

单层网壳圆柱体节点受力分析

夏锋林

杭州市建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州

收稿日期: 2024年5月17日; 录用日期: 2024年6月6日; 发布日期: 2024年6月14日

摘要

采用FEA NX和midas Gen软件, 对实际工程中单层网壳结构的圆柱体节点进行有限元计算分析, 得出圆柱体壁厚、盖板影响此节点形式的受力性能的一些结论。

关键词

单层网壳, 圆柱体节点, 有限元分析

Stress Analysis of Cylindrical Joints of a Single-Layer Latticed Shell

Fenglin Xia

Hangzhou Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

Received: May 17th, 2024; accepted: Jun. 6th, 2024; published: Jun. 14th, 2024

Abstract

The finite element stress of cylindrical joints of a single-layer latticed shell in practical engineering is analyzed by using FEA NX and Midas Gen software, and some conclusions are drawn that the cylinder wall thickness and the cover plate affect the stress performance of this joint.

Keywords

Single-Layer Latticed Shell, Cylindrical Joint, Finite Element Analysis



1. 引言

空间网格结构的连接节点形式很多，主要有焊接空心球节点、螺栓球节点、焊接钢板节点、焊接圆柱体节点[1]，以及我国自行开发研制的嵌入式毂节点等[2]。目前国内最常用的节点形式是焊接空心球和螺栓球节点，对其有较多的分析和研究[3] [4]，焊接钢板节点是在平面桁架节点的基础上发展起来的一种节点形式，其构造与计算在文献中也多有分析与介绍[5]。针对焊接空心球节点，国内外学者从节点构造、承载力等方面开展了大量的理论分析和试验研究，取得了较为丰富的成果，对节点受压、受拉、压弯、拉弯的承载力总结出了实用的计算方法和公式；螺栓球节点作为一种半刚性节点，国内外学者对其承载力、节点刚度、疲劳性能等方面进行了大量的分析和研究，为实际工程应用提供了较为成熟的设计方法；焊接钢板节点在多向汇交杆件内力作用下受力情况较为复杂，国内外进行过一些节点模型试验，提出了计算节点板最大应力的实用方法，通过设置盖板，可提高节点刚度和十字节点板的承载能力，同时通过试验与分析，得出节点中连接焊缝的计算方法，对实际工程均具有指导意义。焊接圆柱体节点在一些文献中也有提及，对圆柱体钢管壁厚从构造上提出了要求，对加劲隔板的强度应力、连接焊缝的应力给出了计算方法，但圆柱体钢管壁厚、盖板的设置对整个节点承载力的影响的研究较为少见。

本文结合实际工程，运用 FEA NX 和 midas Gen 软件，对单层网壳的焊接圆柱体节点进行有限元分析，以揭示圆柱体节点的受力性能，分析圆柱体壁厚、盖板对节点内力的影响。

2. 工程概况

本工程为杭州国际博览中心，其城市客厅屋面采用单层球面网壳，球半径为 29.625 m，球顶标高为 85.625 m，网壳在标高 75.043 m 以上为凯威特 K8 型，此标高以下按照 80 等分划分圆周，形成三角形单元组成的单层球壳；球壳杆件采用 H 型钢，杆件连接节点采用焊接圆柱体节点。

3. 有限元计算

3.1 模型参数

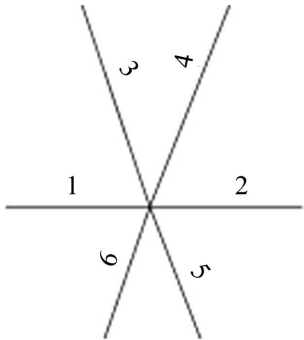


Figure 1. Element number

图 1. 单元编号

球面网壳杆件节点较多，对每个节点进行计算分析不实际，可选取内力最大的节点作为最不利节点

进行分析。本文根据各工况计算结果，选取“1.2 恒 + 0.98 活 + 1.4 风 + 0.84 温度”的工况组合下，靠近底部位置的内力最大的节点进行分析。该节点连接 6 根杆件，杆件截面均为 H250 × 150 × 12 × 16，单元编号如图 1 所示，该工况组合下的各单元内力见表 1。

Table 1. Element forces
表 1. 各单元内力

单元	轴向(kN)	剪力-y (kN)	剪力-z (kN)	扭矩(kNm)	弯矩-y (kNm)	弯矩-z (kNm)
1	217.12	3.72	4.84	-0.01	5.91	3.59
2	426.47	0.23	-1.73	0	5.04	-0.84
3	-517.2	0.53	-2.15	0	7.19	-0.43
4	73.77	-1.3	0.31	0	3.56	1.36
5	-771.88	-1.67	8.14	0.01	8.25	-0.89
6	318.95	-3.75	6.08	0	2.64	-2.61

由表 1 可看出，整体模型中，每根杆件都承受轴力、剪力、弯矩和扭矩的共同作用，但总体而言，轴力占主导地位，y 向弯矩次之，z 向弯矩、扭矩和剪力总体影响较小。

节点区域 6 根杆件的受力情况实际上是空间自相平衡的复杂力系，准确地模拟节点的实际受力状态十分困难，为简化分析，对其中 1 根杆件设置固定约束(2 号单元)，参考各杆件的内力情况，对其它 5 根杆件仅施加杆件轴力，见图 2。

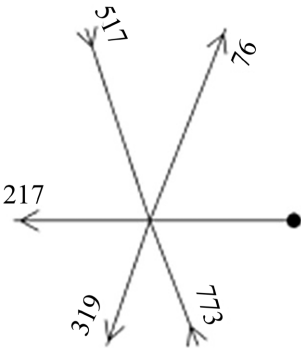


Figure 2. Simplified model (axial force, kN)
图 2. 简化模型(轴力, kN)

按此简化模型计算得到的各单元轴力与整体模型的结果进行比较，见表 2，可看出，两者误差极小，不到 1%，因此，按简化模型对节点进行分析基本可满足要求。

Table 2. Axial force comparison of each element (kN)
表 2. 各单元轴力比较(kN)

单元	1	2	3	4	5	6
整体模型	217.12	426.47	-517.2	73.77	-771.88	318.95
简化模型	217	422.29	-518.77	74.23	-771.85	320.15
误差	-0.06%	-0.98%	0.30%	0.62%	0.00%	0.38%

3.2. 有限元模型的建立

按前述的简化模型,对连接杆件的圆柱体节点建立实体模型。采用 FEA NX 软件,按圆柱体节点及杆件单元的实际尺寸,建立四面体实体有限元模型,并将实体模型导入到 midas Gen 中进行计算。圆柱体节点和 H 型钢单元均采用 Q345 钢材,为了分析连接节点的受力性能,圆柱体高度取 350 mm,外径取 450 mm,壁厚分别取 30、35、40、45、50、55、60 mm,同时考虑圆柱体端部无盖板和有盖板(盖板厚度取 20 mm)的情形,有限元模型如图 3 所示。

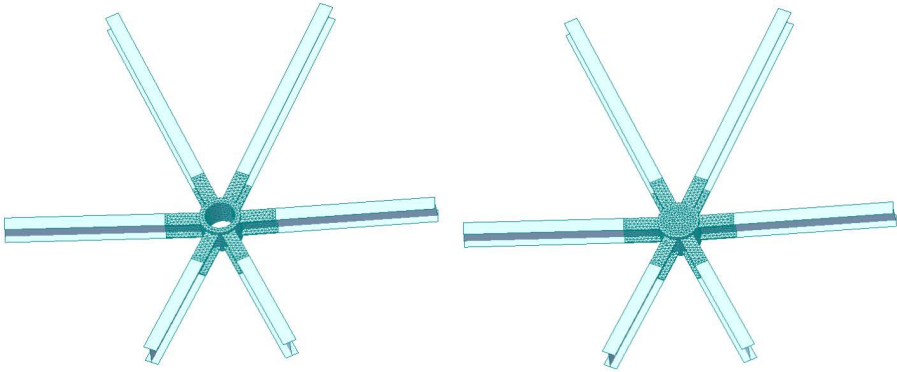


Figure 3. Finite element calculation model
图 3. 有限元计算模型

4. 计算结果分析

4.1. 圆柱体无盖板

根据 midas Gen 的计算结果,节点处的杆件、圆柱体的实体单元最大有效应力(von-Mises 应力)见表 3,对应的变化曲线见图 4,以壁厚 60 mm 为代表,应力云图如图 5 所示。

由图表可看出,圆柱体壁厚为 30 mm 时,节点处杆件和圆柱体的最大有效应力大于钢材的屈服应力 345 MPa,随着圆柱体壁厚的加大,圆柱体刚度增强,杆件和圆柱体的最大有效应力均相应减小,圆柱体壁厚小于 40 mm (即径厚比小于 11)时,减小的幅度更为显著,壁厚继续加大,有效应力减小的幅度有所降低,说明增加圆柱体的壁厚,可提高杆件节点的承载力,但壁厚增加到一定范围,承载力提高的幅度不大。同时可看出,圆柱体最大应力均出现在杆件与圆柱体交汇处。

Table 3. The maximum von-Mises stress of the element without the cover plate (MPa)

表 3. 无盖板时节点处单元最大有效应力(MPa)

壁厚(mm)	杆件	圆柱体
30	347.1	347.1
35	270.39	270.39
40	198.75	193.99
45	175.44	169.26
50	159.21	146.61
55	148.48	145.36
60	141.98	124.43

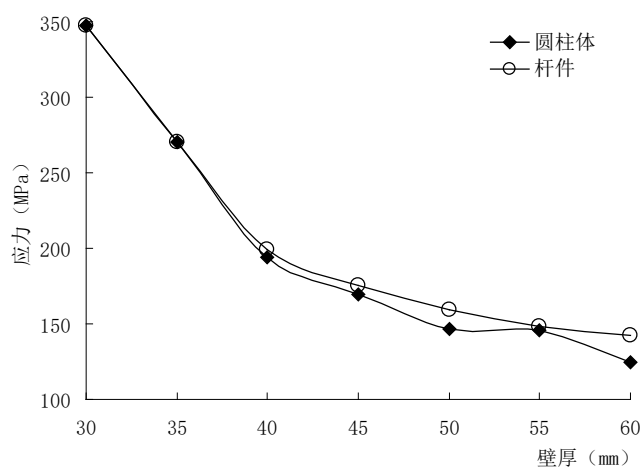


Figure 4. Maximum von-Mises stress curve at the joint (without cover)

图 4. 节点处最大有效应力变化曲线(无盖板)

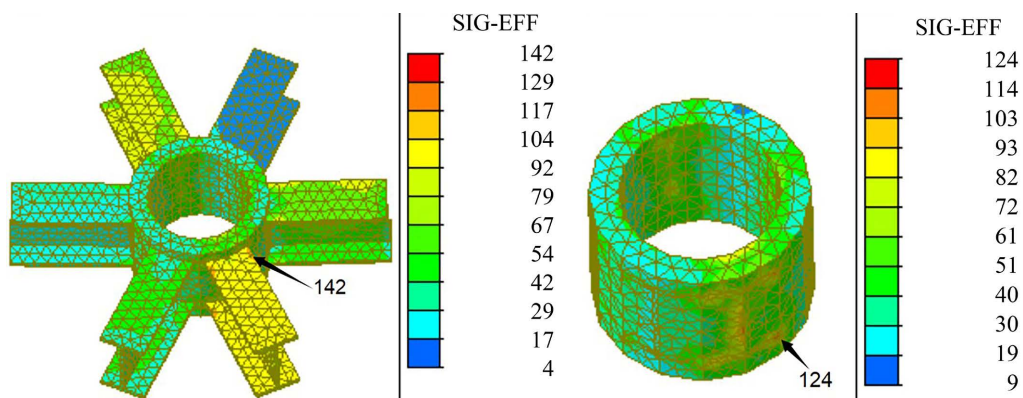


Figure 5. The stress contour plots at the node (without cover)

图 5. 节点处应力分布云图(无盖板)

4.2. 圆柱体有盖板

圆柱体两端均设置 20 mm 厚盖板时, 根据 midas Gen 的计算结果, 节点处的杆件、圆柱体、盖板的实体单元最大有效应力见表 4, 对应的变化曲线见图 6, 以壁厚 60 mm 为代表, 应力云图如图 7 所示。

Table 4. The maximum von-Mises stress of the element with the cover plate (MPa)

表 4. 有盖板时节点处单元最大有效应力(MPa)

壁厚(mm)	杆件	圆柱体	盖板
30	153.97	120.54	98.05
35	144.9	100.79	91.31
40	136.74	87.51	86.78
45	128.28	92.56	83.28
50	125.43	97.25	82.96
55	125.14	90.5	78.81
60	122.14	98.94	76.83

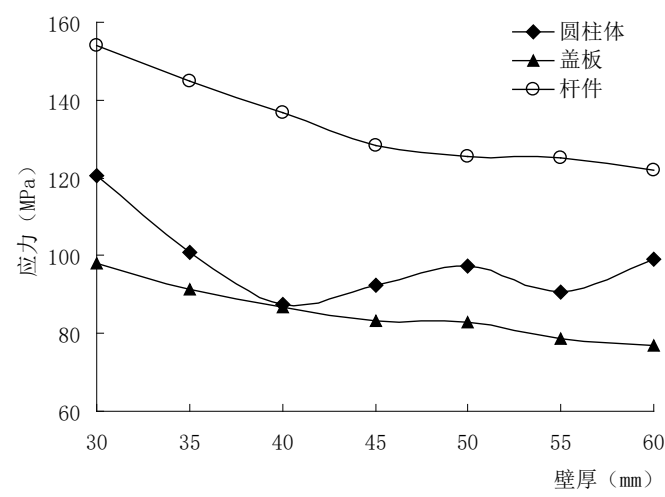


Figure 6. Maximum von-Mises stress curve at the joint (with cover)
图 6. 节点处最大有效应力变化曲线(有盖板)

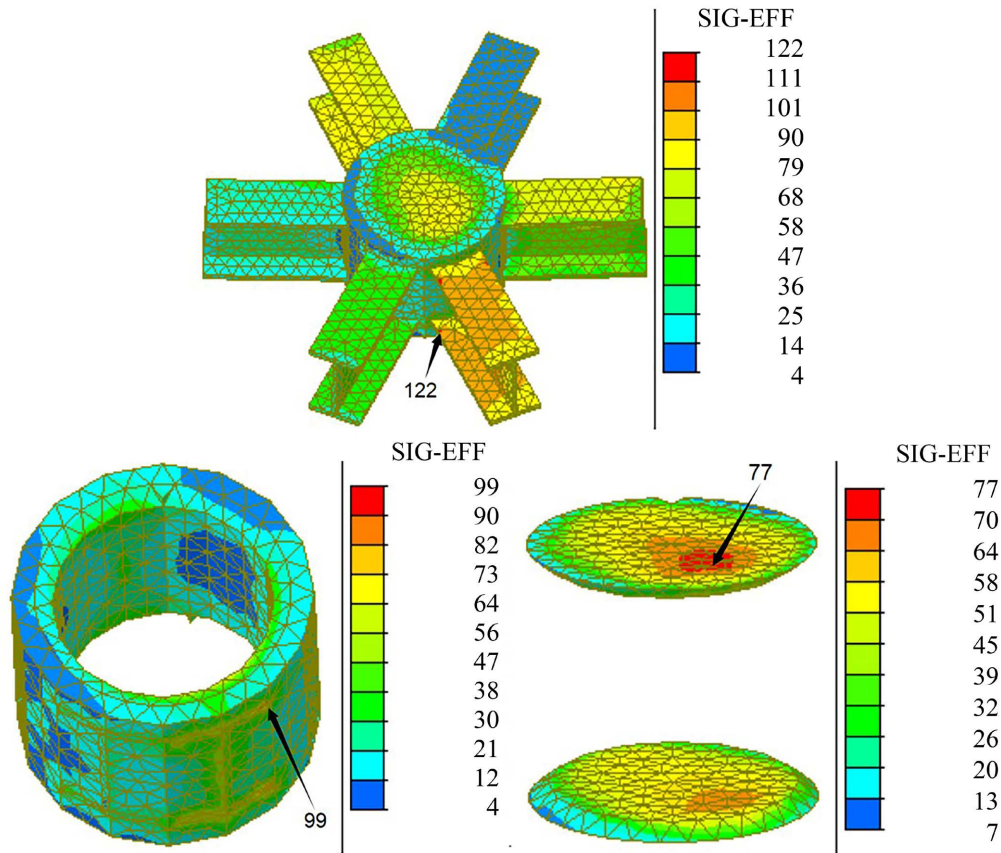


Figure 7. The stress contour plots at the node (with cover)
图 7. 节点处应力分布云图(有盖板)

由图表可看出，圆柱体两端设置盖板时，节点处杆件、圆柱体和盖板的最大有效应力均小于钢材的屈服应力 345 MPa，随着圆柱体壁厚的加大，杆件和盖板的最大有效应力均相应减小，但圆柱体的最大有效应力先减小、后变大，说明增加圆柱体的壁厚，可减小节点处杆件和盖板的应力，但壁厚增加到一

定范围,圆柱体的有效应力反而加大。同时可看出,圆柱体最大应力均出现在杆件与圆柱体交汇处,盖板的最大应力位置靠近内力最大的杆件。

图 8 给出了无盖板和有盖板时节点处杆件和圆柱体最大有效应力的对比图。由图可看出,圆柱体两端设置盖板,可减小杆件和圆柱体的有效应力,圆柱体壁厚小于 40 mm (即径厚比小于 11) 时,有效应力减小的幅度更为显著,壁厚继续加大,有效应力减小的幅度有所降低,说明圆柱体设置盖板会提高杆件节点的承载力,且圆柱体壁厚在一定范围内,设置盖板对提高节点承载力非常有效,圆柱体壁厚过大,则提高的幅度不大。

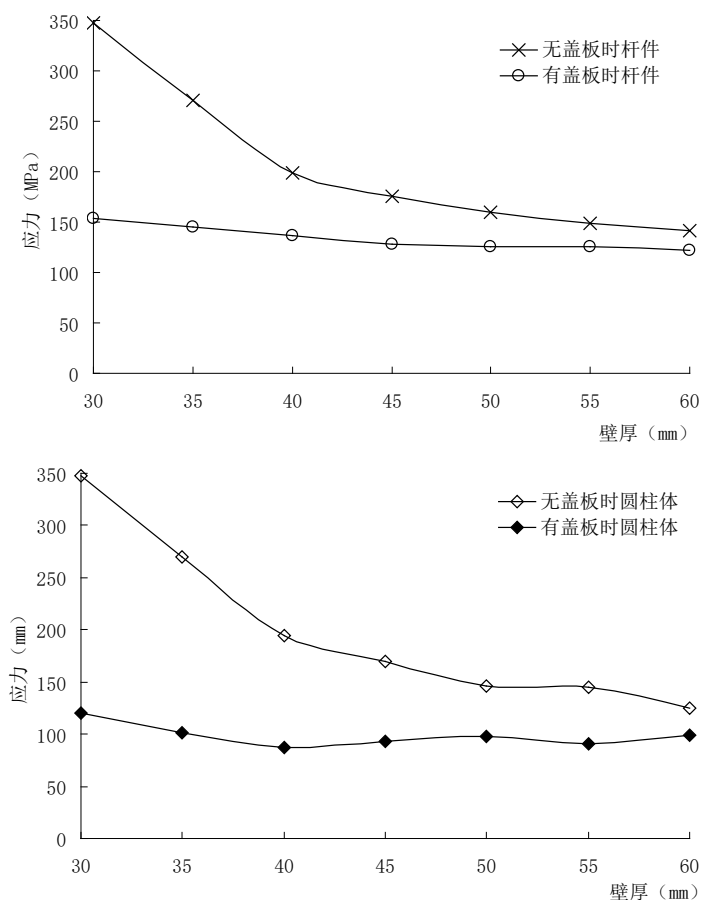


Figure 8. Comparison diagram of stress without cover plate and with cover plate

图 8. 无盖板和有盖板时应力对比图

4.3. 简化模型与整体模型对比

如前所述,上述计算分析均针对简化模型,采用的是传统的单节点分析方法,此方法存在节点模型尺寸的截取、边界约束条件的模拟、荷载工况的选取等问题,截取模型尺寸不当,或边界条件模拟失真,以及荷载工况选取不一定为最不利工况,以上均可能会造成节点分析结果存在不安全因素。以下将以圆柱体壁厚 60 mm、盖板厚 20 mm 为例,在 midas Gen 中采用多尺度节点分析方法,即在整体模型中导入节点实体模型进行计算。

整体模型中在各荷载工况作用下节点处最大有效应力的包络值与简化模型的对比见表 5,由表可看出,简化模型与整体模型的圆柱体、盖板的最大有效应力误差较小,不到 7%,进一步说明采用简化模型

分析节点的受力性能基本可行。

Table 5. Comparison of node stresses between the overall model and the simplified model (MPa)
表 5. 整体模型与简化模型的节点应力比较(MPa)

模型	圆柱体	盖板
整体模型	106.07	79.09
简化模型	98.94	76.83
误差	-6.7%	-2.9%

5. 结语

本文结合实际工程，采用 FEA NX 和 midas Gen 软件，对单层网壳的焊接圆柱体节点进行有限元分析，可以得出以下节点结论：

(1) 增加圆柱体的壁厚，可提高杆件节点的承载力，径厚比小于 11 时，提高效果较为显著，壁厚过大，节点承载力提高的幅度有所降低。

(2) 圆柱体两端设置盖板会提高杆件节点的承载力，且圆柱体壁厚在一定范围内(径厚比小于 11)，设置盖板对提高节点承载力非常有效，圆柱体壁厚过大，则提高的幅度不大。

(3) 采用简化模型分析节点的受力性能基本可行，与整体模型的计算误差在可接受范围内。

需要说明的是，本文的分析结果仅针对圆柱体外径为 450 mm、网壳杆件为 H 型钢的情况，对其它圆柱体外径，或其它杆件类型(如常用的圆钢管等)，尚需作进一步对比分析。

参考文献

- [1] 沈祖炎, 陈扬骥. 网架与网壳[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
- [2] 赵基达, 蓝天, 等. JGJ 7-2010. 空间网格结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [3] 闫翔宇, 齐国材, 马青. 空间网格结构焊接空心球节点刚度研究综述[J]. 天津大学学报, 2017, 50(z1): 84-94.
- [4] 喻晓晨, 李会军, 陈旭, 等. 螺栓球节点力学性能研究及弯矩-转角关系式的建立[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(4): 57-65.
- [5] 李星荣, 魏才昂, 秦斌. 钢结构连接节点设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.