刚度对网架内力和挠度的影响分析[J].空间结构,1996,2(4):34-40.
- [21] 罗永峰,胡素娟,沈祖炎,等.节点刚性对带拱肋单层柱面网壳的稳定性影响研究[J].空间结构,1995,1(2):18-22.
- [22] 廖俊,张毅刚.焊接空心球节点荷载-位移曲线双线性模型研究[J].空间结构,2010,16(2):43-45.
- [23] 廖俊,张毅刚,吴金志.半刚性连接焊接空心球网壳弹塑性分析的短杆模型[J].世界地震工程,2010,26(3):37-42.
- [24] Li L M, Yuan X F. Influence of joint stiffness on dynamic performance of the single-layer reticulated shell[J]. Spatial Structures, 2011, 17(3):92-96.
- [25] 王宁,薛素铎,李雄彦.单层柱面网壳强震作用精细化建模研究初探[C]//第十三届空间结构学术会议论文集.深圳,2010.

2

单层柱面网壳精细化模型研究

本章所提到的“精细化”是指模型能够按照实际情况模拟出焊接空心球节点弯曲刚度与转动刚度的耦合。在前人的研究中,能够考虑球节点两种刚度耦合情况的承载力试验研究和模拟研究成果较多,这些成果可以为本书的精细化模拟研究提供很好的参考。

2.1 球节点承载力研究

早期对空心球极限承载能力的研究主要局限在轴向单独施加荷载^[1-4];后来,以浙江大学董石麟和袁行飞为代表的学者开始研究轴力和弯矩共同作用下及平面内三向轴力和弯矩共同作用下的节点极限承载力^[5,6]。图 2-1 所示为平面内三向轴力和弯矩共同作用下的加载模型图,显然这样更接近球节点的实际受力情况。他们通过试验和模拟得出的结果是:在轴力与弯矩共同作用下,增加弯矩会明显减弱球节点轴向的极限承载力;增加轴向力会明显减弱节点的极限抗弯能力。他们通过大量的模拟(图 2-2 中的各种点为实体模型的模拟结果)和试验研究,总结并验证了球节点极限轴力和极限弯矩的关系公式^[5],即式(2-1):

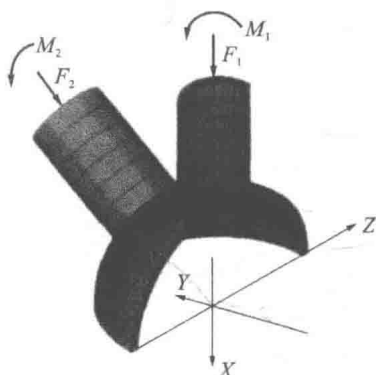


图 2-1 三向轴力与弯矩共同作用(1/4 模型)

$$\eta_N = \frac{2}{\pi} \arccos \eta_M \quad (2-1)$$

式中 η_N ——球节点在弯矩与轴力共同作用下的最大轴力与纯压下极限轴力的比值；
 η_M ——球节点在弯矩与轴力共同作用下的最大弯矩与纯弯下极限弯矩的比值。
 η_N 与 η_M 的拟合关系曲线如图 2-2 中的实线所示，即公式(2-1)。

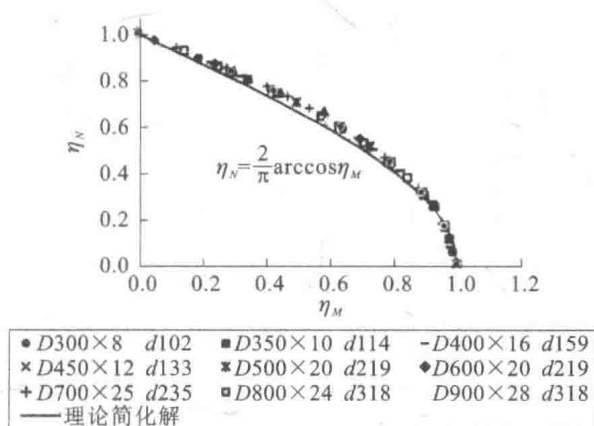


图 2-2 压弯荷载下的无量纲轴力-弯矩(η_N - η_M)关系^[5]

文献[6]通过大量模拟，得出的关系曲线如图 2-3 所示，图中 λ 为侧管轴力 F_2 与中间管轴力 F_1 的比值(F_1 和 F_2 见图 2-1)。由图 2-3 可以看到，在平面内三向轴力和弯矩作用下， λ 小于 0.5 时，节点的承载能力与单向作用时的差别不大。

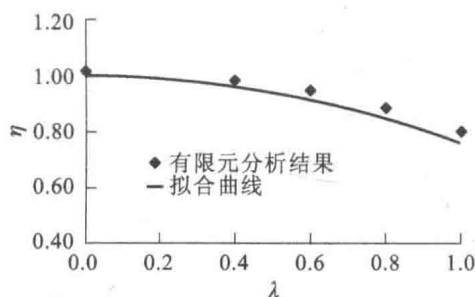


图 2-3 三向轴力与弯矩共同作用下的球节点承载力^[6]

2.2 壳单元 S4R

随着计算机运算能力的不断提升，用壳单元建立实际尺寸的网壳模型进行计算已经成为可能。书中涉及的网壳模型都是用 ABAQUS 有限元软件中的壳单元 S4R 建立的，因此首先简单介绍壳单元 S4R。

在 ABAQUS 中具有两种壳单元：常规的壳单元和基于连续体的壳单元，通常需要定义单元的平面尺寸、表面法向和初始曲率。常规的壳单元对参考面要进行离散，但是它的节点不能定义壳的厚度，而只能通过截面性质定义壳的厚度；另外，基于连续体

的壳单元类似于三维实体单元,它们对整个三维物体进行离散和建立数学描述,其动力学和本构行为是类似于常规壳单元的。基于连续体的壳单元在模拟接触问题时更精确,而常规单元更适合求解薄壳问题。建立壳单元网壳节点和杆件模型首选的是常规壳单元。

ABAQUS 采用的数值积分法允许单元沿厚度方向的每一个积分点独立计算应力值和应变值,这就可以支持材料的非线性行为。例如,弹塑性材料的壳在内部积分点还保持弹性时,其外部积分点可能已经达到了屈服。在 S4R(4 节点,缩减积分)壳单元中沿厚度积分点的分布和积分点位置如图 2-4 所示,截面上默认为 5 个积分点,单元只有一个位置有积分点,在两个对角线的交点处[图 2-4(b)]。5 个积分点对于大多数非线性问题就已经足够了,对于线性问题,3 个积分点就可以提供沿厚度方向较精确的积分值。

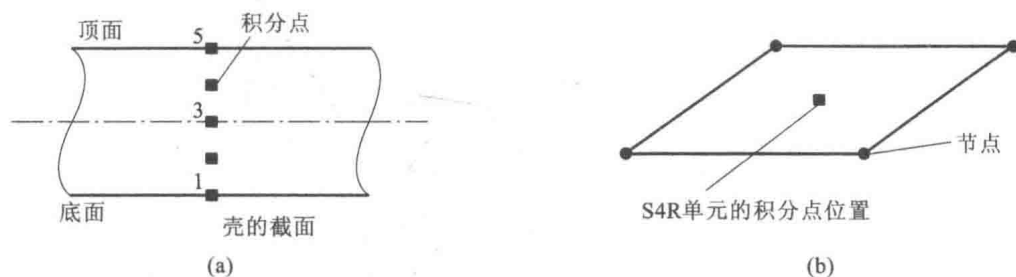


图 2-4 S4R 壳单元中的积分点

(a) 截面图; (b) 平面图

壳单元中节点号的增加方式决定了其正法线的方向(图 2-5 中 n 的方向)。正法线方向定义了基于单元的压力荷载(element-based pressure load)应用的约定和随着壳厚度变化的量值的输出。

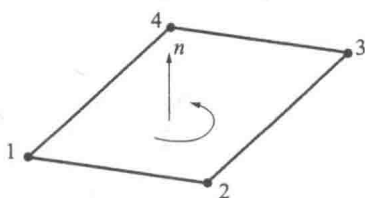


图 2-5 壳单元的正法线方向

壳体问题一般可以归结为两类:薄壳问题和厚壳问题。厚壳问题假设横向剪切变形对计算结果有重要影响;而薄壳问题假设横向剪切变形对结果的影响非常小,可以忽略不计。对于要研究的空心球节点和钢管杆件,要考虑它们的横向剪切变形,所以这属于厚壳问题。

2.3 材料本构

本书所涉及的算例中钢材都选用 Q235 钢,本构关系采用双线性强化模型,如图 2-6 所示。其中:屈服强度 $\sigma_y=235\text{MPa}$,对应的应变 $\epsilon_1=0.114\%$,弹性模量为 $2.06\times 10^{11}\text{Pa}$,应变 $\epsilon_2=20\%$,对应的极限应力 $\sigma_u=375\text{MPa}$ 。

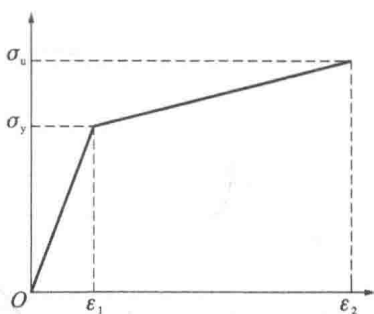


图 2-6 材料本构关系图

2.4 单元网格划分

网壳精细化模型的建立主要包括 4 个阶段:①为了节点能够通用,按照周围连接 8 根杆件的需求定出初步的网格划分形式,建立球节点模型;②参照节点的网格划分确定杆件截面的网格划分,再初步定出纵向的划分段数,建立杆件模型;③对杆件和节点模型进行承载力演算,确定网格划分形式;④把节点和杆件模型复制,建立整个网壳模型。模型中球节点和杆件都采用壳单元,模型中的球节点和钢管杆件都是按照实际形状和大小建立。初步选取的网壳外形如图 2-7 所示(交叉斜杆正交正放网壳)。

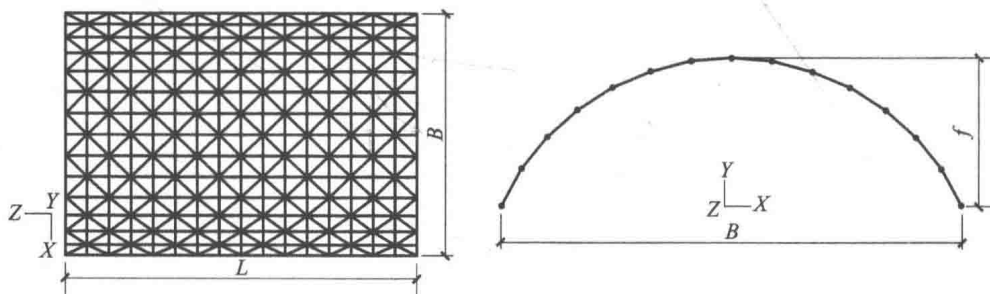


图 2-7 交叉斜杆正交正放网壳外形图

由于 ABAQUS 软件的前处理不能满足壳单元网壳模型的建模要求,因此建模采用了前处理功能强大的 ANSYS 有限元软件。图 2-8 所示为采用 ANSYS 软件建立的球节点模型,其中图 2-8(a)和图 2-8(b)所示分别为网格划分前、后的节点外形图。这里节点