

铝合金网壳结构盘式节点整体刚度与变形性能的有限元分析

王元清¹,张俊光²,刘 明²,柳晓晨³

(1. 清华大学土木工程系,土木工程安全与耐久教育部重点实验室,北京 100084;

2. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;3. 华东建筑设计研究院有限公司,上海 200011)

摘 要 目的 以南京市牛首山佛顶宫铝合金穹顶工程为背景,取其典型节点研究分析,考察铝合金盘式节点的受力性能、破坏模式、极限承载力. 方法 通过对铝合金盘式节点足尺模型进行静力加载试验,分析了盘式节点整体刚度与变形的性能;采用 ABAQUS 有限元软件对盘式节点整体刚度与变形性能进行模拟,并与刚性节点性能进行对比. 结果 铝合金盘式节点试件 PS1 在节点盘中心承受集中力,当达到极限荷载破坏后,试验与有限元的破坏现象均表现为上节点盘与工型杆件 3 连接处的节点盘断裂;上节点盘的应力较大,出现明显的马鞍式变形. 结论 试件 PS1 的有限元与试验的荷载位移曲线有比较好的吻合;试件 PS1 的箱型杆件和工型杆件与刚性节点对应杆件相比具有较高的刚度.

关键词 单层网壳结构;铝合金盘式节点;破坏模式;刚度与变形性能;半刚性;静力分析

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Analysis on Overall Stiffness and Deformation of TEMCOR Joints in Aluminum Alloy Shell Structures

WANG Yuanqing¹, ZHANG Junguang², LIU Ming², LIU Xiaochen³

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing, China, 100084, ;2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;3. East China Architectural Design & Research Institute Co. Ltd, Shanghai, China, 200949)

Abstract: In order to inspect mechanical behavior, failure mode and ultimate bearing capacity of aluminum alloy TEMCOR joints, the typical nodes are studied from Nanjing city NIUSHOUSHAN Garbhadhatu Palace aluminum alloy dome project. Based on the static loading experiment of the aluminum alloy TEMCOR joints model, the overall stiffness and deformation of TEMCOR joints are analyzed. ABAQUS finite element software is used to simulate the stiffness and deformation performance of the disc joint, and is compared with rigid joints performance. Test and FEA results showed that: The center of the PS1 joint plate of aluminum alloy disc joint specimen is subjected to

收稿日期:2018-05-18

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAJ16B05);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110002130002)

作者简介:王元清(1963—),男,教授,博士,主要从事钢结构方面研究.

the concentrated force. When the bearing capacity reaches the limit load the failure phenomenon of the experiment and the finite element is shown as the fracture of the joint plate between the upper node plate and the 3 connecting rod. The stress of the upper TEMCOR joints is larger, and the upper TEMCOR joints have obvious saddle shape deformation. There is a good agreement between PS1 the finite element and test about the load displacement curve. Compared with the rigid joint, the box type rod and the working rod of the specimen PS1 have higher stiffness.

Key words: single-layer lattice structure; aluminum alloy TEMCOR joints; failure mode; stiffness and deformation properties; semirigid; static analysis

铝合金材料焊接时会使得铝合金的承载力下降,故可焊接性能较差,因此在铝合金单层网壳中多采用机械连接,节点形式为盘式节点^[1-3]. 由于铝合金盘式节点在单层网壳结构中连接的杆件较多,各杆件的空间方位又是多方位的,节点的传递力流也很复杂的,故对盘式节点性能的研究已成为众学者的研究重点^[4-7]. 目前铝合金盘式节点在我国的应用已得到发展^[8-10].

文献[11]通过工程实例介绍了浦东游泳馆大跨度铝合金屋顶网架及游泳池升降平台的施工,很好地解决了网架结构在现场施工中拼装的技术问题. 文献[12]对重庆国际博览中心进行受力分析提出了结构优化方案,为其他类似大型屋面项目提供参考. 文献[13]结合成都中国现代五项赛事中心游泳击剑馆屋盖结构的施工实际,通过分析、讨论和总结,形成了单层铝合金网壳结构的安装施工技术. 从以上盘式节点的研究内容来看,研究多针对于工程实例中的施工技术、施工安装、结构体系设计^[14-17],缺乏试验研究以及结合有限元的数值模型分析. 基于此,笔者针对南京牛首山佛顶宫工程在静力试验的基础上,采用通用的有限元软件 ABAQUS,建立铝合金盘式节点足尺试件非线性有限元模型,同时与建立的足尺刚性节点试件模型对比分析,进而研究盘式节点的破坏模式、承载能力及抗弯性能.

1 工程与试验概况

南京牛首山佛顶宫穹顶为壳体结构,呈

半圆状,穹顶部分全部用曲面铝合金打造,穹顶跨度约 220 m,宽 160 m,是全球跨度最大、铝型材断面最高的铝合金单层网壳建筑,如图 1 所示. 典型盘式节点如图 2 所示,节点有 6 根杆件,上下节点盘,通过紧固螺栓将节点盘与杆件连接,杆件之间互成角度 60°. 铝合金杆件的截面尺寸见表 1 所示, h 、 b 、 t_w 、 t_f 分别为截面高度、截面宽度、腹板厚度、翼缘厚度,节点局部详图如图 3 所示.



图 1 南京牛首山佛顶宫穹顶
Fig. 1 Dome on Nanjing NIUSHOUSHAN garbhadhatu palace



图 2 铝合金盘式节点试件
Fig. 2 Specimens of TEMCOR joints

表 1 铝合金杆件截面尺寸

Table 1 Sectional dimension of aluminum members

截面形式	h/mm	b/mm	t_w/mm	t_f/mm
箱型	550	290	10	12
工型	550	220	11.5	14

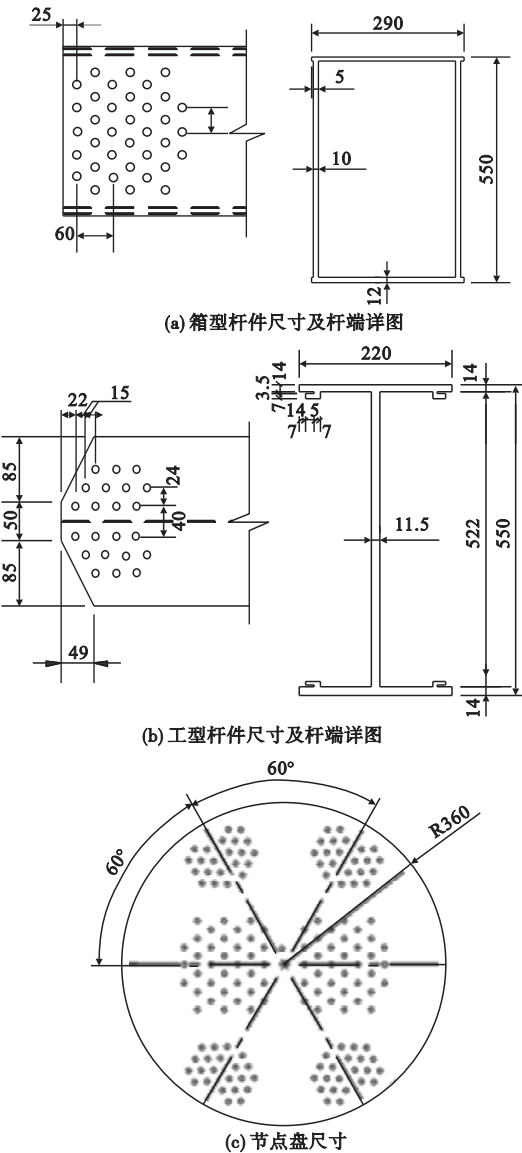


图 3 铝合金盘式节点局部详图

Fig. 3 Schematic drawing of TEMCOR joints

试验加载装置如图 4 所示. 试验采用 300 T 油压千斤顶对盘式节点中心施加竖向荷载,直至试件破坏. 试验结束后上节点盘发生屈曲变形,与其对应的下节点盘无明显肉眼可见的变形,节点域中连接的杆件腹板均发生变形,尤其箱型杆件腹板变形最为突出.



图 4 PS1 加载装置图

Fig. 4 PS1 experiment device

2 有限元计算模型

选用通用有限元软件 ABAQUS 对试件 PS1 建立模型,在非线性有限元分析时需作基本的假定:满足平截面假定,不考虑螺栓预紧力,也不考虑应变硬化影响,加载过程中边界条件保持不变,同时由于杆件的扭矩和平面内的弯矩(沿杆件弱轴方向的弯矩)很小,不考虑受它们的影响.

2.1 材料本构关系选取

通过材料的本构关系^[3](材料的应力 - 应变关系)整理得到材料的力学性能的主要参数,这也是有效保证有限元模型模拟准确度的关键.

铝合金:铝合金材料选用 Al - Mg - Si 系铝合金 6061 - T6,采用 Ramberg - Osgood^[18]模型模拟铝合金材料的本构,铝合金材料本构见图 5 所示.

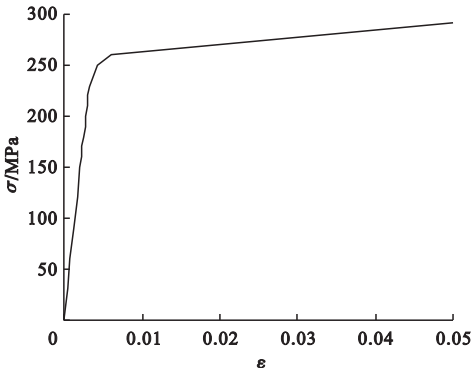


图 5 铝合金本构关系

Fig. 5 Fail form of aluminum alloy

从图 5 中可看出铝合金材料的本构关系为非线性,无屈服平台,故在弹性和塑性加载

阶段需考虑几何非线性,铝合金材料的力学性能参数如表 2 所示.

表 2 铝合金材料的力学性能参数

Table 2 Mechanical properties parameters of aluminum alloy

截面类型	取材位置	E_0/MPa	$f_{0.2}/\text{MPa}$	f_u/MPa	$\varepsilon_u/\%$	n
箱型	翼缘	73 075	308	338	6.9	30.8
	腹板	70 702	299	332	7.7	29.9
	加权平均值	71 647	303	334	7.4	30.3
工型	翼缘	71 027	246	285	6.4	24.6
	腹板	72 179	243	285	8.2	24.3
	加权平均值	71 596	245	285	7.3	24.5

注: E_0 为弹性模量; $f_{0.2}$ 为塑性应变为 0.2% 时的应力; f_u 为极限强度; ε_u 为极限应变; n 为材料的应变硬化指数.

不锈钢: 不锈钢材料选用奥氏体 M10, 由于试件 PS1 在节点盘中心受力达到极限荷载时, 节点盘发生断裂, 超过了屈服强度, 而螺栓并没有发生断裂现象, 应力仍在弹性阶段, 故奥氏体不锈钢 M10 的材料本构可采用理想弹塑性模型模拟材料性能, 强度准则采用 von Mises 屈服准则, 不锈钢本构模型如图 6 所示. 在有限元的材性属性中定义不锈钢的弹性模量为 $1.9 \times 10^5 \text{ MPa}$, 泊松比为 0.29. 不锈钢螺栓的主要力学性能参数有屈服强度 f_y 为 600 MPa, 抗拉强度 f_{ub} 为 800 MPa, 螺母强度 f_{un} 为 800 MPa, 破坏扭矩 M_{Bmin} 为 74 N·m.

载板具有足够的强度, 其弹性模量取为 $E = 2.06 \times 10^6 \text{ MPa}$.

2.2 网格划分

对于模型各肢杆件: 与节点盘相接触部位(除了螺栓孔附近)采用六节点线性楔形单元 C3D6, 并划分为扫掠楔形网格, 而各肢的其他部位则采用 8 节点六面体非协调模式单元 C3D8I, 目的在于克服线性完全积分单元的自锁问题, 且在模型分析中降低计算成本. 网格划分为结构化六面体网格.

对于节点盘: 除了螺栓孔附近划分为结构化六面体网格, 并采用 8 节点六面体非协调模式单元 C3D8I, 其他部位采用六节点线性楔形单元 C3D6.

PS1 各部件及整体模型网格划分情况如图 7 所示.

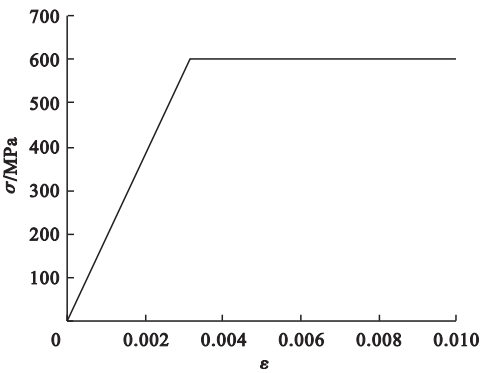


图 6 不锈钢本构关系

Fig. 6 Failure form of stainless steel

试件 PS1 试验时, 在上节点盘中心区域放置加载板来施加竖向荷载, 为了忽略加载时加载板的变形对节点受力的影响, 应使加

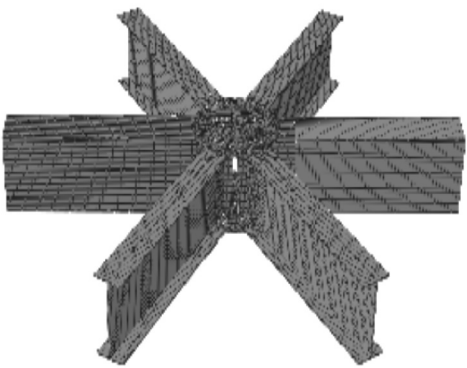


图 7 试件 PS1 整体网格划分情况

Fig. 7 The overall meshing model of PS1

2.3 边界条件与荷载

试件 PS1 为外伸 6 根长肢杆件,是空间自相平衡的复杂力系,用大型通用有限元软件 ABAQUS 准确模拟实际的受力状态是十分困难,为了简化分析,在六肢杆件末端分别设置简支约束,在盘式节点中心竖向加载,试件 PS1 的试验加载装置及杆件标号如图 8 所示. 在有限元中模型分析采用位移控制加载,在试验中先是采用力控制加载,当达到屈服强度时采用位移控制加载.

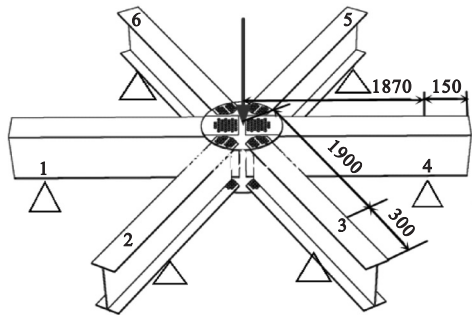


图 8 试件 PS1 试验加载装置图

Fig. 8 Loading device of mechanical performance experiment of PS1

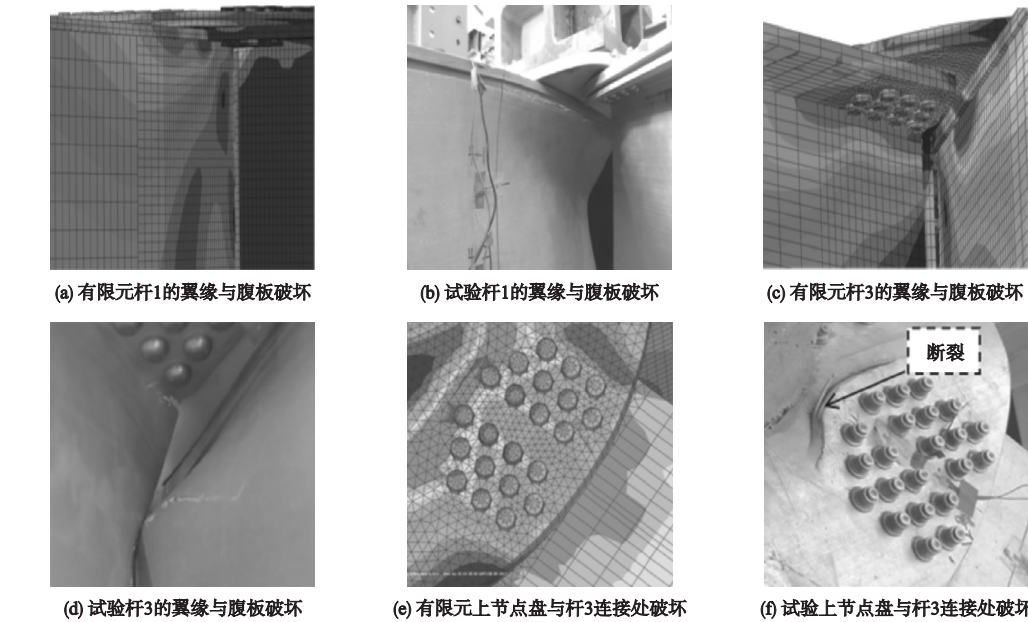


图 9 试件 PS1 试验和有限元破坏形态

Fig. 9 Failure form of PS1 test and FEA

3 有限元计算结果及其对比分析

3.1 节点破坏形态

试件 PS1 试验与有限元破坏形态如图 9 所示.

从图 9 可以看到,试件 PS1 达到极限荷载破坏后,试验与有限元的破坏现象均表现为杆 1 和杆 3 的翼缘与腹板连接处发生断裂;上节点盘与工型杆件 3 连接处的节点盘断裂.

3.2 节点承载力分析

为了更好地与盘式节点的荷载-位移曲线进行对比分析,笔者建立完全刚性连接节点足尺模型,对理想的刚性节点在相同位置施加同等大小荷载,比较承载力性能.

图 10 分别给出了试件 PS1 的试验数据、有限元数据以及刚性节点数据所绘制的荷载位移曲线,荷载位移曲线没有明显的屈服段,对于确定极限承载力采用极限荷载准则,有限元和试验的极限承载力分别为 1 452. 14 kN、1 649. 13 kN.

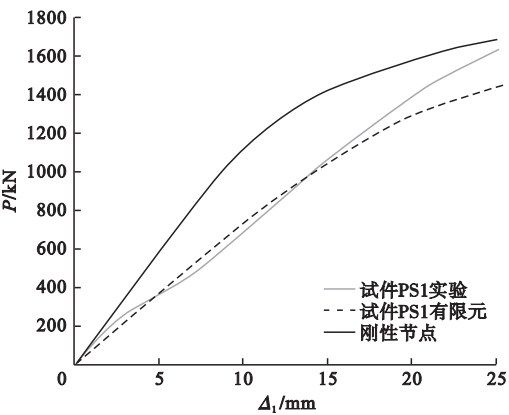


图 10 试件 PS1 荷载 - 位移 ($P-\Delta_1$) 曲线
Fig. 10 Load-displacement ($P-\Delta_1$) curves of PS1

从图 10 中可看到,试件 PS1 的有限元与试验的荷载位移曲线略有一定的差异,可能原因在于试验时试件与支座有滑动.从总体上看,有限元结果与试验结果有比较好的吻合,验证了有限元分析的可靠性.

3.3 节点刚度评价

笔者通过建立理想刚性节点有限元模型,进行非线性分析,并将试验与刚性节点有限元分析作对比,比较弯矩 - 转角曲线,分析铝合金盘式节点应力分布.

刚性节点有限元模型采用结构化六面体划分网格以及 8 节点六面体非协调模式单元 C3D8I 模拟刚性节点试件,刚性节点试件的有限元模型如图 11 所示.

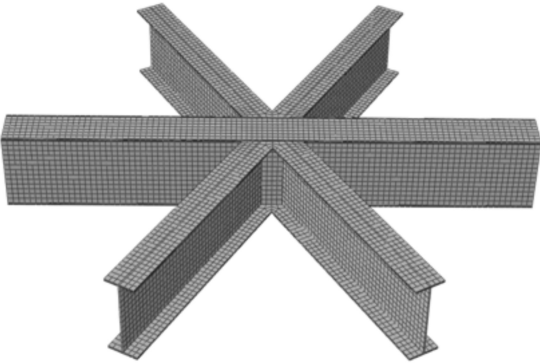
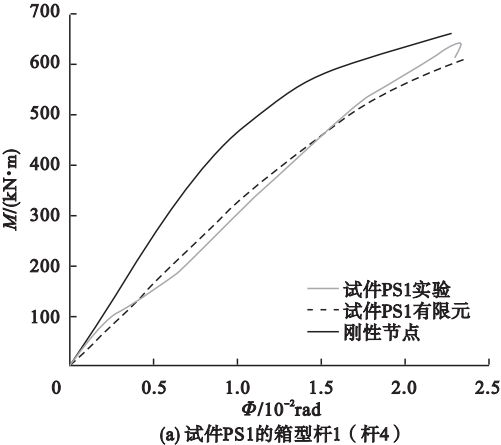


图 11 刚性节点有限元模型及网格划分
Fig. 11 Finite element model and meshing of rigid joints

节点初始转动刚度^[19]的比较通常采用弯矩 - 转角 ($M-\Phi$) 曲线描述,欧洲规范 Eurocode 3^[20]规定:通过初始转动刚度 $S_{j,ini}$ 将节点刚度划分为刚性节点 ($S_{j,ini} \geq 25EI/L$)、半刚性节点 ($0.5EI/L \leq S_{j,ini} \leq 25EI/L$) 和铰接节点 ($S_{j,ini} \leq 0.5EI/L$),初始转动刚度 $S_{j,ini}$ 定义为弯矩转角曲线弹性段的斜率,通常节点弯矩为塑性受弯承载力 $M_{j,Rd}$ 的 2/3,塑性受弯承载力是为试件达到破坏时的最大弯矩.

由于箱型杆件(杆 1、4)比工型杆件(杆 2、3、5、6)刚度大,当在节点盘施加集中力时,箱型杆件和工型杆件在支座处的反力数值并不同,并且箱型杆件和工型杆件分别与节点盘连接处所产生的弯矩和转角也不相同,所以为了比较试件 PS1 的整体刚度,需分别求出试件 PS1 箱型杆件和工型杆件所对应的弯矩和转角曲线 ($M-\Phi$),进而对试件 PS1 进行整体刚度评价.

试件 PS1 各杆件的弯矩 - 转角 ($M-\Phi$) 曲线如图 12 所示,试件 PS1 与刚性节点的各杆件受力比较情况见表 2. 通过表 2 计算出试件 PS1 箱型杆件(杆 1、4)的初始转动刚度为刚性节点的 63.90%,试件 PS1 工型杆件(杆 2、3、5、6)的初始转动刚度为刚性节点的 59.35%.



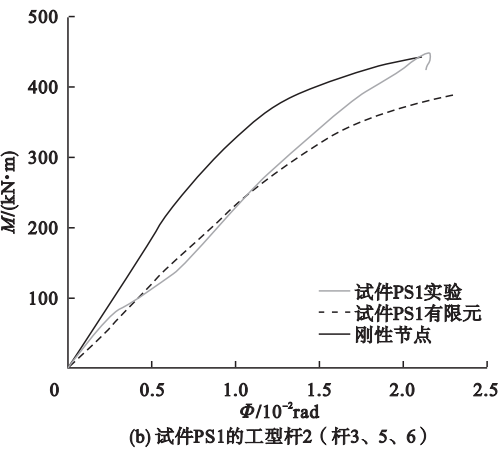


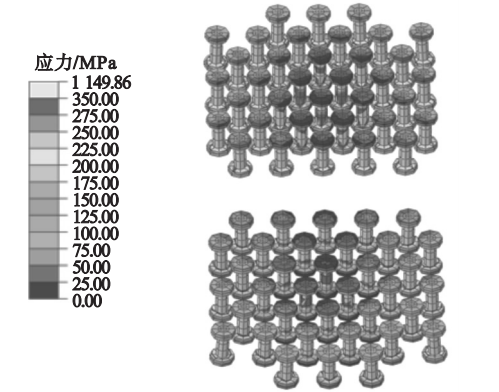
图 12 试件 PS1 各杆件弯矩 - 转角 ($M - \Phi$) 曲线

Fig. 12 Moment-rotation ($M - \Phi$) curves of PS1 members

表 2 试件 PS1、刚性节点各杆件受力性能比较

Table 2 Comparison of mechanical performance of PS1 and rigid joints members

杆件编号	项目	$M_{j,Rd}/$ (kN·m)	$2/3M_{j,Rd}/$ (kN·m)	$\varphi_0/$ rad	$S_{j,ini}/$ (kN·m·rad ⁻¹)
箱型杆 1 (杆 4)	试验	434.64	289.76	0.012 6	22 997
	刚性节点	442.66	295.11	0.008 2	35 989
工型杆 2 (杆 3,5,6)	试验	624.50	416.33	0.013 6	30 612
	刚性节点	657.66	438.44	0.008 5	51 581



(a) 连接上节点盘与对肢箱型杆件的螺栓群应力分布图

另外,通过试件 PS1 的试验以及刚性节点的荷载位移曲线可得到节点试件的弹性模量(见表 3).由表 3 计算得到试件 PS1 的刚度为刚性节点的 69.48%.

表 3 试件 PS1、刚性节点的受力性能比较

Table 3 Comparison of mechanical performance of PS1 and rigid joints

试件编号	项目	P_U/kN	$2/3P_U/\text{kN}$	Δ_0/mm	E_0/MPa
PS1	试验	1 649.13	1 099.42	0.014 2	77 424
	刚性节点	1 688.32	1 125.54	0.010 1	111 440

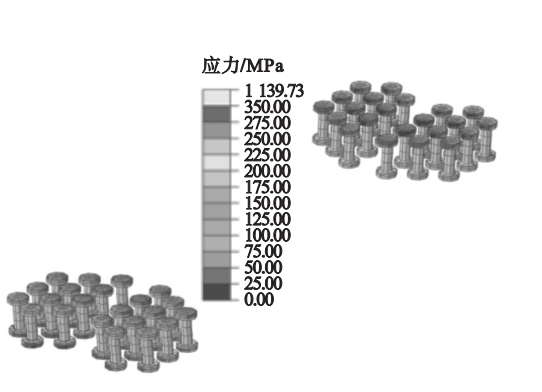
注: P_U 为极限荷载, $2/3P_U$ 为屈服荷载; Δ_0 为屈服荷载对应的位移; E_0 为弹性段节点试件整体弹性模量.

因此,从总体来看,试件 PS1 与刚接节点相比具有较高的刚度.

3.4 节点应力分布

3.4.1 螺栓应力分布

对肢箱型杆件、对肢工型杆件分别连接于上节点盘的螺栓群 Von - mises 应力云图如图 13 所示.



(b) 连接上节点盘与对肢工型杆件的螺栓群应力分布图

图 13 上节点盘螺栓群应力分布图

Fig. 13 Stress distribution of bolts

从图 13 可看出,连接上节点盘与对肢箱型杆件的边缘处螺栓应力比其中间螺栓的应力较大,螺栓应力的最大位置主要出现在螺栓杆中部.连接上节点盘与对肢工型杆件的螺栓群应力分布不均匀,与连接上节点盘与对肢箱型杆件的螺栓群应力分布一样,螺栓杆中部应力明显高于螺帽的应力.

3.4.2 节点盘、杆件应力分布

图 14 为上下节点盘的 Von - mises 应力云图.由图可知,上下节点盘的应力较大的位置均出现在螺栓孔处,其他区域应力较小,而最大应力出现在杆件与节点盘连接处的螺栓孔群最外圈螺栓孔.

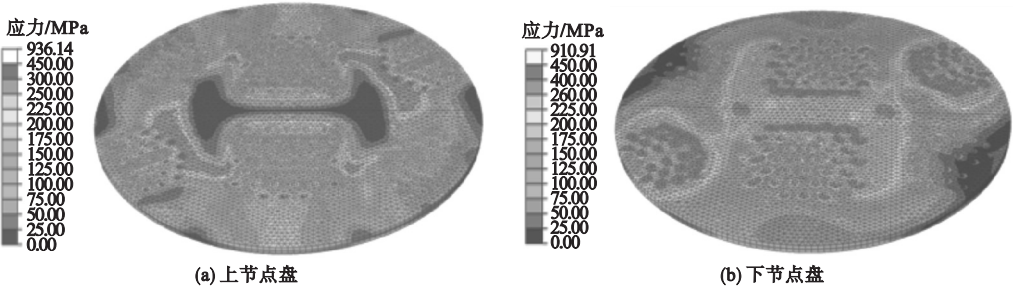


图 14 上下节点盘应力分布图

Fig. 14 Stress distribution of top plate and bottom plate

图 15 为杆件的 Von - mises 应力云图。由图可知,箱型杆件与节点盘相连的翼缘应力较高,尤其上翼缘变形较突出,且端部的上翼缘与腹板交接处也出现明显的应力集中现象

象;工型杆件的应力分布与箱型杆件的应力分布相似。箱型杆件与工型杆件的螺纹孔处应力较集中,杆件的其他部位基本上处于弹性受力状态。

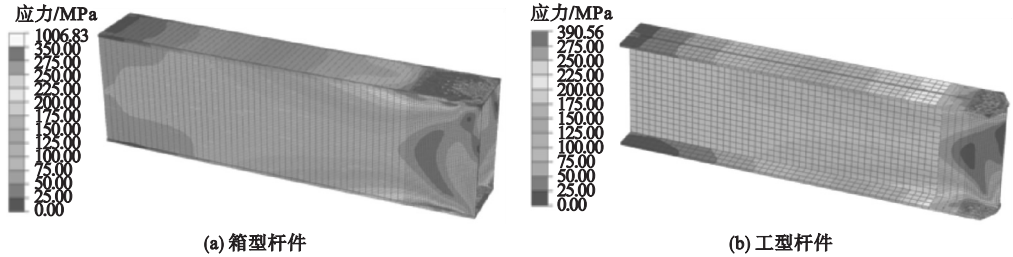


图 15 杆件应力分布图

Fig. 15 Stress distribution of H bars

4 结 论

- (1)试件 PS1 达到极限荷载破坏后,试验与有限元的破坏现象均表现为上节点盘与工型杆件 3 连接处的节点盘断裂。
- (2)试件 PS1 箱型杆件的初始转动刚度为刚性节点对应杆件的 63.90%,试件 PS1 工型杆件的初始转动刚度为刚性节点对应杆件的 59.35%,因此试件 PS1 与刚性节点相比具有较高的刚度。
- (3)连接上节点盘与对肢箱型杆件的螺栓群以及连接上节点盘与对肢工型杆件的螺栓群应力最大位置均出现在螺栓杆。
- (4)铝合金盘式节点的上节点盘应力较大,出现明显的马鞍式变形,螺纹孔处应力较集中。箱型杆件和工型杆件与节点盘相连的上翼缘应力较高,且端部的上翼缘与腹板交接处也出现明显的应力集中现象。箱型杆件与工型杆件的其他部位基本上处于弹性受力状态。

参考文献

[1] 王元清,柳晓晨,石永久,等. 铝合金网壳结构盘式节点受力性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2014,30(5):769-777.
(WANG Yuanqing, LIU Xiaochen, SHI Yongjiu, et al. Experimental study on mechanical performance of TEMCOR joints in aluminum alloy shell structures [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (social science), 2014,30(5):769-777.)

[2] 王元清,柳晓晨,石永久,等. 铝合金网壳箱形-工字形杆件盘式节点受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2017,38(7):1-8.
(WANG Yuanqing, LIU Xiaochen, SHI Yongjiu, et al. Experimental study on mechanical performance of box-I section member TEMCOR joints in aluminum alloy shell structures [J]. Journal of building structures, 2017, 38(7):1-8.)

[3] 张竞乐,赵金城,许洪明. 单层网壳板式节点的刚度分析[J]. 工业建筑,2005,4:88-90.
(ZHANG Jingle, ZHAO Jincheng, XU Hongming. Analysis of stiffness of gusset-type joints for single-layer reticulated shells [J]. Industrial construction, 2005,35(4):88-90.)

[4] 郭小农,熊哲,罗永峰,等. 铝合金板式节点承载性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2014,42(7):1024-1030.

- (GUO Xiaonong, XIONG Zhe, LUO Yongfeng, et al. Experimental research on load-bearing behavior of aluminum alloy gusset joint [J]. Journal of tongji university (nature science), 2014, 42(7): 1024 - 1030.)
- [5] 卜宜都. 曹妃甸储煤仓铝合金网壳结构分析[D]. 天津: 天津大学, 2014.
(BU Yidu. Structural mechanical analysis on aluminum alloy dome of Caofeidian coal storage [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.)
- [6] 赵金城, 许洪明. 上海科技馆单层网壳结构节点受力分析[J]. 工业建筑, 2001, 31(10): 7 - 9.
(ZHAO Jincheng, XU Hongming. Stress analysis of the joint of a ellipsoidal dome structure in Shanghai science and technology museum [J]. Industrial construction, 2001, 31(10): 7 - 9.)
- [7] 赖盛. 直径 60m 储罐顶盖单层铝网壳结构节点的受力分析[J]. 石油化工设备技术, 2007, 28(4): 11 - 14.
(LAI Sheng. Force analysis of single layer aluminum reticulated shell joint of diameter 60m storage tank roof [J]. Petro-chemical equipment technology, 2007, 28(4): 11 - 14.)
- [8] 侯和涛, 孙林波. 大跨铝网壳结构体系的最新进展与创新[J]. 建筑钢结构进展, 2004, 6(1): 45 - 49.
(HOU Hetao, SUN Linbo. The latest development and innovation of large span aluminum mesh structure system [J]. Progress in steel building structures, 2004, 6(1): 45 - 49.)
- [9] 柳晓晨, 王元清, 石永久, 等. 铝合金网壳结构的连接节点形式及其工程应用[C]. 天津: 第十四届全国现代结构工程学术研讨会会议论文集, 2014: 60 - 67.
(LIU Xiaochen, WANG Yuanqing, SHI Yongjiu, et al. Research and engineering applications of joints used in aluminum alloy grid structures [C]. Tianjin: Proceedings of the 14th national conference on modern structural engineering, 2014: 60 - 67.)
- [10] 杨联萍, 韦申, 张其林. 铝合金空间网格结构研究现状及关键问题[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(2): 1 - 19.
(YANG Lianping, WEI Shen, ZHANG Qilin. Aluminum reticulated spatial structures state of the art and key issues [J]. Journal of building structures, 2013, 34(2): 1 - 19.)
- [11] 欧阳元文, 尹建, 宋克余. 铝合金单层网壳结构在大跨度建筑中的应用[C]. 福州: 第十四届空间结构学术会议论文集, 2012: 206 - 212.
(OUYANG Yuanwen, YIN Jian, SONG Keyu. Applications of aluminum alloy shell structures in the large span structures [C]. Fuzhou: Proceedings of the 14th space structure academic conference, 2012: 206 - 212.)
- [12] 徐兴法, 竺士道. 浦东游泳馆大跨度屋顶网架及游泳池升降平台的施工[J]. 上海建设科技, 1997(6): 13 - 15.
(XU Xingfa, ZHU Shidao. The construction of long span aluminum alloy metal roof grif and lift platform for swimming pool of pudong swimming gym [J]. Shanghai construction science and technology, 1997(6): 13 - 15.)
- [13] 谭金涛, 尹昌洪, 曹璐, 等. 重庆国际博览中心铝合金屋面设计[J]. 钢结构, 2013(3): 32 - 35.
(TAN Jintao, YIN Changhong, CAO Lu, et al. The design of alloy roof of Chongqing international expo center [J]. Steel structure, 2013(3): 32 - 35.)
- [14] 薛庆, 赵崇贤, 高波, 等. 大跨度单层铝合金网壳结构安装技术[J]. 建筑施工, 2012, 33(12): 1097 - 1099.
(XUE Qing, ZHAO Chongxian, GAO Bo, et al. Installation technology for long-span single-layer aluminum alloy reticulated shell structure [J]. Building construction, 2012, 33(12): 1097 - 1099.)
- [15] 周一鸣. 上海浦东临沂游泳馆设计[J]. 时代建筑, 1995, 2: 20 - 21.
(ZHOU Yiming. Design of natatorium in Shanghai, pudong [J]. Times construction, 1995, 2: 20 - 21.)
- [16] 田炜, 黄磊, 施骏, 等. 义乌游泳馆倒置铝合金格构式屋盖设计[J]. 建筑钢结构进展, 2008, 10(1): 44 - 48.
(TIAN Wei, HUANG Lei, SHI Jun, et al. Design of up-down aluminum alloy grid structure for roof of Yiwu natatorium [J]. Progress in steel building structures, 2008, 10(1): 44 - 48.)
- [17] 赖盛, 方小芳, 刘宗良. 大型储罐顶盖结构形式及铝合金网壳的应用[J]. 石油化工设备技术, 2004, 25(5): 10 - 14.
(LAI Sheng, FANG Xiaofang, LIU Zongliang. The structure of large tank roof and the application of aluminum alloy reticulated shell [J]. Petro-chemical equipment technology, 2004, 25(5): 10 - 14.)
- [18] RAMBERG W, OSGOOD W R. Description of stress-strain curves by three parameters [R]. Washington: National Advisory Committee for Aeronautics, 1943: 1 - 22.
- [19] 施刚, 罗翠, 王元清, 等. 铝合金网壳结构中新型铸铝节点受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(3): 70 - 79.
(SHI Gang, LUO Cui, WANG Yuanqing, et al. Experimental study on mechanical performance of novel cast aluminum joints in aluminum reticulated shell structures [J]. Journal of building structures, 2012, 33(3): 70 - 79.)
- [20] Eurocode C E N. 3: Design of steel structures, part 1 - 8: design of joints [R]. Brussels: EN1993 - 1 - 8, European Committee for Standardization, 2005.
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)