

# 铝合金板式节点初始刚度

郭小农<sup>1</sup>, 熊哲<sup>1</sup>, 罗永峰<sup>1</sup>, 徐晗<sup>2</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 中天建设集团浙江钢构有限公司, 浙江 杭州 310008)

**摘要:** 铝合金板式节点变形分为节点板中心区域变形、节点板与杆件错动以及杆件自身变形三部分. 对铝合金板式节点的受弯机理进行分析, 得到节点初始弯曲刚度公式. 在试验基础上, 分析试件的抗弯性能, 得到弯矩-转角曲线. 采用ABAQUES软件对节点进行数值模拟, 数值结果与试验结果吻合较好. 通过参数分析得知节点板厚度、杆件截面高度、螺栓数量及节点板半径对节点初始弯曲刚度的影响. 最后将理论结果分别与数值结果和试验结果进行比较, 验证了公式的合理性.

**关键词:** 铝合金; 板式节点; 初始弯曲刚度; 数值模拟; 理论公式

**中图分类号:** TU395

**文献标志码:** A

## Initial Bending Stiffness of Aluminum Alloy Gusset Joint

GUO Xiaonong<sup>1</sup>, XIONG Zhe<sup>1</sup>, LUO Yongfeng<sup>1</sup>, XU Han<sup>2</sup>

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; Zhongtian Construction Group Zhejiang Steel Structure Co. Ltd., Hangzhou 310008, China)

**Abstract:** The bending deformation of aluminum alloy gusset joint could be divided into three parts: the deformation of the central area of the plate, the relative displacement between the plate and the member and the bending deformation of the member. The formula to estimate the initial bending stiffness of aluminum alloy gusset joint is proposed through analyzing its bending characteristics. According to the joint tests, the main mechanical behavior of moment-rotation curves is investigated. Numerical simulations of the gusset joint are established through software ABAQUES. The initial bending stiffness obtained from the numerical results agrees well with the experimental ones. Based on single parameter analysis, the influence of the thickness of plate, the height of member, the number of bolts and the radius of plate on the out-of-plane initial bending stiffness of this joint are studied. Finally, the

comparison of the theoretical results, the numerical results and the experimental results is carried out. It is indicated that the theoretical formula is suitable for the design of this joint.

**Key words:** aluminum alloy; gusset joint; initial bending stiffness; numerical simulation; theoretical formula

铝合金板式节点是铝合金单层网壳主要节点形式之一<sup>[1]</sup>. 我国《空间网格结构技术规程》(JGJ7—2010)<sup>[2]</sup>规定, 在进行空间结构的分析和设计时应将节点简化为铰接或者刚接. 然而, 研究表明铝合金板式节点具有半刚性特征, 其半刚性性能对结构承载力有重大的影响<sup>[3]</sup>. 曾银枝等<sup>[4]</sup>通过铝合金单层网壳试验研究和数值模拟指出需考虑节点的半刚性来提高计算精度. 邹磊<sup>[5]</sup>对铝合金板式节点进行数值模拟, 指出铝合金板式节点是一种典型的半刚性节点. 张竟乐等<sup>[6]</sup>对铝合金板式节点的初始轴向刚度和弯曲刚度进行分析, 提出节点刚度计算公式. 然而, 目前对铝合金板式节点的研究不够深入, 大部分研究仅局限于数值模拟, 刚度计算公式缺乏明确的物理意义, 更缺乏试验数据支持, 因此有必要对铝合金板式节点刚度进行深入研究, 为铝合金板式节点的设计提供参考.

本文在铝合金板式节点的抗弯性能试验研究<sup>[7]</sup>的基础上对铝合金板式节点的变形机理进行分析, 提出节点初始弯曲刚度的理论公式; 建立有限元模型, 并与试验结果进行比较, 验证有限元模型的可靠性; 以节点板厚度、杆件截面高度、螺栓数量及节点板半径为参数对铝合金板式节点初始弯曲刚度进行分析; 最后将理论结果与试验结果和有限元结果进行比较, 验证理论公式的合理性.

收稿日期: 2013-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(50908168)

第一作者: 郭小农(1977—), 男, 工学博士, 主要研究方向为铝合金结构. E-mail: guo-xiao-nong@tongji.edu.cn

通讯作者: 熊哲(1989—), 男, 博士生, 主要研究方向为铝合金结构. E-mail: 123superpanda@tongji.edu.cn

# 1 节点平面外初始弯曲刚度理论分析

## 1.1 节点平面外受弯变形机理

节点在杆端平面外弯矩作用下的变形可以分解为3个分量,即节点板中心区域(见图1,图中 $d$ 为圆板直径)变形、节点板与杆件之间的相对错动变形以及杆件自身变形,如图2所示,图中 $M_y$ 为杆端弯矩, $h$ 为杆件的截面高度, $R_c$ 为杆件端部至节点板中心距离, $R$ 为圆板半径, $\varphi_1$ 为节点板中心区边缘截面变形引起的转角, $\varphi_2$ 为节点板与杆件之间的相对错动变形引起的转角。

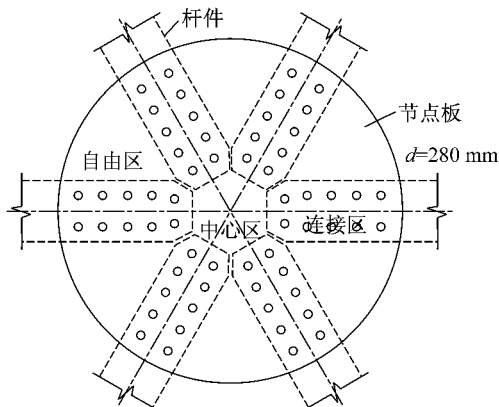


图1 节点板分区

Fig.1 Division of the plate

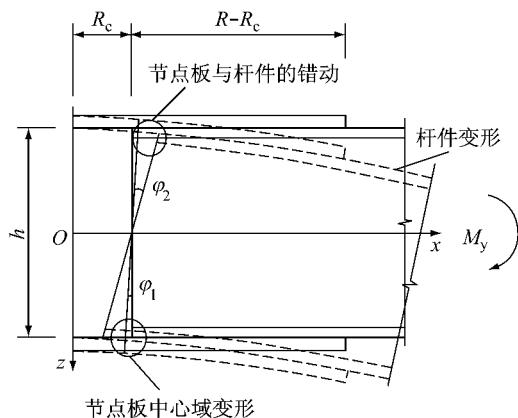


图2 受弯板式节点的局部变形

Fig.2 Local deformation of the gusset joint subjected to bending moment

记由节点板中心区域变形产生的转动刚度分量为 $K_1$ ,由节点板与杆件错动变形产生的转动刚度分量为 $K_2$ ,由杆件自身变形产生的转动刚度分量为 $K_3$ ,则节点板边缘相对于节点中心的相对转动刚度 $K$ 可表示为

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3}} \quad (1)$$

## 1.2 转动刚度分量 $K_1$ 的确定

节点板中心区边缘截面的相对变形 $\delta_1$ 如图3所示,可近似由式(2)计算。

$$\delta_1 = 2\varepsilon_1 R_c = 2 \frac{Q}{\alpha_1 R_c t E_p} R_c \quad (2)$$

$$Q = \pm \frac{M_y}{h} \quad (3)$$

式中: $\varepsilon_1$ 为节点板中心区沿节点板径向的等效应变; $Q$ 为由弯矩引起的节点板螺栓群剪力,可按式(3)计算; $\alpha_1 R_c t$ 为节点板承受薄膜力的等效截面积, $\alpha_1$ 为等效截面系数,可根据数值分析结果拟合得到, $t$ 为节点板厚度, $E_p$ 为节点板的弹性模量。节点板中心受到的螺栓群剪力如图4所示。

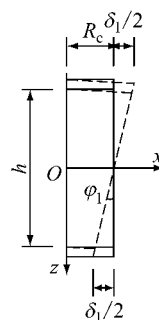


图3 节点板中心域变形

Fig.3 Deformation of the plates at the central area

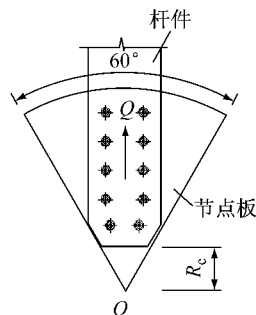


图4 节点板受剪

Fig.4 Plate subjected to shear

结合式(2)和式(3)得到因节点板中心区变形引起杆端局部转动的刚度分量表达式如下:

$$K_1 = \frac{M_y h}{\delta_1} = \alpha_1 E_p \frac{t h^2}{2} \quad (4)$$

## 1.3 转动刚度分量 $K_2$ 的确定

杆件翼缘与节点板在加载初期通过静摩擦传力的同时也会因接触面的切向挤压变形发生很小的错动位移,可以通过定义接触面的切向刚度 $S$ 来描述其静摩擦力下的变形性能,即

$$f = S \cdot \delta_2 \quad (5)$$

式中:  $f$  为接触面的静摩擦力;  $\delta_2$  为静摩擦力引起的摩擦面的相对滑移, 如图 5 所示。

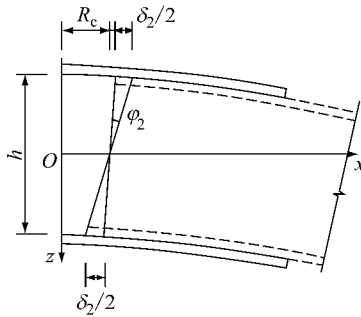


图5 节点板与杆件错动变形

Fig.5 Relative displacement between the plate and the member

根据摩擦学基本理论<sup>[8]</sup>, 摩擦面的切向刚度和接触面积以及摩擦系数成正比, 和板总厚成反比。根据板式节点的具体构造, 还可以假定摩擦面的切向刚度近似和连接螺栓的数量以及接触面板的等效弹性模量成正比。则  $\delta_2$  可以写为

$$\delta_2 = \frac{Q t_f}{\alpha_2 E_e n \mu A_c} \quad (6)$$

式中:  $t_f$  为板的总厚度;  $\alpha_2$  为待定系数, 与接触物体的材质及表面法向力有关, 可以根据数值模拟结果回归得到;  $E_e$  为等效弹性模量, 取摩擦面板弹性模量的平均值;  $n$  为螺栓数量;  $\mu$  为摩擦系数;  $A_c$  为杆件和节点板的接触面积, 如图 6 所示。

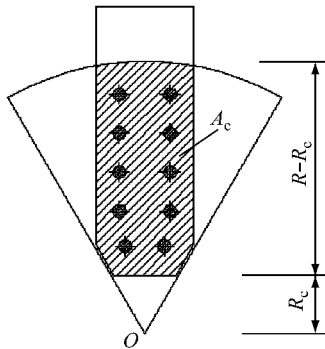


图6 节点板几何参数

Fig.6 Configurations of the plate

结合式(3)和式(6), 可以得到刚度分量  $K_2$  的计算公式为

$$K_2 = \alpha_2 E_e \frac{\mu n h^2 A_c}{t_f} \quad (7)$$

#### 1.4 转动刚度分量 $K_3$ 的确定

节点体范围内杆件的自身变形如图 7 所示, 图中  $\varphi_3$  为杆件自身变形引起的转角。杆件变形刚度可近似按受弯梁计算, 杆件在节点板边缘相对于节点

中心的转动刚度可近似按式(8)估算。

$$K_3 = \frac{M_y}{\varphi_3} = \alpha_3 E_b \frac{I}{R - R_c} \quad (8)$$

式中:  $\alpha_3$  为由于弯矩变化引起的刚度修正系数, 可以根据数值模拟结果回归得到;  $E_b$  为杆件弹性模量;  $I$  为杆件截面惯性矩;  $R - R_c$  为节点区内杆件长度, 如图 7 所示。

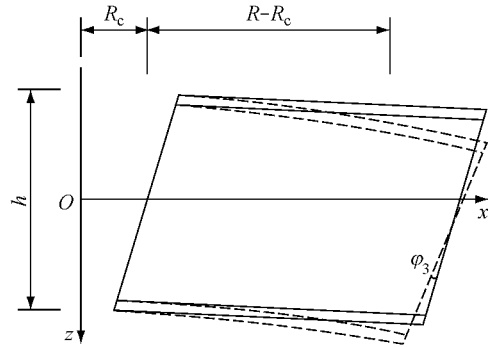


图7 杆件自身弯曲变形

Fig.7 Bending deformation of the member

分别根据式(4)、式(7)、式(8)可以求得 3 个刚度分量, 然后代入式(1)即可得到总的节点面外抗弯刚度, 如式(9)所示。式中的 3 个待定系数  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  通过数值模拟的计算结果拟合回归得到。

$$K = \frac{1}{\frac{2}{\alpha_1 E_p t h^2} + \frac{t_f}{\alpha_2 E_e \mu n h^2 A_c} + \frac{R - R_c}{\alpha_3 E_b I}} \quad (9)$$

## 2 节点弯矩-转角试验

在文献[7]进行的 14 个铝合金板式节点试验研究的基础上, 对铝合金板式节点的抗弯性能进行分析。图 8a 为六杆加载厚板 ( $t \geq 5$  mm) 节点试件的弯矩-转角曲线, 图 8b 为六杆加载薄板 ( $t \leq 3$  mm) 节点试件的弯矩-转角曲线。根据试验实测的弯矩-转角曲线, 采用最小二乘法可以拟合出六杆加载节点试件的初始弯曲刚度如表 1 所示。

结合图 8 和表 1 可得出, 板式节点的初始抗弯刚度随着节点板厚度的增加而增大。对于厚板试件, 板厚由 5 mm 变为 6 mm, 其初始抗弯刚度增加 12.7%; 对于薄板试件, 板厚由 2.25 mm 变为 2.70 mm, 其初始抗弯刚度增加 15.7%。

## 3 铝合金板式节点数值模拟

### 3.1 有限元模型

采用 ABAQUS/Standard 软件建立考虑螺栓孔

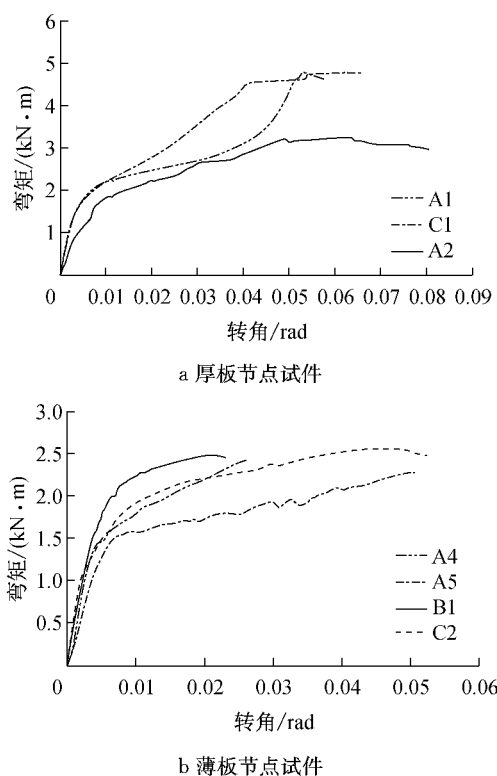


图 8 六杆加载节点试件的弯矩-转角曲线  
Fig.8 Bending moment-rotation curves of the specimens with six loaded members

表 1 初始刚度的试验结果

Tab.1 Experimental results for the initial bending stiffness

试件编号 <sup>[7]</sup>	节点板厚度/mm	$K/(kN \cdot m)$
A1	6.00	441
A2	5.00	385
C1	6.00	505
A4	2.70	376
A5	2.25	325
B1	2.25	395
C2	2.25	475

隙影响的铝合金板式节点有限元模型,用于计算板式节点的初始抗弯刚度.建模时进行如下简化:①仅对节点体区域进行模拟,并考虑对称性,对半边节点体进行模拟;②不考虑螺纹及垫片的影响;③所有螺栓的预紧力均相等;④考虑螺栓与孔壁间的孔隙,以便准确模拟加载初期螺栓的嵌固和板件的摩擦(图 9).

有限元模型中所有部件均采用线性减缩积分单元 C3D8R 模拟,网格划分结果如图 10 所示.模型中各部件的相互联系通过接触对来模拟.在定义接触对时,采用如下假定:①由于螺杆与孔壁的错动很小,故不考虑摩擦,其余接触面均考虑摩擦;②螺栓与板件的接触均以螺栓表面为主面;节点板与杆件

翼缘的接触均以较厚板件表面为主面;③适当划分板件表面并从中选定接触面,以避免接触对涵盖过多单元而增加计算量.荷载和杆端约束均施加在杆端截面中心的参考点上,并耦合参考点与其所在截面的平动自由度,以便在杆端施加轴力和弯矩.

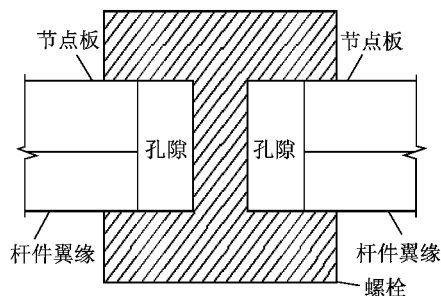


图 9 螺栓孔隙示意  
Fig.9 Aperture gap

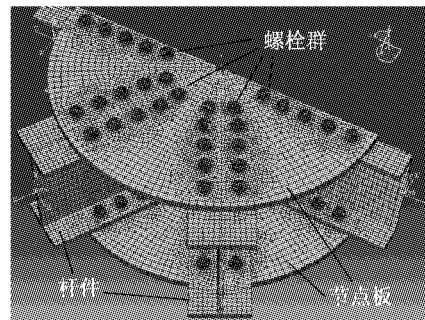


图 10 节点有限元模型单元划分  
Fig.10 Mesh configuration of the finite element model

铝合金型材和板材本构关系均采用 Ramberg-Osgood 模型及 SteinHardt 建议<sup>[9]</sup>,型材和板件的具体参数详见文献<sup>[7]</sup>;不锈钢螺栓的本构关系采用双折线模型,弹性模量取  $2.06 \times 10^5$  MPa,根据文献<sup>[10]</sup>中螺栓拉伸试验结果,螺栓的抗拉强度  $f_u$  取 725 MPa,名义屈服强度  $f_{0.2}$  取 470 MPa.

### 3.2 数值模型的试验验证

为了验算有限元模型的正确性,对文献<sup>[7]</sup>中试件 A1 和 A2 进行了数值模拟,并将数值计算结果和试验结果进行了对比.

图 11 给出了试件 A1 和 A2 弯矩-转角曲线的实测值和数值分析结果的比较:A1 试件初始刚度的数值结果为  $367 kN \cdot m \cdot rad^{-1}$ ,试验结果为  $441 kN \cdot m \cdot rad^{-1}$ ;A2 试件初始刚度的数值结果为  $366 kN \cdot m \cdot rad^{-1}$ ,试验结果为  $385 kN \cdot m \cdot rad^{-1}$ .从图 11 可以看出:数值模型的初始刚度与试验结果吻合较好,特别是 A2 试件,其初始刚度的数值结果和试验结果仅相差 5.0%,说明本文的数值计算模型能够有效地模拟铝合金板式节点的初始刚度.

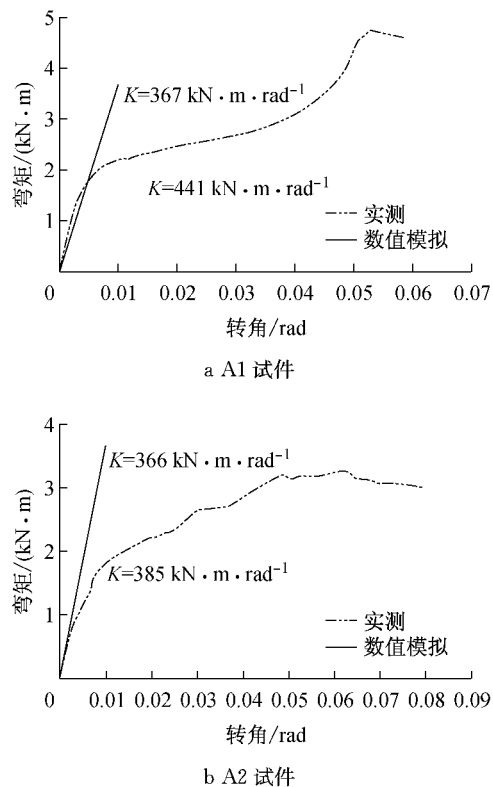


图 11 A1 和 A2 试件的弯矩-转角曲线

Fig.11 Bending moment-rotation curves of specimens A1 and A2

## 4 结果比较

### 4.1 理论公式系数的确定

以  $t, h, n$  及  $R$  为变化参数建立 4 个系列共计 14 个铝合金板式节点有限元模型,各模型几何参数见表 2.表 3 给出了各刚度分类以及总刚度的数值.

表 2 各模型几何参数

Tab.2 Configurations of the models					
模型系列	模型编号	$h$	$t$	$n$	$R$ mm
T 系列	T-3	100	3	10	140
	T-4	100	4	10	140
	T-5	100	5	10	140
	T-6	100	6	10	140
	T-7	100	7	10	140
	T-8	100	8	10	140
H 系列	H-60	60	5	10	140
	H-80	80	5	10	140
	H-120	120	5	10	140
	H-140	140	5	10	140
N 系列	N-6	100	5	6	140
	N-8	100	5	8	140
R 系列	R-160	100	5	10	160
	R-180	100	5	10	180

表 3 初始刚度及其分量的数值模拟结果

Tab.3 Numerical results for initial bending stiffness

模型编号	$K$	kN · m		
		$K_1$	$K_2$	$K_3$
T-3	348	1 425	923	921
T-4	364	1 987	862	922
T-5	366	2 561	798	921
T-6	367	3 199	756	918
T-7	369	3 857	736	914
T-8	370	4 575	721	910
H-60	133	1 026	341	277
H-80	235	1 707	543	545
H-120	535	3 579	1 142	1 398
H-140	731	4 785	1 513	2 008
N-6	298	2 566	534	919
N-8	329	2 559	638	928
R-160	385	2 753	872	921
R-180	363	2 795	914	768

根据表 3 中各刚度分量的数值分析结果,分别对系数  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  采用最小二乘法进行曲线拟合,得到  $\alpha_1=1.52, \alpha_2=0.000\ 35, \alpha_3=1.14$ . 则式(9)可写成

$$K = \frac{1}{\frac{1}{0.76E_p t h^2} + \frac{t_f}{0.000\ 35 E_c \mu n h^2 A_c} + \frac{R - R_c}{1.14 E_b I}} \quad (10)$$

### 4.2 理论公式与数值模拟结果的比较

由理论公式和数值模拟求得的  $K$  如表 4 所示,表中  $\beta_1$  为误差,为数值模拟值与式(10)计算值之差的绝对值除以数值模拟值.由表 4 中数据可知,误差的平均值为 3.2%,表明提出的初始刚度估算公式的准确性较好.

表 4 初始刚度的计算值与数值模拟结果比较

Tab.4 Comparison between theoretical and numerical results for the bending stiffness

模型编号	初始刚度/(kN · m)		$\beta_1/\%$
	式(10)	数值模拟	
T-3	333	348	4.3
T-4	352	364	3.3
T-5	364	366	0.5
T-6	373	367	1.6
T-7	379	369	2.7
T-8	384	370	3.8
H-60	123	133	7.5
H-80	227	235	3.4
H-120	537	535	0.4
H-140	745	731	1.9
N-6	277	298	7.0
N-8	326	329	0.9
R-160	364	385	5.5
R-180	358	363	1.4

### 4.3 理论公式与试验结果的比较

由理论公式和试验求得的  $K$  值如表 5 所示,  $\beta_2$  为试验值与式(10)计算值之差除以试验值. 从表 5 可以看出, 理论公式求得结果普遍小于试验结果, 并且误差的平均值为 9.5%, 说明提出的初始刚度估算公式具有一定的准确性, 并且其结果能够作为节点初始刚度的下限. 节点杆件间整体性比较好的试件(A1 和 A2)初始刚度的平均误差在 10.4% 左右, 节点整体性比较差的试件(A4 和 A5)初始刚度的平均误差在 8.8% 左右. 造成此现象的主要原因在于, 在推导理论公式的过程中忽略了杆件间的相互作用.

表 5 初始刚度的计算值与试验结果比较

Tab.5 Comparison between the theoretical and experimental results for the bending stiffness

试件编号	初始刚度/(kN·m)		$\beta_2/\%$
	式(10)	试验	
A1	373	441	15.4
A2	364	385	5.5
A4	326	376	13.3
A5	312	325	4.0

## 5 结论和展望

从试验、数值模拟和理论推导 3 个方面对铝合金板式节点的节点刚度进行了研究, 其主要结论如下:

(1) 对铝合金板式节点的平面外变形机理进行分析, 节点变形由节点板中心区域变形、节点板与杆件错动以及杆件自身变形三部分组成.

(2) 推导出节点平面外初始弯曲刚度式(10), 该式物理意义明确, 与数值结果和试验结果吻合较好.

(3) 在文献[7]的基础上, 对六杆加载的节点试件的抗弯性能进行分析, 得到节点试件的试验弯矩-转角曲线及其初始刚度. 结果表明板式节点的初始抗弯刚度和其抗弯承载力随着节点板厚度的增加而增大. 当节点板较厚时, 节点整体性能较好, 增加抗剪键对节点的初始抗弯刚度影响不大; 当节点板较薄时, 增加 C 类抗剪键明显改善了节点的整体性能, 提高了节点的抗弯能力.

(4) 式(10)的计算结果分别与数值分析结果和试验结果相比, 平均误差分别为 3.2% 和 9.6%, 验证式(10)的合理性.

铝合金板式节点的节点刚度还受到杆件间的相互作用、抗剪键、全过程的非线性刚度等诸多因素的影响, 这些都有待进一步研究.

### 参考文献:

- [1] 沈祖炎, 郭小农, 李元齐. 铝合金结构研究现状简述[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(6):100.  
SHEN Zuyan, GUO Xiaonong, LI Yuanqi. State-of-the-arts of research on aluminum alloy structures [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6): 100.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ7—2010 空间网格结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. JGJ7—2010 Technical specification for space frame structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [3] 郭小农, 沈祖炎. 半刚性节点单层球面网壳整体稳定分析[J]. 四川建筑科学研究, 2004, 30(3): 10.  
GUO Xiaonong, SHEN Zuyan. Analysis of stability of single-layer spherical reticulated shells with semi-rigid joints [J]. Building Science Research of Sichuan, 2004, 30 (3): 10.
- [4] 曾银枝, 钱若军, 王人鹏, 等. 铝合金穹顶的试验研究[J]. 空间结构, 2000, 6(4):47.  
ZENG Yinzi, QIAN Ruojun, WANG Renpeng, et al. Test research on the aluminous-alloy dome [J]. Spatial Structures, 2000, 6(4):47.
- [5] 邹磊. 重庆空港体育馆铝合金穹顶结构分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.  
ZOU Lei. Structure analysis study on aluminum alloy dome of Chongqing Konggang Stadium [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [6] 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, 35(4):88.  
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.
- [7] 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.  
GUO Xiaonong, XIONG Zhe, LUO Yongfeng, et al. Experimental research on load-bearing behavior of aluminum alloy gusset joint [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2014, 42(7):1024.
- [8] D F Moore. 摩擦学原理和应用[M]. 黄文治, 谢振中, 杨明安译. 北京: 机械工业出版社, 1982.  
Moore F D. Principles and application of tribology [M]. Translated by HUANG Wenzhi, XIE Zhenzhong, YANG Mingan. Beijing: China Machine Press, 1982.
- [9] 郭小农, 沈祖炎, 李元齐, 等. 国产结构用铝合金材料本构关系及物理力学性能研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(6): 110.  
GUO Xiaonong, SHEN Zuyan, LI Yuanqi, et al. Stress-strain relationship and physical-mechanical properties of domestic structural aluminum alloy [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6): 110.
- [10] 徐晗. 铝合金螺栓连接节点性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2012.  
XU Han. The loading behavior of aluminum alloy bolted connections and joints [D]. Shanghai: Tongji University, 2012.