

文章编号:1673-2049(2019)03-0016-12

铝合金网壳结构盘式节点整体刚度与变形性能的参数分析

王元清¹, 张俊光^{2,3}, 张颖¹, 刘明³, 柳晓晨⁴, 欧阳元文⁵

(1. 清华大学 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084; 2. 增城市碧桂园物业发展有限公司, 广东 广州 510000; 3. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 4. 华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200002; 5. 上海通正铝业工程技术有限公司, 上海 200949)

摘要:针对目前关于铝合金盘式节点的几何参数影响因素研究较少的现状,参照试验试件 PS1 并结合通用有限元软件 ABAQUS 建立几何参数模型,分析几何参数对盘式节点整体刚度与变形性能的影响。结果表明:当铝合金盘式节点的节点盘厚度增加时,节点的抗弯承载力有所提高,但提高幅度较小,整体初始刚度的变化不明显;截面高度增加时,节点抗弯承载力及整体初始刚度近似呈线性提高,提高较为明显;箱型腹板厚度增加时,节点抗弯承载力及箱型杆件在节点处的初始刚度有所提高,工型杆件在节点处的初始刚度降低幅度较小;工型腹板厚度增加时,节点抗弯承载力及工型杆件在节点处的初始刚度有提高的趋势,箱型杆件在节点处的初始刚度基本呈线性降低;箱型翼缘厚度增加时,节点的抗弯承载力及箱型杆件在节点处的初始刚度提高较为明显,但对工型杆件在节点处的初始刚度影响较小;工型翼缘厚度增加时,节点的抗弯承载力及箱型杆件在节点处的初始刚度提高幅度有所增加,工型杆件在节点处的初始刚度近似呈线性提高。

关键词:铝合金网壳结构;盘式节点;抗弯承载力;整体刚度;变形性能;参数分析

中图分类号: TU395 **文献标志码:** A

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

WANG Yuan-qing¹, ZHANG Jun-guang^{2,3}, ZHANG Ying¹, LIU Ming³,
LIU Xiao-chen⁴, OUYANG Yuan-wen⁵

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Zengcheng Biguiyuan Property Development Co., Ltd., Guangzhou 510000, Guangdong, China; 3. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China; 4. East China Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200002, China; 5. Shanghai Tongzheng Aluminum Industry Co., Ltd., Shanghai 200949, China)

Abstract: Aiming at the status that the research on geometric parameters influence factor of aluminum alloy TEMCOR joints was less, a geometric parameter model was established based on the test piece PS1 and the general finite element software ABAQUS, and the influences of geometric parameters on the overall stiffness and deformation performance of disc joints were analyzed. The results show that when the plate thickness of aluminum alloy TEMCOR increases, the flexural capacity increases with small amplitude and the overall initial stiffness is not obvious;

收稿日期:2018-10-21

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAJ16B05);教育部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,安徽霍山人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:wang-yq@mail.tsinghua.edu.cn.

when the section height increases, the flexural capacity and initial stiffness of joints increase linearly and improve more obvious; when the thickness of the box web increases, the flexural capacity and initial stiffness of joints increase with large amplitude; the initial stiffness of the limb type member decreases slightly; when the thickness of I-shaped web increases, the flexural capacity of the joint and the initial stiffness of the limb shaped member are improved; the initial stiffness of the box member is linearly reduced; when the thickness of the box flange increases, the flexural capacity of the joint and the initial stiffness of the box member are improved obviously, but the initial stiffness of the limb type member is less affected; when the thickness of I-shaped flange increases, the flexural capacity of the joint and the initial stiffness of the box member are improved; the initial stiffness of the limb type member is linearly increased.

Key words: aluminum alloy shell structure; TEMCOR joint; flexural capacity; global stiffness; deformation performance; parameter analysis

0 引言

钢一直是建筑行业的主要建筑材料之一,但随着近年来绿色建筑的提出,铝合金材料因密度小、耐腐蚀、比强度高、绿色节能环保的特点,具有钢材不能比拟的自身优势,因此在建筑施工中的应用越来越广泛^[1-10]。

铝合金网壳结构盘式节点凭借其刚度大、受力均匀且空间使用效率高等特性,在飞机场、体育馆、科技馆等公共建筑^[11-14]中得到了广泛应用;凭借其自重轻、耐腐蚀性能好、免维护等优点,在储罐顶盖、煤棚、污水处理厂顶盖、水塔等工业建筑^[15-17]中得到大量的推广发展。

铝合金盘式节点是由 6 根杆件、上下节点盘、紧固螺栓组成,通过紧固螺栓将节点盘与杆件连接。铝合金盘式节点有常见节点和典型节点。常见铝合金盘式节点的 6 根杆件皆为工型杆件。典型节点(南京牛首山佛顶宫穹顶工程)相较常见铝合金盘式节点,是将 6 根杆件中选取处于一条直线上的工型杆件改换成箱型杆件。

本文采用大型通用有限元分析软件 ABAQUS,分析影响铝合金盘式节点整体刚度与变形性能^[18-22]的几何参数,包括节点盘厚度、截面高度、腹板厚度、翼缘厚度,研究对盘式节点整体抗弯承载力和初始刚度的影响规律。

1 有限元结果分析

1.1 材料特性

铝合金材料类型为 6061-T6,由于铝合金材料为非线性的,故在受力分析时需考虑非线性对构件刚度与变形性能的影响。

通过 Steinhart 简化法则计算应变硬化指数 n ,并结合 Ramberg-Osgood^[23-24]模型模拟铝合金的应力-应变关系,具体公式如下

$$10n = f_{0.2} \quad (1)$$

$$\epsilon = \sigma/E + 0.002(\sigma/f_{0.2})^n \quad (2)$$

式中: $f_{0.2}$ 为塑性应变为 0.2%时的应力; ϵ 为应变; σ 为应力; E 为弹性模量。

整理材性数据,并结合公式(1),(2)拟合铝合金应力-应变曲线,如图 1 所示。

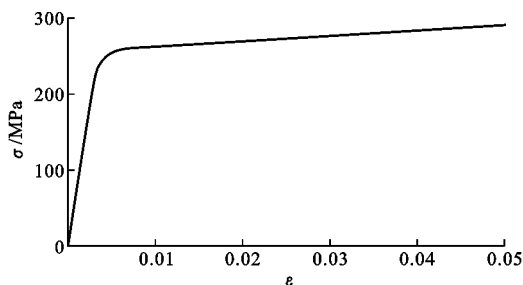


图 1 铝合金应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain Curve of Aluminum Alloy

1.2 有限元分析模型及其验证

铝合金网壳结构盘式节点试件 PS1 的各杆件夹角均为 60°,试件中箱型杆件的截面尺寸为 550 mm×290 mm×10 mm×12 mm,工型杆件的截面尺寸为 550 mm×220 mm×11.5 mm×14 mm。图 2 为加载试验现场,图 3 为模型试件 PS1 网格划分及加载示意图。

本文研究铝合金盘式节点在静力集中荷载作用下整体刚度与变形性能,利用大型通用有限元分析软件 ABAQUS 对铝合金网壳结构盘式节点试件 PS1 进行数值模拟。从试验节点的破坏模式来看,上节点盘局部屈曲,出现马鞍式形状,上节点盘与工型杆件的连接处出现断裂,各杆件与上下节点盘相



图 2 加载试验现场
Fig. 2 Loading Test Site

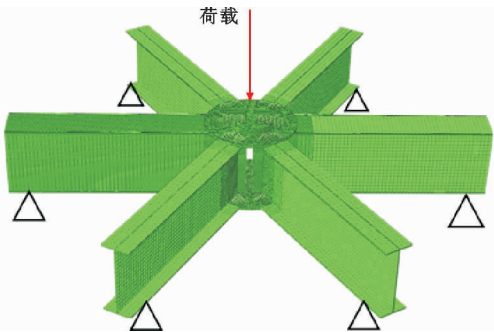


图 3 试件 PS1 网格划分及加载示意
Fig. 3 Meshing and Loading of PS1

连处的各杆件腹板均出现局部屈曲,尤其箱型杆件的变形更为明显。

通过提取模型试件 PS1 节点盘荷载、位移数据绘制荷载-位移曲线,并与试验节点的荷载-位移曲线作对比发现,有限元分析模型能够较好地模拟试验的破坏状态,验证有限元分析模型的可靠性。试验与有限元的荷载-位移($P-\Delta_1$)曲线对比见图 4。

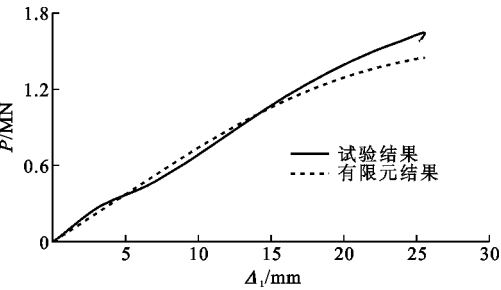


图 4 试件 PS1 荷载-位移曲线试验与有限元结果对比
Fig. 4 Comparison of Load-displacement Curves of PS1 Between Test and FEA Results

2 有限元参数分析

铝合金网壳结构盘式节点整体刚度与变形性能在很大程度上取决于节点域处截面的受力性能。本文采用有限元分析软件对节点域受力性能进行参数化分析。影响盘式节点刚度与变形性能的主要几何

参数包括节点盘厚度 t_p 、截面高度 h 、腹板厚度 t_w 、翼缘厚度 t_f (图 5)。由于试件 PS1 杆件中包括箱型杆件和工型杆件,箱型杆件和工型杆件的腹板厚度、翼缘厚度不相同,故分别对箱型杆件和工型杆件的腹板、翼缘进行参数化分析。

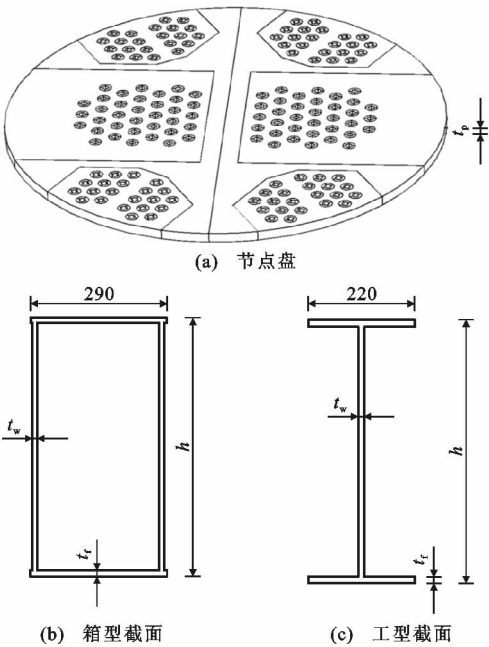


图 5 各参数意义简图(单位:mm)
Fig. 5 Simple Diagram of Each Parameter (Unit:mm)

以试件 PS1 的参数为基准,改变试件主要参数尺寸,如表 1 所示。

2.1 节点盘厚度 t_p 的影响

在进行节点盘厚度参数分析时,通过改变节点盘的厚度建立不同有限元模型,模型分别为 SP2~SP5,并与基准模型 PS1 作对比,SP2~SP5,PS1 对应的节点盘厚度分别为 13.5,18.5,21,23.5,16 mm,有限元的计算结果如图 6,7 所示,其中, M 为弯矩, Φ 为转角, $S_{j,ini}$ 为初始刚度。表 2 为不同节点盘厚度试件的抗弯承载力和初始刚度。

从图 6,7 及表 2 可得到以下结论:

(1)由图 6(b)可知,节点盘厚度每增加 2.5 mm,PS1,SP3~SP5 承载力增长幅度分别为 6.67%,−3.00%,4.66%,−1.81%。从承载力增长幅度来看,随着节点盘厚度的增加,节点的抗弯承载力有所提高,但提高的幅度不大。

(2)从图 7(b)及表 2 可以看出,节点盘厚度每增加 2.5 mm,PS1,SP3~SP5 箱型杆件在节点处的初始刚度增长幅度分别为 2.89%,2.38%,−1.67%,3.50%。从初始刚度变化来看,节点盘厚度的增加对箱型杆件在节点处的初始刚度影响不大。工型杆

表 1 试件主要几何参数
Tab. 1 Main Geometric Parameters of Specimens

试件编号	杆件类型	h/mm	t_w/mm	t_f/mm	t_p/mm	备注
PS1	箱型	550	10.0	12	16.0	
	工型	550	11.5	14		
SP2~SP5	箱型	550	10.0	12	13.5,18.5,21.0,23.5	节点盘厚度的影响
	工型	550	11.5	14		
SP6~SP9	箱型	400,450,500,600	10.0	12	16.0	截面高度的影响
	工型	400,450,500,600	11.5	14		
SP10~SP13	箱型	550	5.0,7.5,12.5,15.0	12	16.0	箱型杆件腹板厚度的影响
	工型	550	11.5	14		
SP14~SP17	箱型	550	10.0	12	16.0	工型杆件腹板厚度的影响
	工型	550	6.5,9.0,14.0,16.5	14		
SP18~SP21	箱型	550	10.0	6,9,15,18	16.0	箱型杆件翼缘厚度的影响
	工型	550	11.5	14		
SP22~SP25	箱型	550	10.0	12	16.0	工型杆件翼缘厚度的影响
	工型	550	11.5	11,17,20,23		

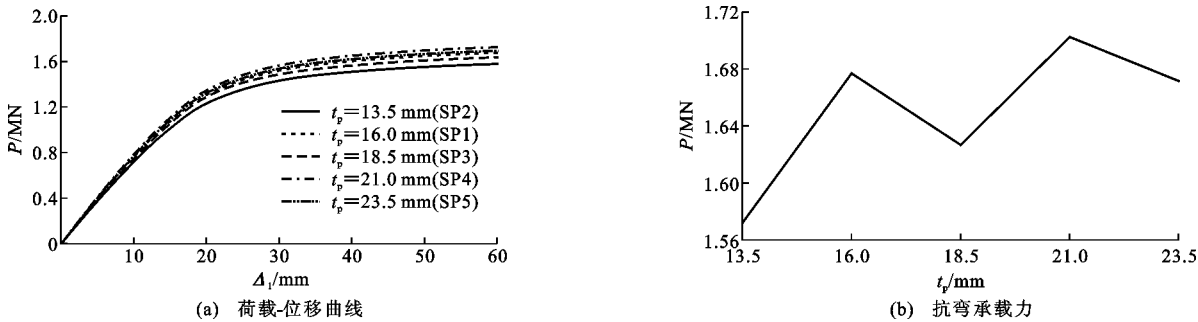


图 6 节点盘厚度对抗弯承载力的影响

Fig. 6 Effect of Plate Thickness on Flexural Capacity

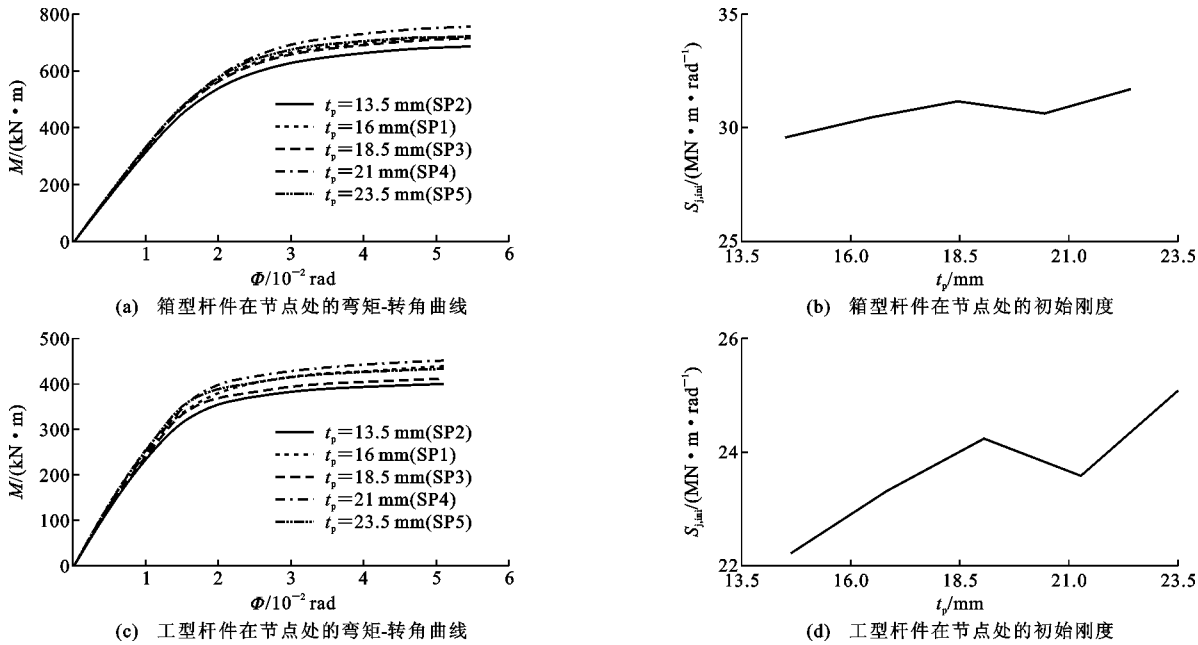


图 7 节点盘厚度对初始刚度的影响

Fig. 7 Effect of Plate Thickness on Initial Stiffness

表 2 不同节点盘厚度试件的抗弯承载力和初始刚度

Tab. 2 Flexural Capacity and Initial Stiffness of Specimens with Different Plate Thicknesses

节点盘厚度/mm	13.5	16.0	18.5	21.0	23.5
抗弯承载力/kN	1 572.17	1 677.03	1 626.76	1 702.55	1 671.77
承载力增长幅度/%	0.00	6.67	−3.00	4.66	−1.81
箱型杆件初始刚度/(kN·m·rad ^{−1})	29 469.03	30 319.62	31 040.52	30 523.03	31 592.76
箱型杆件初始刚度增长幅度/%	0.00	2.89	2.38	−1.67	3.50
工型杆件初始刚度/(kN·m·rad ^{−1})	22 205.00	23 308.00	24 228.32	23 585.16	25 070.43
工型杆件初始刚度增长幅度/%	0.00	4.97	3.95	−2.65	6.30

件在节点处的初始刚度变化规律与箱型杆件在节点处的初始刚度变化规律相似,在此不再赘述。

(3)以上分析表明,节点盘厚度增加可以提高节点的承载力和刚度,但节点的初始刚度变化不明显,原因在于各杆件腹板与节点盘厚度相比相对较薄,在静力荷载作用下,工型杆件(箱型杆件)在节点处的初始刚度较小,杆件腹板先发生破坏。

2.2 截面高度 h 的影响

在进行截面高度参数分析时,通过改变截面的高度建立不同有限元模型,模型分别为 SP6~SP9,并与基准模型 PS1 作对比,SP6~SP9,PS1 对应的截面高度分别为 400,450,500,550,600 mm,有限元的计算结果如图 8,9 所示。表 3 为不同截面高度试件的抗弯承载力和初始刚度。

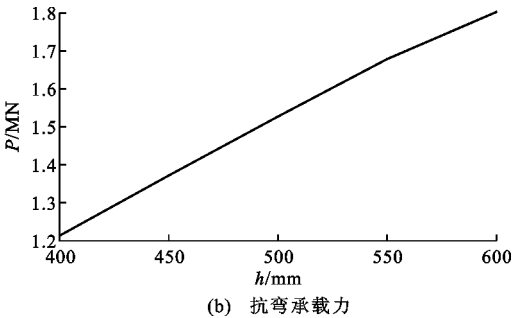
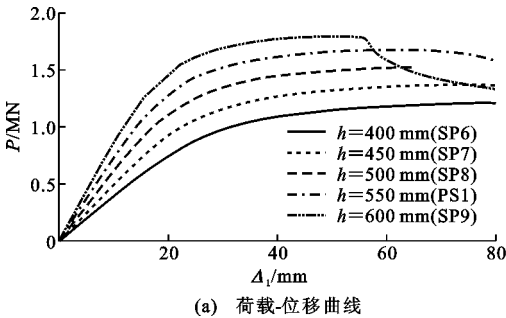


图 8 截面高度对抗弯承载力的影响
Fig. 8 Effect of Section Height on Flexural Capacity

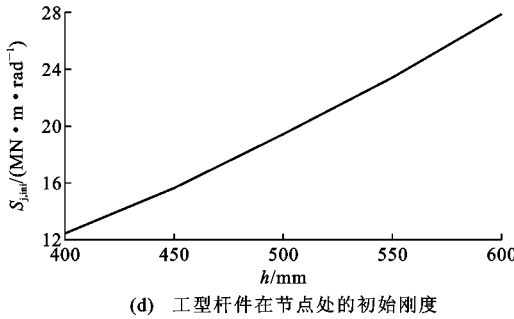
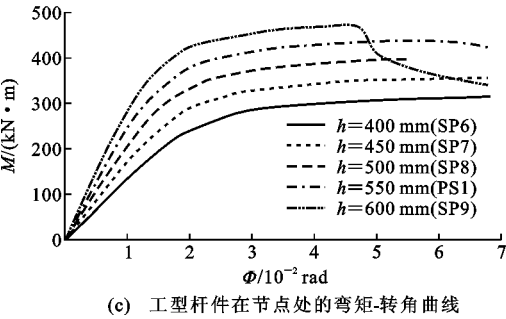
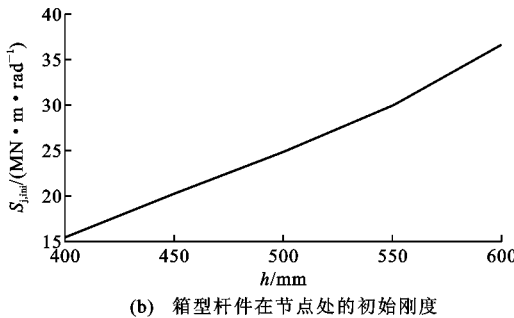
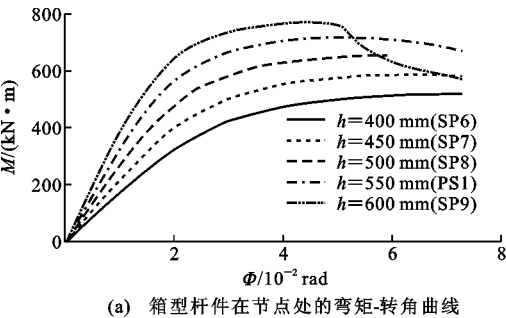


图 9 截面高度对初始刚度的影响
Fig. 9 Effect of Section Height on Initial Stiffness

表 3 不同截面高度试件的抗弯承载力和初始刚度

Tab. 3 Flexural Capacity and Initial Stiffness of Specimens with Different Section Heights

截面高度/mm	400	450	500	550	600
抗弯承载力/kN	1 211.38	1 370.68	1 526.75	1 677.45	1 801.65
承载力增长幅度/%	0.00	13.15	11.39	9.87	7.40
箱型杆件初始刚度/(kN·m·rad ⁻¹)	15 442.22	20 238.14	24 840.91	29 910.63	36 645.71
箱型杆件初始刚度增长幅度/%	0.00	31.06	22.74	20.41	22.52
工型杆件初始刚度/(kN·m·rad ⁻¹)	12 452.38	15 631.58	19 436.76	23 420.00	27 862.83
工型杆件初始刚度增长幅度/%	0.00	25.53	24.34	20.49	18.97

从图 8,9 及表 3 可得到以下结论:

(1)由图 8(b)可知,截面高度每增加 50 mm,SP7,SP8,PS1,SP9 的抗弯承载力增长幅度分别为 13.15%,11.39%,9.87%,7.40%。从总体来看,随着截面高度的增加,节点的抗弯承载力近似呈线性提高。

(2)从图 9(b)及表 3 可以看出,节点盘厚度每增加 50 mm,箱型杆件 SP7,SP8,PS1,PS9 在节点处的初始刚度增长幅度分别为 31.06%,22.74%,20.41%,22.52%。从总体来看,截面高度的增加对箱型杆件在节点处的初始刚度影响较大,基本上呈线性提高。工型杆件在节点处的初始刚度变化与箱型杆件在节点处的初始刚度变化规律相似,在此不再赘述。

(3)以上分析表明,随着截面高度的增加,节点的抗弯承载力、箱型杆件及工型杆件在节点处的刚度影响基本呈线性提高,原因在于截面高度的增加提高了各杆件的截面惯性矩,进而提高了各杆件的线刚度。

2.3 箱型腹板厚度 t_w 的影响

在对箱型腹板厚度进行参数分析时,通过改变箱型腹板厚度建立不同的有限元模型,模型分别为 SP10~SP13,并与基准模型 PS1 作对比,SP10~SP13,PS1 对应的箱型腹板厚度分别为 5,7.5,12.5,15,10 mm,有限元的计算结果如图 10,11 所

示。表 4 为不同箱型腹板厚度试件的抗弯承载力和初始刚度。

从图 10,11 及表 4 可得到以下结论:

(1)由图 10(b)可知,箱型腹板厚度每增加 2.5 mm,SP11,PS1,SP12,SP13 的承载力增长幅度分别为 18.55%,14.96%,2.06%,0.85%。从总体来看,随着箱型腹板厚度的增加,节点的抗弯承载力有所提高,箱型腹板厚度小于 10 mm 时提高幅度较大,而超过 10 mm 时提高幅度并不明显。

(2)从图 11(b)及表 4 可以看出,箱型腹板厚度每增加 2.5 mm,SP11,PS1,SP12,SP13 箱型杆件在节点处的初始刚度增长幅度分别为 41.45%,5.52%,5.77%,8.50%。从总体来看,箱型腹板厚度的增加对箱型杆件在节点处的初始刚度影响较大,箱型腹板厚度小于 7.5 mm 时箱型杆件在节点处的初始刚度提高较大,超过 7.5 mm 时,箱型杆件在节点处的初始刚度基本呈线性提高。

(3)从图 11(d)及表 4 可以看出,箱型腹板厚度每增加 2.5 mm,SP11,PS1,SP12,SP13 工型杆件在节点处的初始刚度增长幅度分别为 0.03%,−1.83%,−0.11%,−0.58%。从总体来看,随着箱型腹板厚度增加,工型杆件在节点处的初始刚度有所降低,但降低幅度较小。

(4)从以上分析来看,箱型腹板厚度的增加提高了节点的抗弯承载力及箱型杆件在节点处的初始刚

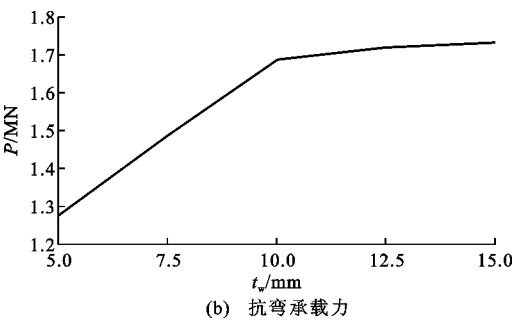
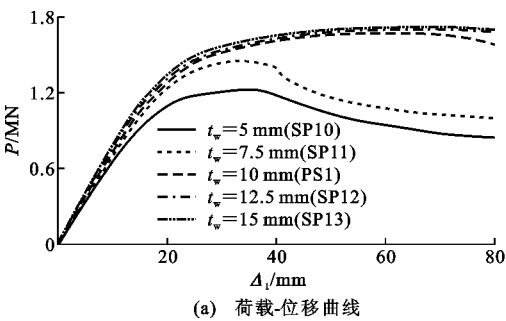


图 10 箱型腹板厚度对抗弯承载力的影响

Fig. 10 Effect of Box Web Thickness on Flexural Capacity

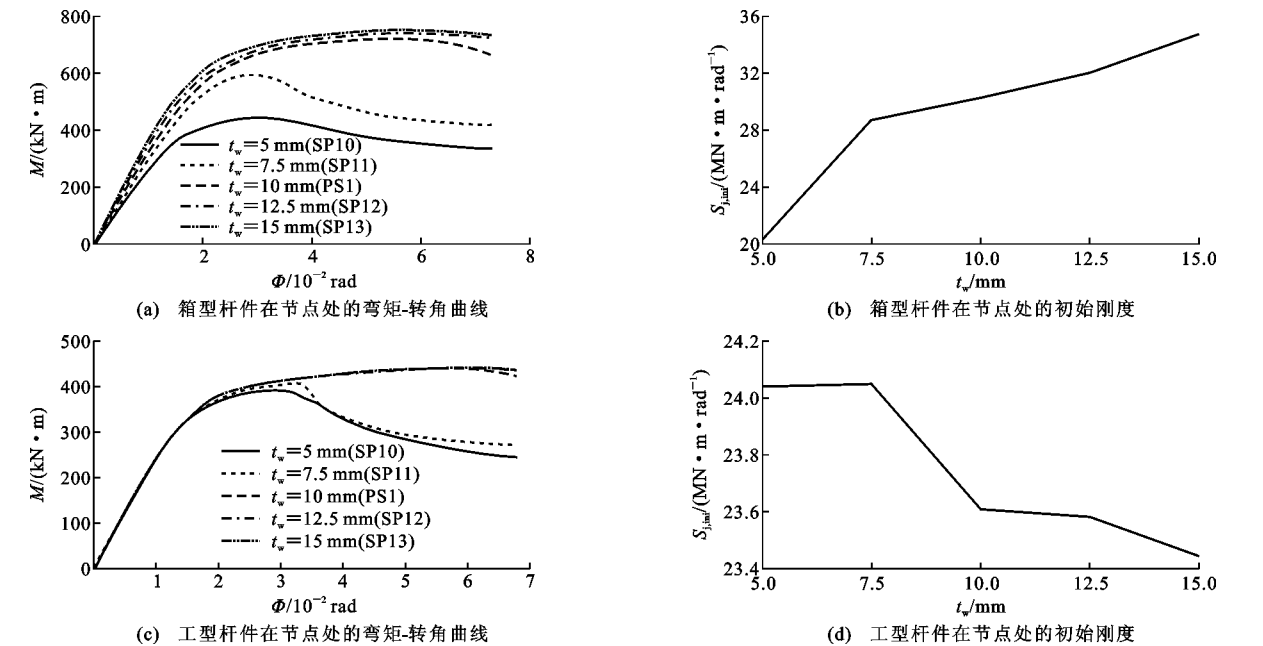


图 11 箱型腹板厚度对初始刚度的影响

Fig. 11 Effect of Box Web Thickness on Initial Stiffness

表 4 不同箱型腹板厚度试件的抗弯承载力和初始刚度

Tab. 4 Flexural Capacity and Initial Stiffness of Specimens with Different Box Web Thicknesses

箱型腹板厚度/mm	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0
抗弯承载力/kN	1 230.85	1 459.19	1 677.45	1 711.93	1 726.52
承载力增长幅度/%	0.00	18.55	14.96	2.06	0.85
箱型杆件初始刚度/(kN · m · rad ⁻¹)	20 293.06	28 704.32	30 289.24	32 036.36	34 759.72
箱型杆件初始刚度增长幅度/%	0.00	41.45	5.52	5.77	8.50
工型杆件初始刚度/(kN · m · rad ⁻¹)	24 040.37	24 048.67	23 608.87	23 583.20	23 446.03
工型杆件初始刚度增长幅度/%	0.00	0.03	-1.83	-0.11	-0.58

度,但对工型杆件在节点处的初始刚度有降低趋势,原因在于箱型腹板厚度的增加提高了箱型杆件的线刚度,进而提高了箱型杆件的初始刚度。

2.4 工型腹板厚度 t_w 的影响

在进行工型腹板参数分析时,通过改变工型腹板的厚度建立不同有限元模型,模型分别为 SP14~SP17,并与基准模型 PS1 作对比,SP14~SP17,PS1 对应的腹板厚度分别为 6.5,9,14,16.5,11.5 mm,

有限元的计算结果如图 12,13 所示。表 5 为不同工型腹板厚度试件的抗弯承载力和初始刚度。

从图 12,13 及表 5 可得到以下结论:

(1)由图 12(b)可知,工型腹板厚度每增加 2.5 mm,SP15,PS1,SP16,SP17 承载力增长幅度则分别为 13.52%,5.28%,1.24%,1.02%。从总体来看,工型腹板厚度的增加对节点的抗弯承载力有所提高,工型腹板厚度小于 11.5 mm 时提高幅度较大,

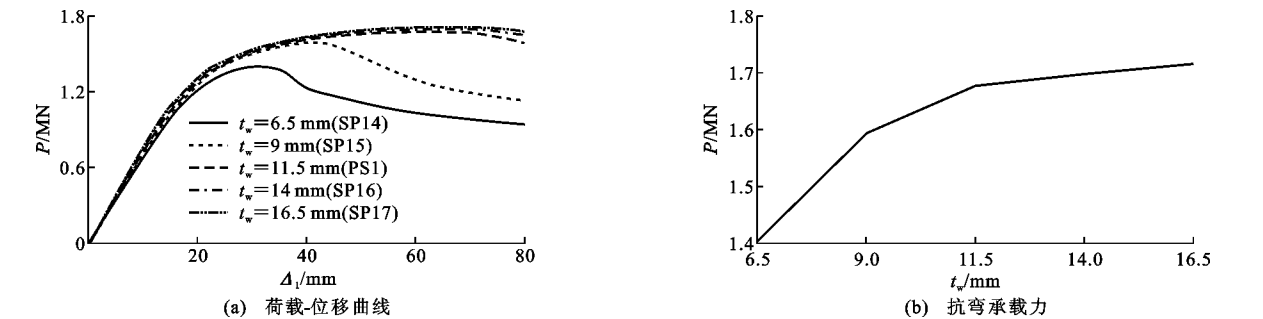


图 12 工型腹板厚度对抗弯承载力的影响

Fig. 12 Effect of I-Shaped Web Thickness on Flexural Capacity

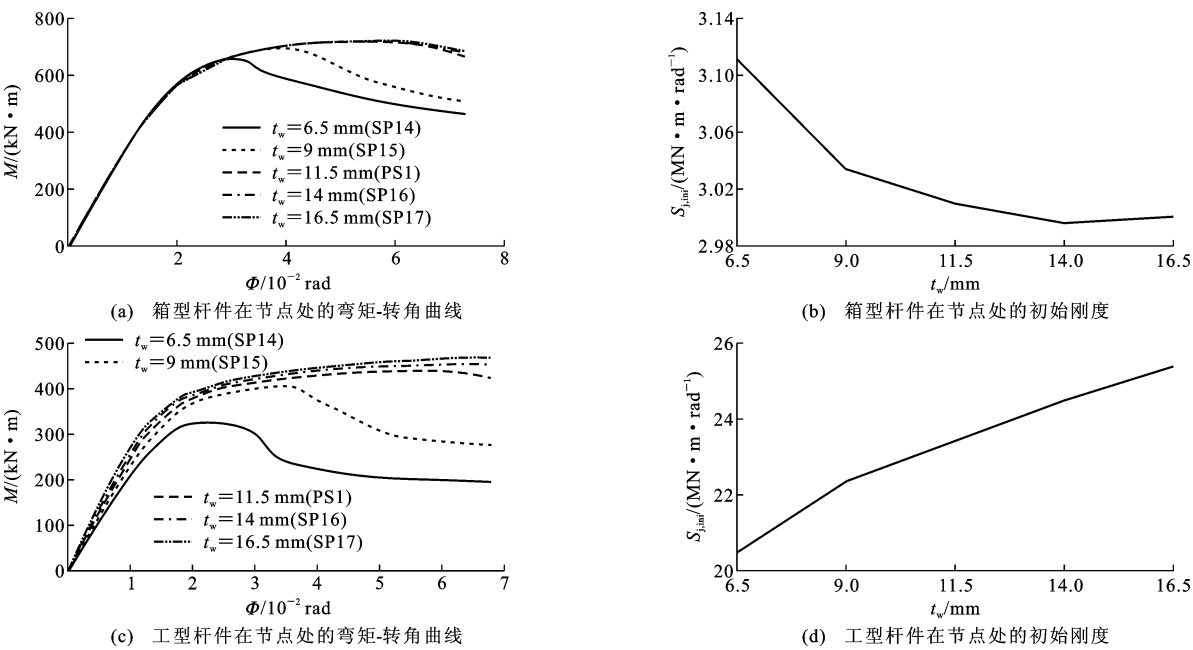


图 13 工型腹板厚度对初始刚度的影响

Fig. 13 Effect of I-shaped Web Thickness on Initial Stiffness

表 5 不同工型腹板厚度试件的抗弯承载力和初始刚度

工型腹板厚度/mm	6.5	9.0	11.5	14.0	16.5
抗弯承载力/kN	1 403.10	1 592.81	1 676.85	1 697.67	1 714.99
承载力增长幅度/%	0.00	13.52	5.28	1.24	1.02
箱型杆件初始刚度/(kN·m·rad ⁻¹)	31 114.89	30 340.91	30 098.74	29 961.88	30 007.50
箱型杆件初始刚度增长幅度/%	0.00	−2.48	−0.80	−0.45	0.15
工型杆件初始刚度/(kN·m·rad ⁻¹)	20 491.51	22 354.55	23 420.00	24 480.65	25 389.43
工型杆件初始刚度增长幅度/%	0.00	9.09	4.77	4.53	3.71

而超过 11.5 mm 时提高的幅度并不明显。

(2)从图 13(b)及表 5 可以看出,工型腹板厚度每增加 2.5 mm,SP15,PS1,SP16,SP17 箱型杆件在节点处的初始刚度增长幅度分别为 −2.48%, −0.80%, −0.45%,0.15%。箱型杆件在节点处的初始刚度基本呈线性降低,但工型腹板厚度在 14~16.5 mm 时,箱型杆件在节点处的初始刚度有明显的提高。

(3)从图 13(d)及表 5 可以看出,工型腹板厚度每增加 2.5 mm,SP15,PS1,SP16,SP17 工型杆件在节点处的初始刚度增长幅度分别为 9.09%, 4.77%,4.53%,3.71%。从总体来看,随着工型腹板厚度的增加,工型杆件在节点处的初始刚度有提高的趋势。

(4)从以上分析来看,工型腹板厚度的增加提高了节点的承载力和工型杆件在节点处的初始刚度,但提高并不明显,原因在于工型腹板位于上下翼缘中间位置,在杆件的线刚度上提高幅度大。

2.5 箱型翼缘厚度 t_r 的影响

在作盘式节点箱型翼缘厚度参数分析时,通过改变箱型翼缘的厚度建立有限元模型进行分析,模型分别为 SP18~SP21,并与基准模型 PS1 作对比,对应的箱型翼缘厚度分别为 6,9,15,18,12 mm,有限元的计算结果如图 14,15 所示。表 6 为不同箱型翼缘厚度试件的抗弯承载力和初始刚度。

从图 14,15 及表 6 可得到以下结论:

(1)由图 14(b)可知,箱型翼缘厚度每增加 3 mm,SP19,PS1,SP20,SP21 承载力增长幅度分别为 22.42%,13.78%,8.83%,4.59%。从总体上看,节点的抗弯承载力随着箱型翼缘厚度的增加而提高。

(2)从图 15(b)及表 6 可以看出,箱型翼缘厚度每增加 3 mm,SP19,PS1,SP20,SP21 箱型杆件在节点处的初始刚度增长幅度分别为 19.74%,9.86%,10.01%,6.93%。从总体来看,箱型翼缘厚度的增加对箱型杆件在节点处的初始刚度有较大影响,提高幅度较大。

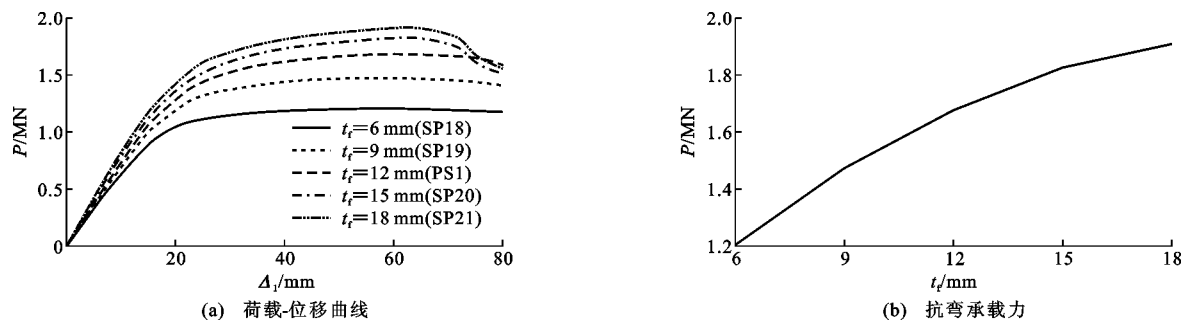


图 14 箱型翼缘厚度对抗弯承载力的影响

Fig. 14 Effect of Box Flange Thickness on Flexural Capacity

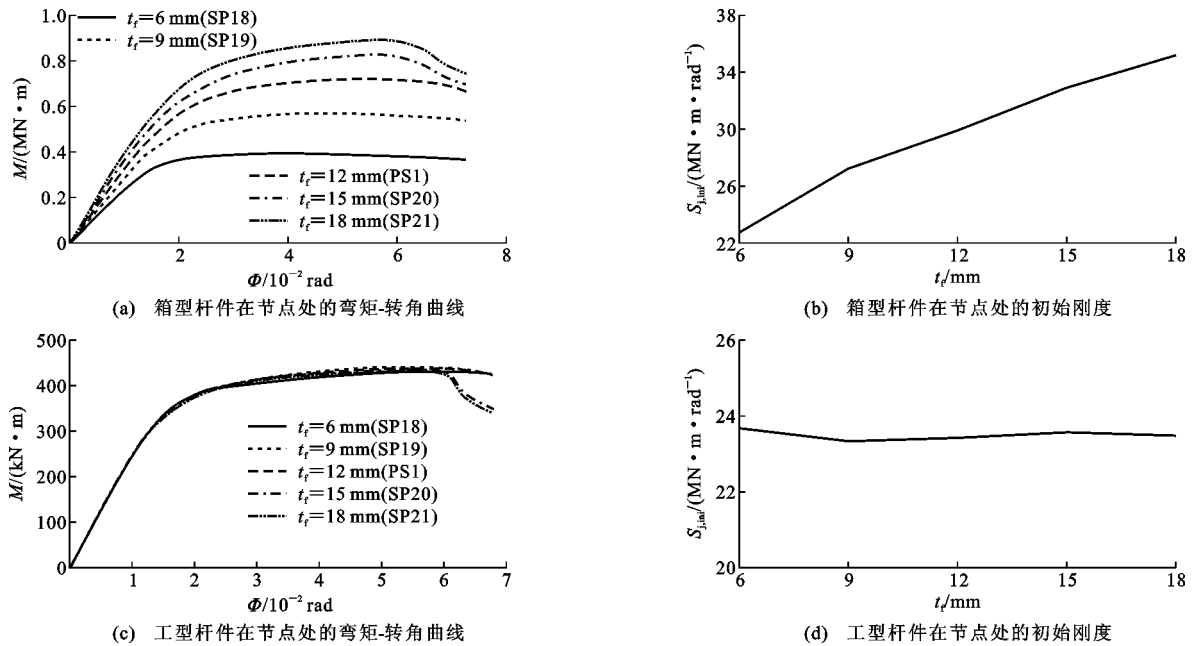


图 15 箱型翼缘厚度对初始刚度的影响

Fig. 15 Effect of Box Flange Thickness on Initial Stiffness

表 6 不同箱型翼缘厚度试件的抗弯承载力和初始刚度

Tab. 6 Flexural Capacity and Initial Stiffness of Specimens with Different Box Flange Thicknesses

箱型翼缘厚度/mm	6	9	12	15	18
抗弯承载力/kN	1 204.22	1 474.26	1 677.45	1 825.56	1 909.43
承载力增长幅度/%	0.00	22.42	13.78	8.83	4.59
箱型杆件初始刚度/(kN·m·rad ⁻¹)	22 739.26	27 227.20	29 910.79	32 903.52	35 184.14
箱型杆件初始刚度增长幅度/%	0.00	19.74	9.86	10.01	6.93
工型杆件初始刚度/(kN·m·rad ⁻¹)	23 675.01	23 344.73	23 419.89	23 571.88	23 479.95
工型杆件初始刚度增长幅度/%	0.00	-1.40	0.32	0.65	-0.39

(3)从图 15(d)及表 6 可以看出,箱型翼缘厚度每增加 3 mm,SP19,PS1,SP20,SP21 工型杆件在节点处的初始刚度增长幅度分别为-1.40%,0.32%,0.65%,0.39%。由此可看到箱型翼缘厚度对工型杆件在节点处的杆件初始刚度影响较小。

(4)从以上分析来看,箱型翼缘厚度的增加对节点的抗弯承载力及箱型杆件在节点处的初始刚度有

比较明显的影响,对工型杆件在节点处的杆件初始刚度影响较小,原因在于箱型翼缘厚度提高了箱型杆件的线刚度。

2.6 工型翼缘厚度 t_f 的影响

在作铝合金盘式节点工型翼缘厚度参数分析时,通过改变工型翼缘的厚度建立有限元模型进行分析,模型分别为 SP22~SP25,并与基准模型 PS1

作对比,SP22~SP25,PS1 对应的工型翼缘厚度分别为 11,17,20,25,14 mm,有限元的计算结果如图

16,17 所示。表 7 为不同工型翼缘厚度试件的抗弯承载力和初始刚度。

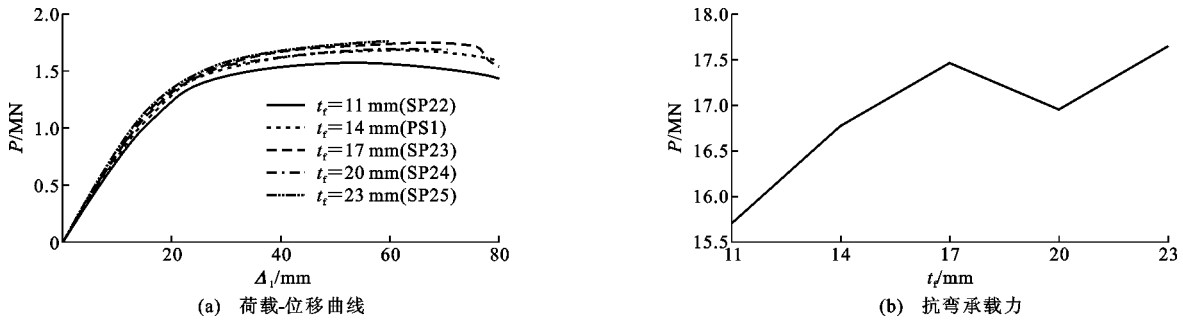


图 16 工型翼缘厚度对抗弯承载力的影响

Fig. 16 Effect of I-shaped Flange Thickness on Flexural Capacity

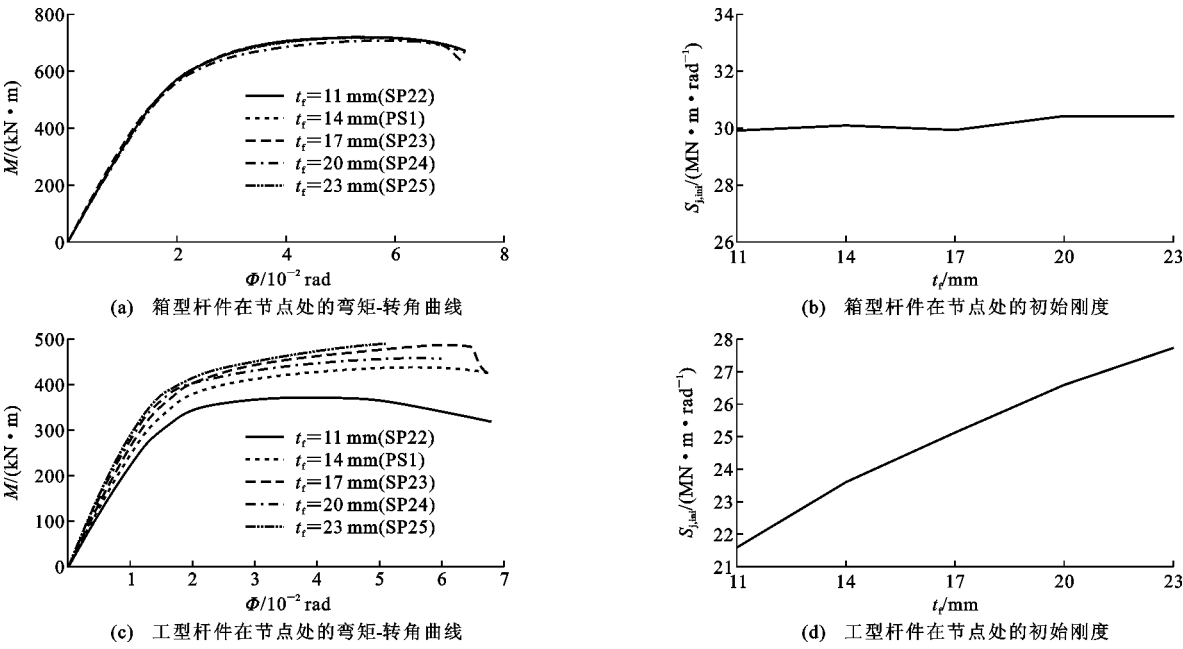


图 17 工型翼缘厚度对初始刚度的影响

Fig. 17 Effect of I-shaped Flange Thickness on Initial Stiffness

表 7 不同工型翼缘厚度试件的抗弯承载力和初始刚度

Tab. 7 Flexural Capacity and Initial Stiffness of Specimens with Different I-shaped Flange Thicknesses

工型翼缘厚度/mm	11	14	17	20	23
抗弯承载力/kN	1 569.82	1 677.45	1 745.91	1 695.25	1 764.70
承载力增长幅度/%	0.00	6.86	4.08	-2.90	4.10
箱型杆件初始刚度/($\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$)	29 919.38	30 098.74	29 930.00	30 425.81	30 403.16
箱型杆件初始刚度增长幅度/%	0.00	0.60	-0.56	1.66	-0.07
工型杆件初始刚度/($\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$)	21 596.52	23 608.87	25 114.73	26 582.61	27 719.49
工型杆件初始刚度增长幅度/%	0.00	9.32	6.38	5.84	4.28

从图 16,17 及表 7 可得到以下结论:
(1)随着工型翼缘厚度的增加,对节点的抗弯承载力有所提高,但提高的幅度并不大。
(2)工型翼缘厚度的增加对箱型杆件在节点处的初始刚度影响较小。从图 17(b)及表 7 可以看

出,箱型翼缘厚度每增加 3 mm,PS1,SP23~SP25 工型杆件在节点处的初始刚度增长幅度分别为 9.32%,6.38%,5.84%,4.28%。由此可看到工型翼缘厚度的增加能够提高工型杆件在节点处的杆件初始刚度,近似呈线性增长。

(3)从以上分析来看,工型翼缘厚度增加,提高了节点承载力及工型杆件在节点处的杆件初始刚度,但对箱型杆件在节点处的初始刚度影响较小,原因在于工型翼缘厚度增加提高了工型杆件的线刚度。

3 结 语

(1)随着节点盘厚度的增加,节点承载力的提高幅度不大,且箱型杆件、工型杆件在节点处的初始刚度变化也不明显。

(2)随着截面高度的增加,节点抗弯承载力、整体初始刚度近似呈线性提高,提高较为明显。

(3)通过提高截面腹板的厚度可以提高节点的抗弯承载力和初始刚度。

(4)节点的抗弯承载力和初始刚度是可以通过截面翼缘厚度来改善的。

(5)通过以上参数分析,建议采用增加铝合金盘式节点箱型和工型杆件的截面高度、腹板厚度及翼缘厚度的方式提高铝合金盘式节点的受力性能。

参考文献:

References:

- [1] 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 Chong-xian,GAO Bo,et al. Installation Technology for Long-span Single-layer Al Alloy Reticulated Shell Structure[J]. Building Construction,2012,33(12):1097-1099.
- [2] 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 Lian-ping,WEI Shen,ZHANG Qi-lin. Aluminum Reticulated Spatial Structures: State of the Art and Key Issues[J]. Journal of Building Structures, 2013,34(2):1-19.
- [3] 侯和涛,孙林波.大跨铝网格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 He-tao,SUN Lin-bo. The Latest Development and Innovations in Clear Large Span Aluminum Lattice Structural System[J]. Progress in Steel Building Structures,2004,6(1):45-49.
- [4] 王 俊,赵基达,蓝 天,等.大跨度空间结构发展历程与展望[J]. 建筑科学,2013,29(11):2-10.
WANG Jun,ZHAO Ji-da,LAN Tian,et al. Development Progress and Future Prospect of Large-span Spatial Structure[J]. Building Science,2013,29(11):

2-10.

- [5] 柳晓晨,王元清,石永久,等.铝合金网格结构的连接节点形式及其工程应用[J]. 工业建筑,2014,44(增):60-67.
LIU Xiao-chen,WANG Yuan-qing,SHI Yong-jiu,et al. Research and Engineering Applications of Joints Used in Aluminum Alloy Grid Structures[J]. Industrial Construction,2014,44(S):60-67.
- [6] 郝成新,钱基宏,宋 涛,等.铝网架结构的研究与工程应用[J]. 建筑结构学报,2003,24(4):70-75.
HAO Cheng-xin,QIAN Ji-hong,SONG Tao,et al. Research and Application of Aluminium Alloy Grid Structure[J]. Journal of Building Structures,2003,24(4):70-75.
- [7] 钱基宏.铝网架结构应用研究与实践[J]. 建筑钢结构进展,2008,10(1):58-62.
QIAN Ji-hong. Study and Application of Aluminum Space Frame Structures[J]. Progress in Steel Building Structures,2008,10(1):58-62.
- [8] 李志强,雷光明.铝合金的特点及其在建筑结构中的应用[J]. 工业建筑,2007,37(增):1449-1452.
LI Zhi-qiang,LEI Guang-ming. Characteristics of Aluminum Alloy and Its Application in Building Structure[J]. Industrial Construction,2007,37(S):1449-1452.
- [9] 刘光辉.铝合金材料在桥梁中的应用研究[J]. 黑龙江交通科技,2013(5):112,114.
LIU Guang-hui. Study on the Application of Aluminum Alloy Materials in Bridge[J]. Communication Science and Technology Heilongjiang,2013(5):112,114.
- [10] 石永久,程 明,王元清.铝合金在建筑结构中的应用与研究[J]. 建筑科学,2005,21(6):7-11,20.
SHI Yong-jiu,CHENG Ming,WANG Yuan-qing. Application and Study of Aluminum Alloy in Building Structures[J]. Building Science,2005,21(6):7-11,20.
- [11] 王立维,杨 文,冯 远,等.中国现代五项赛事中心游泳击剑馆屋盖铝合金单层网壳结构设计[J]. 建筑结构,2010,40(9):73-76.
WANG Li-wei,YANG Wen,FENG Yuan,et al. Design on Single-layer Aluminum Shell Roof of Swimming and Sword Gymnasium of Chinese Modern Five Competition Center[J]. Building Structure,2010,40(9):73-76.
- [12] 房庆强,赵金城.上海科技城单层铝合金椭球体网壳设计[J]. 建筑结构,2001,31(6):34-36.
FANG Qing-qiang,ZHAO Jin-cheng,LI Ya-ming. De-

- sign of the Aluminum Dome Shanghai Science and Technology Museum[J]. Building Structure, 2010, 31(6): 34-36.
- [13] 居其伟,朱丽娟. 上海国际体操中心主馆铝结构穹顶设计介绍[J]. 建筑结构学报, 1998, 19(3): 33-41.
JU Qi-wei, ZHU Li-juan. An Introduction to Aluminum Alloy Dome Roof Structure of Shanghai International Gymnastic Center [J]. Journal of Building Structures, 1998, 19(3): 33-41.
- [14] 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 Jin-cheng, XU Hong-ming. Stress Analysis of the Joint of a Ellipsoidal Dome Structure in Shanghai Science and Technology Museum[J]. Industrial Construction, 2001, 31(10): 7-9.
- [15] 赖 盛. 直径 60 m 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. Stress Analysis of the Joint of 60 m Tank in Dia with an Aluminum Dome Structure[J]. Petrochemical Equipment Technology, 2007, 28(4): 11-14.
- [16] 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 Xiao-fang, LIU Zong-liang. Structure Shape of Large Scale Storage Tank Roof and Application of Aluminum Alloy Mesh Shell[J]. Petrochemical Equipment Technology, 2004, 25(5): 10-14.
- [17] 修维红,倪利刚,李永泰,等. 直径 60 m 大型储罐罐顶球面网壳设计计算[J]. 石油和化工设备, 2013, 16(6): 5-8.
XIU Wei-hong, NI Li-gang, LI Yong-tai, et al. Design and Calculation of Spherical Reticulated Shell for Large Storage Tank Roof with Diameter 60 m[J]. Petro & Chemical Equipment, 2013, 16(6): 5-8.
- [18] 王元清,柳晓晨,石永久,等. 铝合金盘式节点静力性能的有限元参数分析[J]. 武汉大学学报:工学报, 2017, 50(5): 688-696, 732.
WANG Yuan-qing, LIU Xiao-chen, SHI Yong-jiu, et al. Parametric Analysis of Static Behavior for Aluminum Alloy TEMCOR Joints[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(5): 688-696, 732.
- [19] 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 Yuan-qing, LIU Xiao-chen, SHI Yong-jiu, 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.
- [20] 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 Xiao-nong, XIONG Zhe, LUO Yong-feng, et al. Experimental Research on Load-bearing behavior of Aluminum Alloy Gusset Joint[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2014, 42(7): 1024-1030.
- [21] 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 Yuan-qing, 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.
- [22] 邹 磊,戴国欣. 铝合金穹顶圆盘盖板节点(TEMCOR 节点)有限元分析[J]. 工业建筑, 2009, 29(增): 604-612.
ZOU Lei, DAI Guo-xin. Finite Element Analysis of Disc Dome Joint (TEMCOR Node) of Aluminum Alloy Dome[J]. Industrial Construction, 2009, 29(S): 604-612.
- [23] HASAN R, KISHI N, CHEN W F. A New Nonlinear Connection Classification System[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1998, 47(1/2): 119-140.
- [24] EN 1993-1-8:2005, Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-8: Design of Joints[S].