

# 碗式半刚性节点网壳弹塑性稳定分析

范峰, 马会环, 张洋, 沈世钊

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090, ffan@hit.edu.cn)

**摘要:** 碗式节点(Socket-joint)具有一定的抗弯承载力,是一种典型的半刚性节点,也是一种新型的大跨空间结构节点形式.为能够较准确地得出碗式节点的弯矩-转角曲线,使用有限元软件 ANSYS 对其进行数值模拟,研究了碗式节点的弯曲刚度特征,得到节点的弯矩-转角曲线.在此基础上,研究了40 m的K8型半刚性节点的单层球面网壳的弹塑性稳定性能,分析了网壳在矢跨比,节点的弯曲刚度,网壳分频数等参数变化的情况下,网壳极限承载力的变化规律.通过参数分析,较为全面掌握了碗式半刚性节点单层球面网壳的稳定性能.

**关键词:** 碗式节点; 半刚性节点; 数值模拟; 单层球面网壳; 极限承载力

**中图分类号:** TU393.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2010)10-1513-06

## Elasto-plastic analysis on single layer reticulated domes with socket-joint system

FAN Feng, MA Hui-huan, ZHANG Yang, SHEN Shi-zhao

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, ffan@hit.edu.cn)

**Abstract:** A socket-joint system with partial bend-bearing capacity is a typical semi-rigid joint system. The numerical model of the joint was established with solid element and contact element using finite element software ANSYS. The mechanical characters of socket joint system were studied in detail and the bending stiffness curves of socket joints were established. Then, Using nonlinear beam element with spring elements in its each end, Kiewitt8 (K8) single-layer reticulated domes with socket joints were analyzed through ANSYS considering several different parameters including bending stiffness, ratio of rise to span, and division number. The influences of the parameters on the critical load of the domes were obtained.

**Key words:** socket joint system; semi-rigid join system; numerical model; single-layer reticulated dome; critical load

网架与网壳是近年来在建筑工程中广泛应用的一种空间结构形式,单层网壳结构以其受力合理、用料经济、造型美观多样,能覆盖较大的空间等优点而成为前景广阔的空间结构形式<sup>[1-2]</sup>.网壳结构的应用日益增多,跨度越来越大,稳定性计算问题显得尤为突出.

自70年代以来,国内外众多学者研究了诸如

荷载分布、矢跨比、几何初始缺陷等多种因素对网壳稳定性的影响,但是大量对单层网壳稳定性的研究都是基于网壳节点为刚接的假定<sup>[3-5]</sup>,这对于焊接球节点是基本成立的,但对于许多集成形式节点网壳,例如碗式节点的单层网壳,由于节点连接处允许杆件与节点之间的相对转动,故人们通常把该类网壳作为铰接网壳来处理,认为其不具有抗弯承载能力,故不能被使用在实际的工程中,但实际上,碗式节点并不是理想铰接节点,它具有一定的转动刚度,是介于铰接和刚接之间的一种半刚性的节点,这种半刚性节点的网壳也具有一定的抗弯承载力,且对于中小跨度的单层球

收稿日期:2008-10-30.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50778054);国家科技支撑计划资助项目(2006BAJ01B02);教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0333).

作者简介:范峰(1971—),男,教授,博士生导师;

沈世钊(1933—),男,博士生导师,中国工程院院士.

面网壳, 组装节点的网壳施工速度快, 定位精度高, 受力性能良好, 应用前景非常可观. 另一方面, 目前新型的节点形式日益增多, 并被广泛的应用于工程实践中, 类似于碗式节点, 盆式节点、毂式节点, 它们都是一种半刚性的节点, 不能再按照传统的铰接分析模型来计算网壳的承载力. 上述问题迫切要求研究半刚性节点网壳的稳定性能, 为工程设计和应用提供参考建议.

日本学者 Shibata 等<sup>[6]</sup>和丹麦学者 Mohammad<sup>[7]</sup>都对半刚性节点的刚度对网壳承载力的影响进行了研究. 范峰等<sup>[8]</sup>和馬会环等<sup>[9]</sup>对国内常用的螺栓球节点的半刚性性质及其网壳的稳定性能进行了深入研究, 得出了半刚性节点的网壳具有很好的承载能力, 对于中小跨度的网壳结构, 半刚性节点也是一个很好的选择.

碗式节点由球、螺栓、垫片和锥头组成, 具有一定的抗弯承载能力. 由于碗式节点是半刚性节点的一种, 因此研究中小跨度的碗式节点单层球面网壳, 考虑半刚性节点对其稳定性的影响, 揭示半刚性节点网壳更为真实的受力情况, 能够为碗式节点及其他新式半刚性节点的单层球面网壳在工程中的设计和应用提供参考.

## 1 碗式节点的数值模拟

### 1.1 节点的数值模拟方法

碗式节点 (socket-joint system) 是一种由开口铸钢空心球, 高强螺栓, 锥头及垫片组成的连接体系. 各个构件在工作时的相互之间复杂的受力状况, 例如滑移、脱离、紧靠等, 是分析时首要解决的问题, 因此一种精确化的模拟方法也要能够体现出上述受力特征.

ANSYS 有限元分析软件提供了多种单元供使用者依据不同情况进行选择, 梁单元和实体单元是其中两个常用的单元类型. 由于碗式节点模型构件大部分为短粗型, 故选择实体单元 Solid45 进行建模. 图 1 是在 ANSYS 中建立的节点各个组成部分的实体模型. Solid45 单元, 是一种 3-D 实体单元, 它用于 3 维实体结构模型中. 该单元类型共 8 个节点, 每个节点 3 个自由度,  $x, y, z$  3 个方向. 该元素具有塑性、徐变、膨胀、应力强化、大变形和大应变能力, 且单元各向同性. 节点各部分之间的相互作用主要是靠相互之间的接触面来完成的, 它的本质是结构的非线性问题. 由于接触使得结构部件与部件之间状态发生变化而引起非线性行为. 考虑面-面之间的受力特点, 可以用接触模拟法来对半刚性节点进行实体建模来精确模拟

其受力特点, 而这种模拟方法已在文献[8-9]中得到了很好的验证. 所谓“接触模拟法”, 即为考虑半刚性节点在承受外力时各个构件呈现的脱离与紧靠的状态, 选用 Conta173 表面接触单元和 Targrt170 目标单元来模拟各部件之间的接触面. 接触单元一般用于覆盖于三维实体或壳单元的表面, 没有边界中点, 与其联系的三维实体或壳单元的表面具有相同的形状. 当单元表面渗透到目标面上时, 接触就发生. 接触问题是一种高度非线性行为, 需要较大的计算资源, 为了进行实际有效的计算, 理解问题的特性和建立合理的模型是重要的.

就碗式节点数值模型采用直径为 250 mm, 壁厚为 25 mm 的节点球, 分为 5 组进行建模, 其中螺栓分别取 M24, M27, M30, M33, M36, 同时锥头及垫片分别与螺栓进行配套设置. 材料属性如表 1 所示. 为得到碗式节点在纯弯矩下的弯矩-转角曲线, 模型的约束及加载方式如图 2 所示, 模型在铸钢球节点的一侧施加三向固定约束, 在锥头处施加如图所示三角形式的节点力, 这样就相当于在悬臂梁上施加处处相等的弯矩, 进而可以研究节点在纯弯矩下的受力性能.

模型共设置了 7 个接触对, 分别在螺帽与内垫片接触面处, 内垫片与内球接面接触面处, 外球面与外垫片接触面处, 外垫片与锥头接触面处, 螺栓与球接触面处, 螺栓与内垫片接触面处, 螺栓与外垫片接触面处.

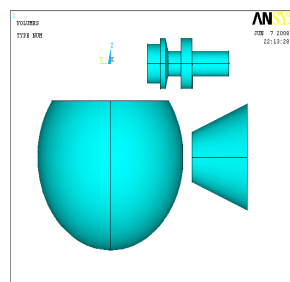


图 1 实体模型组成图

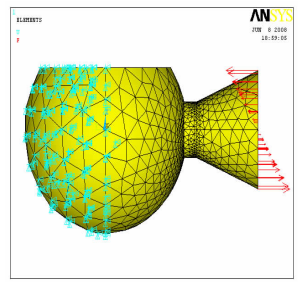


图 2 模型加载方式图

### 1.2 节点的数值模拟结果

图 3 和图 4 分别给出了节点的总体变形图和节点接触面的接触状态图. 可以看出, 外垫片与球

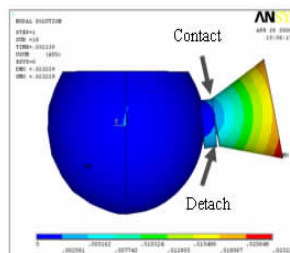


图 3 节点整体变形图

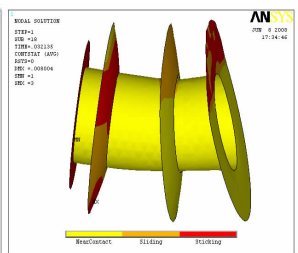


图 4 接触状态图

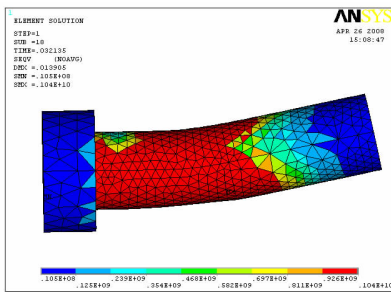
的外表面和锥头的接触面处在节点受拉的一侧产生空隙曾脱离状态,而在节点受压的一侧则曾顶紧状态传递压力.这些现象都与实际节点受力时出现的现象相复合,由此也说明了接触模拟法的有效性.

图 5 给出了节点的螺栓、内外垫片在屈服弯

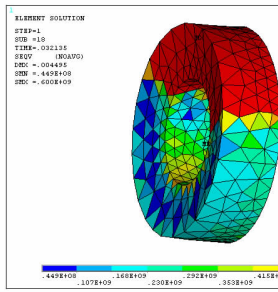
矩作用下的应力状态,可以看出,在此弯矩作用下,这 3 个部分都有大量的单元进入屈服状态.螺栓是节点承受弯矩的主要受力部分,因此,在弯矩作用下,螺栓受力较大的部分基本上全截面屈服,而内外垫片则由于压力作用部分单元进入屈服.

表 1 数值模拟时碗式节点各组成部分的材料属性

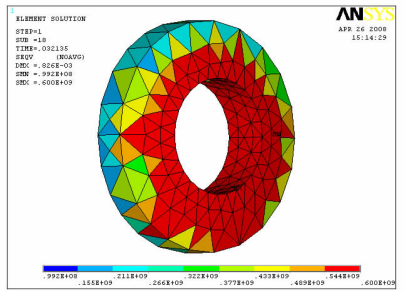
节点组成部分	弹性模量/(N · mm <sup>-2</sup> )	泊松比	屈服强度/(N · mm <sup>-2</sup> )	材料密度/(kg · m <sup>-3</sup> )
球节点	2.06 × 10 <sup>11</sup>	0.3	600	7 850
螺栓	2.06 × 10 <sup>11</sup>	0.3	1 040	7 850
锥头	2.06 × 10 <sup>11</sup>	0.3	235	7 850
垫片	2.06 × 10 <sup>11</sup>	0.3	600	7 850



(a)螺栓应力图



(b)外垫片应力图



(c)内垫片应力图

图 5 节点部分单元应力图

如图 6 所示,在弯矩作用下,节点的转动角度  $\alpha$  与锥头面的转动角度  $\beta$  相等,因此可以用锥头面的弯矩 - 转角曲线来代表节点的弯矩 - 转角曲线,用这种方法得到的数值模拟结果如图 7 所示.

(图中 M24, M27, M30, M33, M36 分别代表 5 种碗式节点,节点中的螺栓直径分别为 24, 27, 30, 33, 36 mm)从节点的弯矩 - 转角曲线可以看出,这些曲线有很好的规律性,在开始阶段弯矩与转角基本成线性关系,此时节点处于弹性状态,但是在某一弯矩处,节点所承受的弯矩值增加缓慢,而转角却不断增大,此时,节点开始进入塑性阶段.节点的屈服弯矩随着螺栓直径的增大而增大.

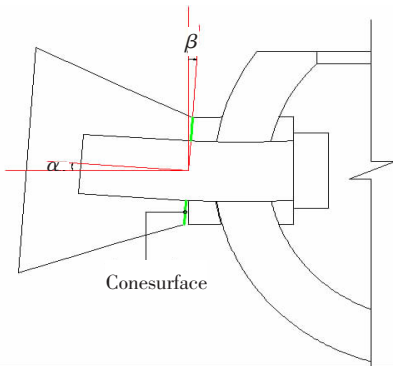


图 6 节点转角计算方法

## 2 碗式半刚性节点网壳的弹塑性稳定分析

利用上文模拟所得的 M24, M27, M30, M33, M36 5 种碗式节点的弯矩 - 转角曲线,考虑了几何非线性和材料非线性,对 40 m 跨度的 K8 型单层球面网壳在不同节点刚度、不同矢跨比、不同分频数 ( $n$ ) 影响下进行了荷载位移的全过程分析.

网壳建模中,杆件单元的模拟如图 8 所示<sup>[8]</sup>,用 3 根单自由度的非线性转动弹簧 (combin39) 模拟螺栓球节点的转动,半刚性节点的转动刚度就通过弹簧的实常数设置来控制,用 beam189 梁元模拟管段和球段,由于球段的抗弯刚度很大,近似为刚性的端部,因此选用远大于管段的截面来模拟球段,并将管段和球段的平动自由度耦合. K8 型螺栓球节点的网壳分析模型见图 9.

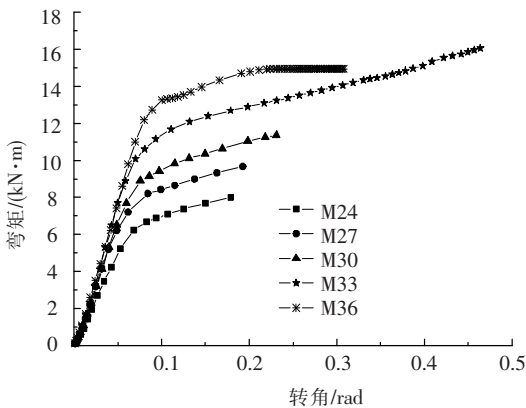


图 7 节点弯矩 - 转角曲线

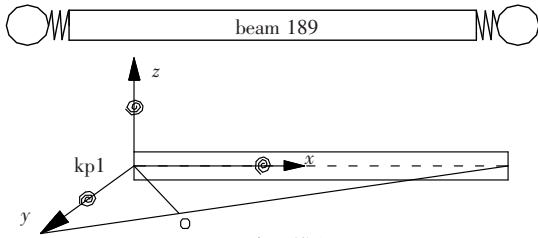


图8 单元模拟图

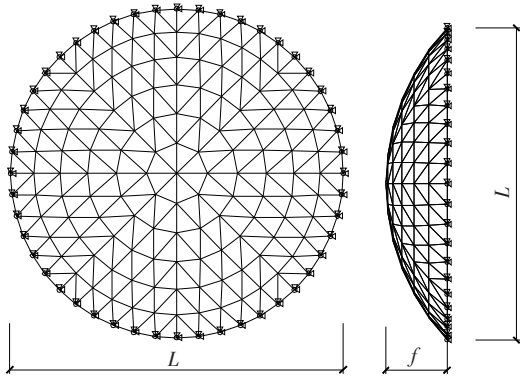


图9 网壳模型图

### 2.1 节点刚度对网壳极限承载力的影响

节点的弯曲刚度对网壳的稳定性能有重要影响,利用图7数值模拟所得的弯矩-转角曲线对K8型半刚性节点单层球面网壳进行了弹塑性全过程分析,分析中考虑了材料非线性和几何非线性.假设节点扭转刚度为其弯曲刚度的1/100.图10给出了不同节点弯曲刚度下网壳的全过程曲线,图11给出了40m跨度,1/8矢跨比下网壳的矢稳模态.本文共研究了4种分频数下5种碗式节点的极限荷载的变化.从图12给出的极限荷载随节点弯曲刚度的变化曲线可以看出,碗式半刚性节点网壳具有很好的承载能力,其中横坐标中的螺栓直径即代表了应用相应直径的螺栓的碗式节点的刚度大小.图中网壳的极限承载力是指在荷载位移全过程曲线中的第一临界点对应的荷载值.

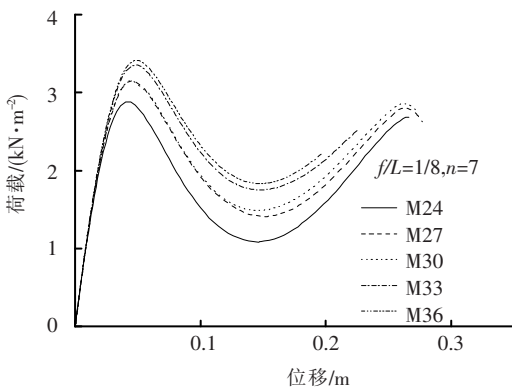


图10 荷载-位移全过程线

### 2.2 矢跨比对网壳极限承载力的影响

极限荷载随矢跨比的变化如图13所示.矢跨

比对网壳稳定承载力的影响可以分为两种情况.当分频数较小时,例如分频数为4,即杆件长度尺寸较大,此时网壳稳定极限荷载在矢跨比为1/4时达到峰值.矢跨比过大或者过小都会降低网壳承载力.究其原因,过高的矢跨比意味着更长的杆件,这会使杆件稳定承载力的计算长度增加,降低杆件的稳定性能.而当矢跨比减小,则意味着网壳越来越扁平,结构响应中薄膜力所占成份越来越低,受力性能上越来越接近薄壳结构.这对于网壳的稳定性自然不利.

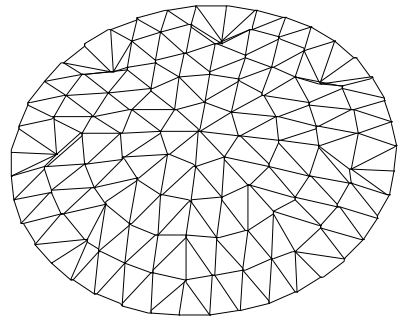


图11 40 m 跨度,1/8 矢跨比网壳的屈曲模态

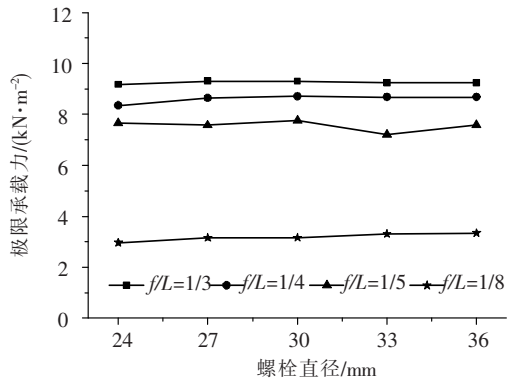


图12 节点刚度对网壳极限承载力的影响(n=6)

当分频数增加到一定数值以后,如图所示分频数达到5以上时,此时杆件长度均满足稳定承载力限值范畴,故杆件长度已不是决定承载力高低的重要因素.当矢跨比增大时,随着结构受力性能的变化,承载力逐步下降,且矢跨比越大,稳定承载力下降速度越快.

### 2.3 分频数对网壳极限承载力的影响

本文共分析了5种分频数,5种碗式节点的网壳极限承载力在不同矢跨比下极限承载力的变化.不同节点刚度下网壳极限荷载随着分频数的变化的规律均曲线如图14所示.通过同等条件下刚性节点网壳分频数对极限荷载影响(如图15所示)示意图的对比,可以看出矢跨比1/3,1/4,1/5的网壳随着分频数的增大,极限承载力也随

之增大. 而且矢跨比 1/3 的极限荷载的增幅最为迅速. 相反的,矢跨比 1/8 半刚性网壳的极限荷载却随着分频数的增高而降低,虽然矢跨比 1/8 刚性节点网壳承载力随着分频数增大而增大.

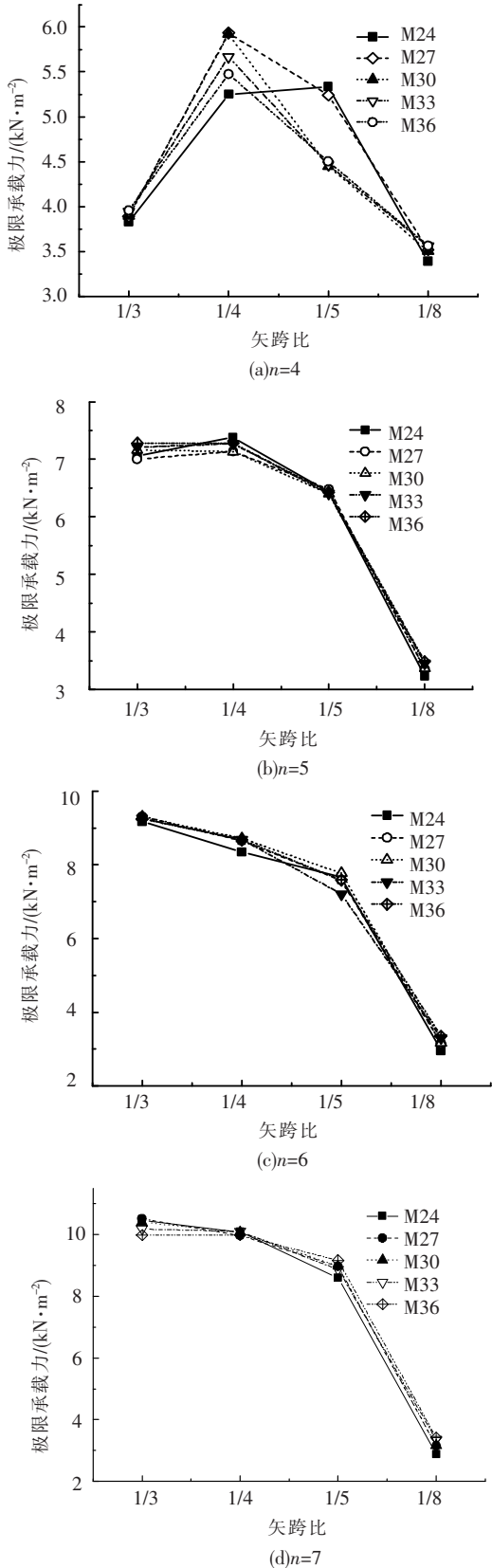


图 13 极限荷载随矢跨比的变化曲线

网壳结构是一种靠薄膜力承载的结构体系,所谓薄膜力,就是沿结构中曲面作用的内力,而结构中弯曲应力和扭转应力都很小. 矢跨比 1/3, 1/4, 1/5 的网壳,符合经典网壳的受力性能与机理,当施加竖向荷载时,结构内力响应以薄膜应力为主,这样杆件的稳定承载能力就成了结构稳定承载力高低的重要因素. 当分频数增大时,杆件失稳的计算长度变小,具有更高的稳定性能,所以无论刚性还是半刚性的矢跨比为 1/3, 1/4, 1/5 的网壳,极限荷载都随着分频数的增大而增大.

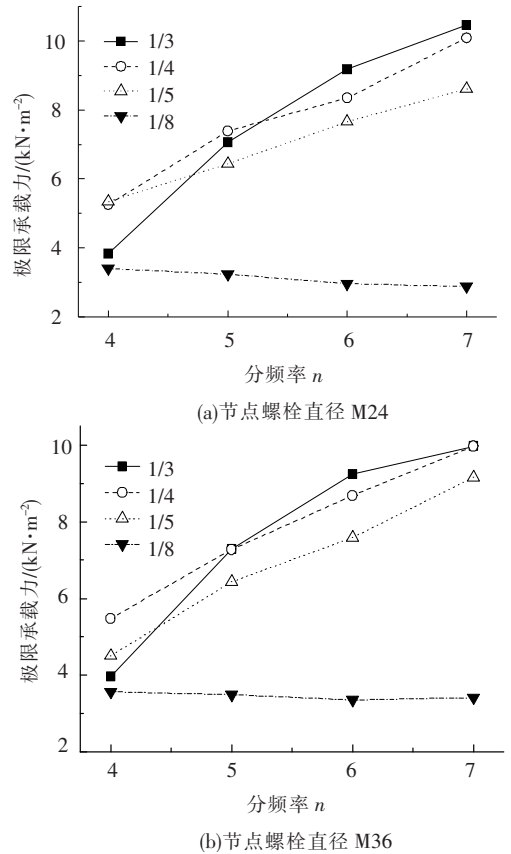


图 14 极限荷载随矢跨比的变化曲线

矢跨比 1/8 的网壳属于扁平壳结构,在受向上部分类似于平板结构. 在竖向均布荷载的作用下,整个结构响应只能承受少量的网壳薄膜力,而杆件与节点组成的杆系则需要承受大量的弯矩. 由于半刚性节点的存在,这些节点只能承受一定量的弯矩,使得整体网壳结构除了初始缺陷外,又在节点处增加了若干处薄弱环节. 在施加荷载初期,结构响应是以薄膜应力为主. 随着外部荷载的增大,结构响应由薄膜应力突变为弯曲应力,这使得杆件还没有达到稳定承载力时,网壳就已在薄弱环节,亦即半刚性节点处达到了屈服极限,进入塑性状态,丧失承载力,从而导致整体网壳进入塑性阶段而丧失稳定承载力. 因此,在矢跨比 1/8 的网壳结构中,半刚性节点的承载力决定了整个网

壳承载力水平. 随着网壳分频数的增大, 杆件长度尺寸越来越小, 同时节点数越来越多. 若节点为刚性, 如焊接球节点, 则杆件长度尺寸的减小使得杆件稳定承载力提高, 从而网壳的稳定承载力随着分频数的增大而增大. 若节点为半刚性, 如碗式节点, 虽然杆件的稳定承载力有所提高, 但是结构内薄弱环节明显增多, 一旦响应进入弯曲应力状态, 则节点薄弱环节处很快丧失承载力, 从而使得整体网壳结构丧失承载力, 所以半刚性节点扁平壳结构的稳定承载力随着分频数的增大而减小.

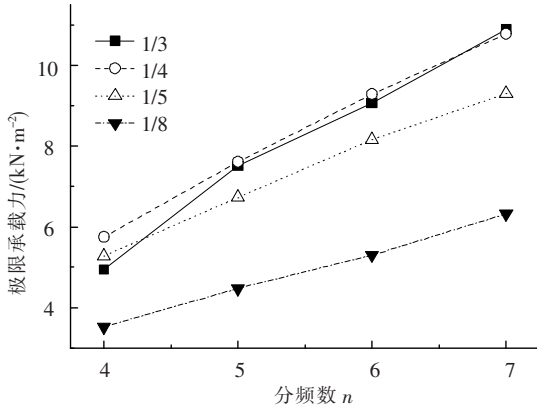


图 15 刚性球面网壳分频数对极限承载力的影响曲线

### 3 结 论

1) 通过在 ANSYS 中运用接触模拟法分析了碗式节点在纯弯矩作用下的受力性能, 得到了节点纯弯作用下的弯矩 - 转角曲线.

2) 通过对碗式半刚性节点的稳定分析, 得出了碗式半刚性节点单层球面网壳具有很好的承载能力.

3) 当分频数较小时, 随着矢跨比的增大, 网壳的极限荷载先增大后减小. 当分频数较大时, 网壳极限荷载随矢跨比增大而减小.

4) 半刚性网壳中, 矢跨比 1/3, 1/4, 1/5 的网壳随着分频数的增大, 稳定承载力也随之增大. 而且矢跨比 1/3 的极限荷载的增幅最为迅速. 相反的, 矢跨比 1/8 半刚性网壳的极限荷载随着分频数的增高而降低.

### 参考文献:

- [1] MAKOWSKI Z S. Space structures of today and tomorrow [C]//Third International Conference on Space Structures. London: Elsevier Applied Science Publishers Ltd, 1984: 1-8.
- [2] IASS Working Group 8. Analysis, design and realization of space frames: A state-of-the-art report [R]. Bulletin of the International Association for Shells and Spatial Structures, 1984/85: 25(1-2).
- [3] 沈世钊, 陈昕. 网壳结构稳定性[M]. 北京: 科学技术出版社, 1999.
- [4] 罗永峰. 网壳结构弹塑性稳定及承载力全过程分析[D]. 上海: 同济大学, 1992.
- [5] 林有军. 单层穹顶网壳稳定性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学, 1996.
- [6] SHIBATA R, KATO S, YAMADA S. Experimental study on the ultimate strength of single-layer reticular domes [C]//Proceeding of the Fourth International Conference of Space Structures. Guildford, UK: University of Surrey, 1993.
- [7] MOHAMMAD R C. Semi-rigidity of connections in space structures [D]. Guildford: University of Surrey department of civil engineering, 1997.
- [8] FAN Feng, MA Huihuan, CAO Zhenggang. Elastoplastic stability of kiewitt6 reticulated domes with semi-rigid join [C]//Proceedings of the Third International Symposium on Innovative Civil & Architectural Engineering. Seoul, Korea: ICAE2008; 102-112.
- [9] MA Huihuan, FAN Feng, CAO Zhenggang. *et al.* Design method for stability of single-layer reticulated shells with semi-rigid joints [C]//Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on Improvement of Structural Safety for Building Structures. Harbin: Harbin Institute of Technology, ISSBS, 2008: 107-115.

(编辑 赵丽莹)