

铝合金板式节点承载力设计方法及构造要求

郭小农¹, 熊哲¹, 罗永峰¹, 徐晗²

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

摘要: 对铝合金板式节点的承载力进行理论分析, 提出了节点板块状拉剪破坏的承载力计算公式以及节点板局部屈曲承载力的计算公式. 在试验的基础上, 利用 ABAQUS 软件对铝合金板式节点进行数值模拟研究, 数值分析结果和试验结果吻合较好. 根据试验结果拟合得到了节点承载力公式中的系数. 将承载力计算公式和试验结果进行了对比, 验证了公式的实用性. 最后提出铝合金板式节点的实用构造要求, 并通过试验结果验证了其正确性.

关键词: 铝合金板式节点; 承载力; 块状拉剪破坏; 局部屈曲破坏

中图分类号: TU395

文献标志码: A

The Design Method and Detailed Requirements of Bearing Capacity of Aluminum Alloy Gusset Joint

GUO Xiaonong¹, XIONG Zhe¹, LUO Yongfeng¹, XU Han²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Zhongtian Construction Group Zhejiang Steel Structure Co., LTD., Hangzhou 310008, China)

Abstract: According to the theoretical study on the load-bearing capacity of aluminum alloy gusset joint, formulae to estimate the block shear rapture load and the local buckling load of plate are proposed. Based on the experimental program, numerical model is established to simulate this joint by means of program ABAQUS. Experimental results agree well with numerical results. Test results and statistic regression technology are used to estimate the value of the coefficients in the proposed formulae. Comparisons between theoretical results and experimental results are conducted to indicate the applicability of proposed formulae. At last, detailing requirements of the joint plate are proposed, and the rationality of detailing requirements is demonstrated through experimental results.

Key words: aluminum alloy gusset joint; load-bearing

capacity; block shear rapture; local buckling

铝合金板式节点是由美国 TEMCOR 公司研发的一种典型的半刚性节点, 已广泛运用于铝合金空间网格结构中^[1]. 目前, 国内外有关此节点承载力的研究很少, 规范中尚没有针对该类节点的设计方法. 文献[2]对铝合金板式节点的设计进行说明, 指出节点的设计与圆板的直径、圆板的厚度、圆板的起拱量、螺栓的规格和螺栓的数量有关, 但缺少更深入的研究. 基于此, 本文对铝合金板式节点承载力进行研究, 为铝合金板式节点的设计提供参考.

1 铝合金板式节点承载力理论分析

1.1 节点简化内力分布模式

由于铝合金网壳的杆件主要承受轴力和面外弯矩, 因此, 本文主要研究板式节点在面外弯矩和轴力作用下的节点承载力. 在面外弯矩 M_y 和轴力 N_x 的共同作用下, 定义 $\beta = N_x h / M_y$, 即 β 为轴力 (N_x) 和杆件截面高度 (h) 的乘积与弯矩 (M_y) 之比, 则铝合金板式节点的螺栓群总剪力 Q 可以表达为

$$Q = \frac{M_y}{h} (0.5\beta \pm 1) \quad (1)$$

从式(1)可见, 当弯矩起主要控制作用时, 上节点板承受拉力, 下节点板承受压力, 如图 1 所示. 在螺栓群剪力作用下, 受拉节点板可能发生块状拉剪破坏, 受压节点板可能发生中心区的局部屈曲破坏.

1.2 块状拉剪破坏承载力

文献[3]中部分试件的节点板块状拉剪破坏如图 2 所示.

铝合金板式节点的受拉节点板在螺栓群剪力作用下可能出现 3 种块状拉剪破坏模式: 单连接区破

收稿日期: 2013-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(50908168)

第一作者: 郭小农(1977—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为铝合金结构. E-mail: gu-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

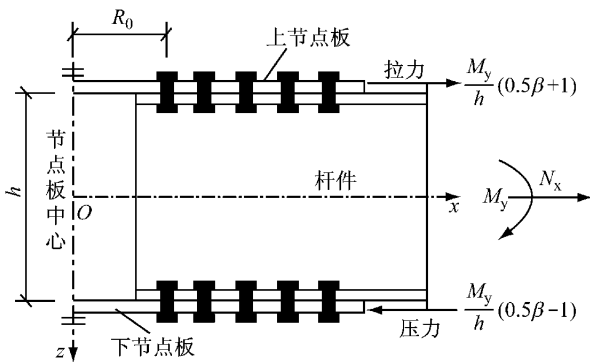


图 1 节点内力分布

Fig.1 Internal force distribution of joint

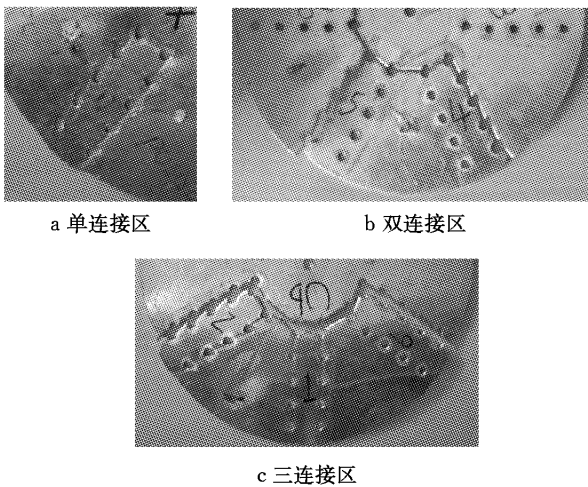


图 2 部分节点板块状拉剪破坏^[3]

Fig.2 Block shear rupture of part plates of specimens^[3]

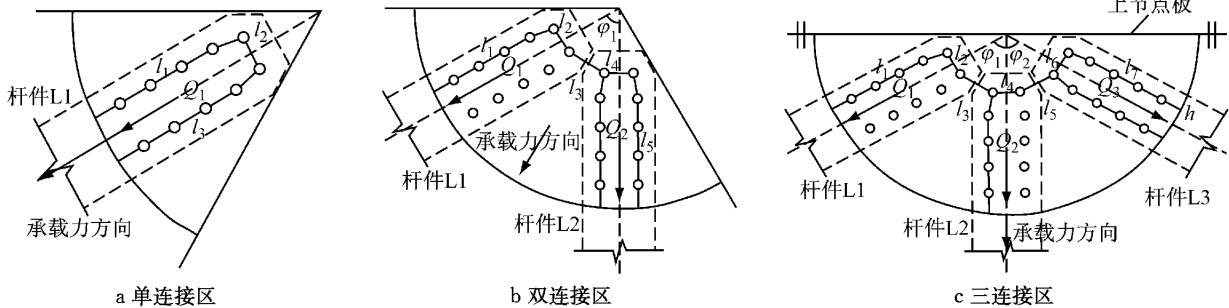


图 3 块状拉剪破坏模式

Fig.3 Block shear rupture modes

计算公式. 文献[3]对文献[4]的试验进行补充和完善, 共计进行了 14 个板式节点试验. 本文在此基础上对文献[4]的承载力计算公式进行了进一步深入研究. 综上所述, 假设各杆件与节点板接触面积和螺栓孔的位置均相同, 则铝合金板式节点块状拉剪破坏承载力如下.

对于单连接区块状拉剪破坏(图 3a), 有

$$V_{ul} = kt f_u \sum_{i=1}^3 \gamma_i l_i \geq Q_1 \quad (2)$$

坏、双连接区破坏及三连接区破坏, 如图 3 所示. 当节点板所连接杆件 L1 的螺栓群的剪力 Q_1 特别大、而相邻杆件 L2 和 L3 的螺栓群剪力 Q_2 和 Q_3 较小时, 节点板将发生沿图 3a 所示的单连接区块状拉剪破坏. 图 3a 中, $l_1 \sim l_3$ 为单连接区破坏边的净长度. 当节点板所连接杆件 L1 和 L2 的螺栓群剪力 Q_1 和 Q_2 都较大(假定 $Q_1 \geq Q_2$), 则节点板将发生如图 3b 所示的双连接区块状拉剪破坏. 图 3b 中, $l_1 \sim l_5$ 为双连接区破坏边的净长度; φ_1 为杆件 1 和杆件 2 之间夹角. 若杆件 L1, L2 和 L3 的螺栓群剪力 Q_1, Q_2 和 Q_3 相互接近, 则节点板可能发生如图 3c 所示的三连接区块状拉剪破坏. 图 3c 中, $l_1 \sim l_7$ 为三连接区破坏边的净长度; φ_1 为杆件 1 和杆件 2 之间夹角; φ_2 为杆件 3 和杆件 2 之间夹角.

文献[3]中部分试件的节点板内外表面的荷载-应变曲线如图 4 所示. 由图可知, 在加载初期, 节点板上、下表面的应变同步增长, 此时节点板的应力主要由薄膜力产生; 当节点所受的荷载继续增大, 节点板上、下表面的应变增长不再同步, 内表面测点的应变随着荷载的增大逐渐减小, 外表面测点应变则加速增长, 说明节点板的环向除出现薄膜力外, 还出现了板面外弯矩, 且板面外弯矩产生的应力与板面内薄膜应力的比值将逐渐增大.

文献[4]进行了 4 个板式节点的试验, 并在试验结果的基础上提出了节点板块状拉剪破坏的承载力

$$\begin{cases} \gamma_1 = \gamma_3 = 0.58 \\ \gamma_2 = 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: V_{ul} 为单连接区块状拉剪破坏承载力; k 为由节点板局部受弯引起的承载力折减系数, 通过试验数据得到; t 为节点板厚度; f_u 为材料的极限抗拉强度; γ_i 为第 i 条破坏边的材料等效破坏强度系数, 是破坏边上的正应力和剪应力在满足米塞斯屈服条件的情况下其合力在破坏承载力方向的投影最大值与材料的极限抗拉强度的比值, 对于单连接区块状拉剪

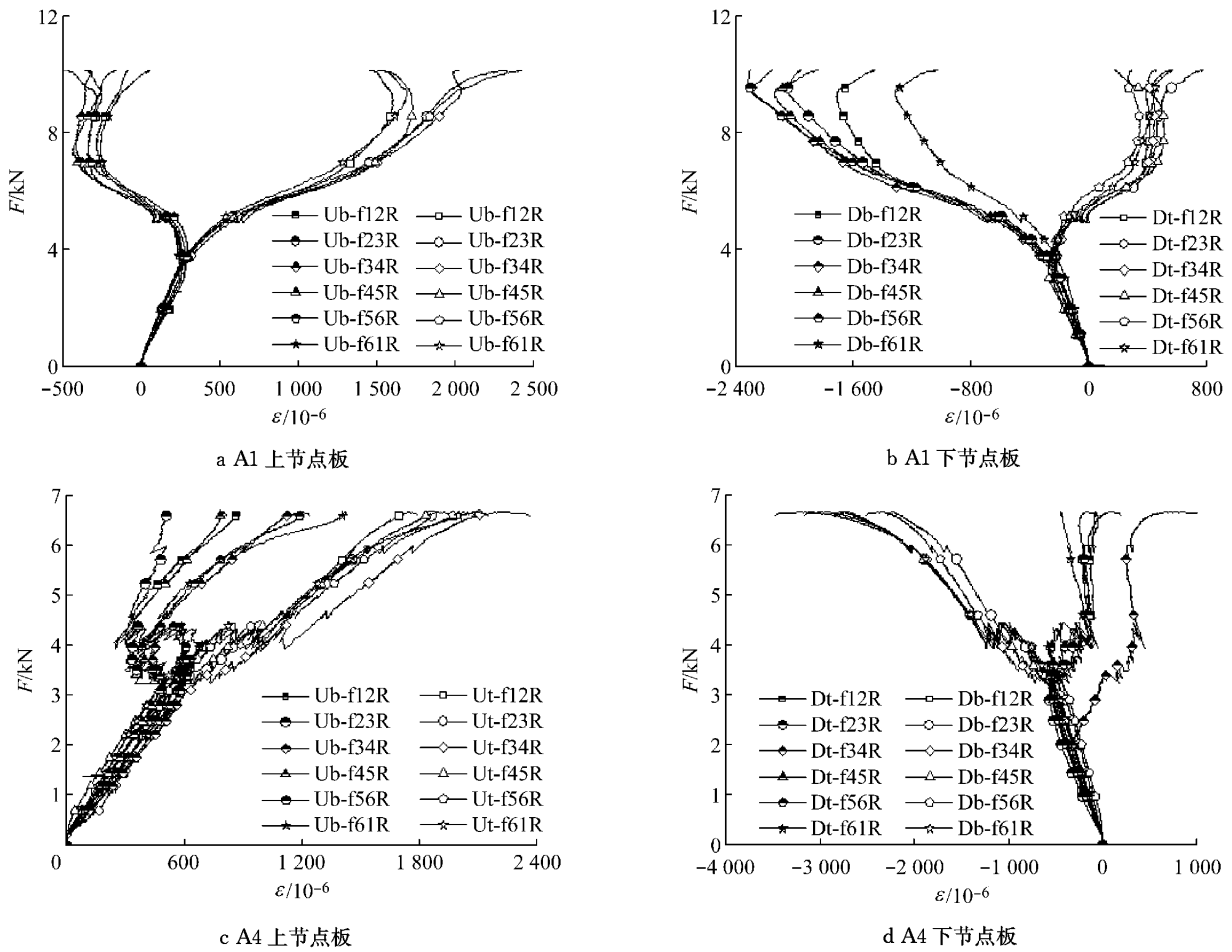


图 4 部分节点板荷载-应变曲线^[3]

Fig.4 Load-strain curves of part plates of specimens^[3]

破坏, γ_i 的大小见式(3).

对于双连接区块状拉剪破坏(图 3b),有

$$V_{w2} = kt f_u \sum_{i=1}^5 \gamma_i l_i \geq (Q_1 + Q_2) \cos \frac{\varphi_1}{2} \quad (4)$$

式中: V_{w2} 为双连接区块状拉剪破坏承载力; 对于双连接区块状拉剪破坏, γ_i 的大小与双连接区两杆件间夹角 φ_1 有关, 见表 1.

表 1 等效破坏强度系数

Tab.1 Equivalent strength coefficient

连接区	γ_i	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°
双连接区	γ_1	0.641	0.656	0.673	0.690	0.707	0.725	0.743	0.762	0.780	0.799	0.816
	γ_2	0.960	0.950	0.939	0.926	0.913	0.899	0.884	0.868	0.851	0.834	0.816
	γ_3	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	γ_4	0.960	0.950	0.939	0.926	0.913	0.899	0.884	0.868	0.851	0.834	0.816
	γ_5	0.641	0.656	0.673	0.690	0.707	0.725	0.743	0.762	0.780	0.799	0.816
三连接区	γ_1	0.780	0.816	0.851	0.884	0.913	0.938	0.960	0.977	0.990	0.997	1.000
	γ_2	0.851	0.816	0.780	0.743	0.707	0.673	0.641	0.615	0.595	0.582	0.577
	γ_3	0.960	0.950	0.939	0.926	0.913	0.899	0.884	0.868	0.851	0.834	0.816
	γ_4	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	γ_5	0.960	0.950	0.939	0.926	0.913	0.899	0.884	0.868	0.851	0.834	0.816
	γ_6	0.851	0.816	0.780	0.743	0.707	0.673	0.641	0.615	0.595	0.582	0.577
	γ_7	0.780	0.816	0.851	0.884	0.913	0.938	0.960	0.977	0.990	0.997	1.000

对于三连接区块状拉剪破坏(图 3c),有

$$V_{w3} = kt f_u \sum_{i=1}^7 \gamma_i l_i \geq Q_1 \cos \varphi_1 + Q_2 + Q_3 \cos \varphi_2 \quad (5)$$

式中: V_{α} 为三连接区块状拉剪破坏承载力; 对于三连接区块状拉剪破坏, γ_i 的大小与三连接区相应杆件间夹角有关, 见表 1, 当 $i=1, 2, 3$ 时, 与夹角 φ_1 有关, 当 $i=5, 6, 7$ 时, 与夹角 φ_2 有关。

故节点板块状拉剪破坏承载力公式可以统一为

$$k t f_u \sum_{i=1}^m \gamma_i l_i \geq Q \quad (6)$$

$$\begin{cases} m = 3, Q = Q_1 & \text{单连接} \\ m = 5, Q = (Q_1 + Q_2) \cos \frac{\varphi_1}{2} & \text{双连接} \\ m = 7, Q = Q_1 \cos \varphi_1 + Q_2 + Q_3 \cos \varphi_2 & \text{三连接} \end{cases}$$

式中, Q 为等效螺栓群剪力代表值。

1.3 中心局部屈曲承载力

当螺栓群剪力过大、节点板厚度不足时, 铝合金板式节点的受压节点板的中心区域将会发生局部屈曲。图 5 显示了文献[3]中 A7 试件下节点板中心区的局部屈曲破坏。图 6 为 A7 试件下节点板中心区的荷载-应变曲线。荷载-应变曲线显示加载初期节点板未屈曲, 下节点板中心区变形刚度很大; 当荷载超过 7 kN 时, 下节点板中心区变形刚度迅速减小, 此时下节点板发生中心屈曲破坏。

文献[3]中表 1 显示, 对于下节点板发生中心区域局部屈曲破坏的节点试件, 6 根杆件所对应的螺栓群剪力相差不大, 故节点板中心区的局部屈曲承载力可近似按圆板受到面内均布压力问题进行分析。为考虑荷载不均匀以及中间开孔对节点板中心区局部屈曲承载力的影响, 本文定义中心局部屈曲承载

力修正系数 α , 其值可通过试验结果拟合得到。根据经典板壳理论^[5], 节点板发生中心区局部屈曲时, 其所受最小临界螺栓群剪力 V_{α} 可根据下式计算:

$$V_{\alpha} = \frac{14.68\alpha}{R_0} \frac{E t^3}{12(1-\nu^2)} \quad (7)$$

式中: R_0 为节点板中心域半径, 即节点板中点到最内排连接螺栓孔中心距离; E 为材料弹性模量; ν 为泊松比。

2 数值模拟

2.1 模型概况

采用 ABAQUS 软件对板式节点进行有限元数值模拟。铝合金型材及板材的本构关系采用 Ramberg-Osgood 模型及 Stein Hardt 建议^[6-7], 具体参数见文献[3]。模型中不锈钢螺栓的抗拉强度 f_u 采用拉伸试验数据, 为 725 MPa, 名义屈服强度取 470 MPa; 参考《紧固件机械性能》(GB 3098.6—2000)^[8], 不锈钢螺栓的弹性模量为 2.06×10^5 MPa。

为兼顾数值模拟研究的准确性和可行性, 将有限元模型进行简化: ①不考虑螺栓与螺栓空隙的影响; ②利用对称性建立半节点体模型; ③所有螺栓预紧力均相等。

有限元模型采用 C3D8R 单元, 各部件的相互联系通过接触对实现。通过参考点对杆件施加轴力和弯矩。在节点板断面上施加对称约束。有限元模型如图 7 所示。

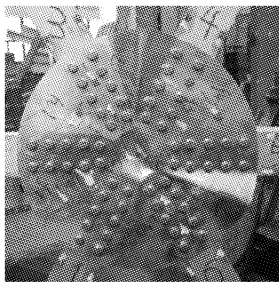


图 5 A7 试件中心区局部屈曲破坏模式

Fig. 5 Central local buckling model of plate in A7 specimen

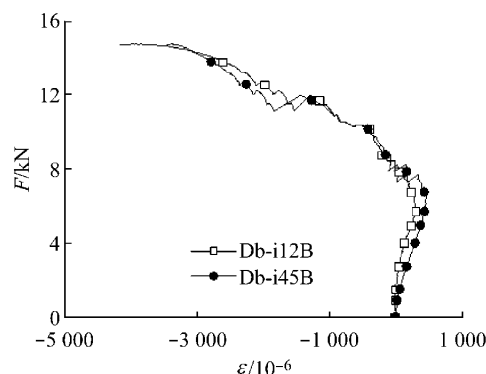


图 6 A7 试件中心区荷载-应变曲线
Fig. 6 Load-strain curves of plate central area in A7 specimen

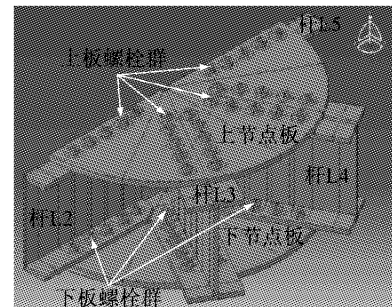


图 7 有限元模型

Fig. 7 Finite element model

2.2 数值模型验证

为验证数值模拟的准确性, 本文选取文献[3]中 A5 试件的尺寸为原型, 建立了与之相对应的板式节点有限元模型。表 2 给出数值和试验结果。与有限元

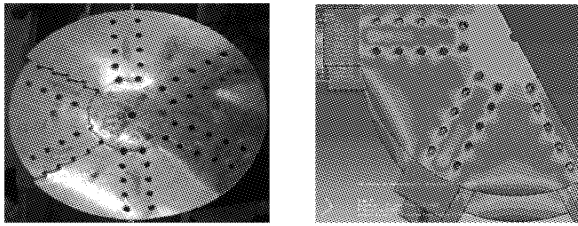
模型的极限抗弯承载力 M_{yef} 相比, 试验实测的极限抗弯承载力 M_{yex} 的误差 E_R 为 2.66%, 其主要原因可能在于, 试验安装过程中部分螺栓孔出现初始应力。图 8 为 A5 试件块状拉剪破坏图和其对应的有限

元结果应力云图的对比.图 8 中,数值模型上节点板各连接区内螺栓孔附近单元的 Mises 应力达到板材极限应力,其破坏模式为节点板的块状拉剪破坏,与试验结果一致.

表 2 节点抗弯承载力的数值和试验结果

Tab.2 Numerical and test results of bending capacity of A5 specimen

$M_{ytest}/(kN \cdot m)$	$M_{yex}/(kN \cdot m)$	E_R
3.188	2.341	26.6%



a 试验结果 b 有限元模型

图 8 A5 试件试验结果与有限元结果对比

Fig.8 Comparison between test and numerical results of A5 specimen

综上所述,有限元模型计算得到的节点板内力分布、破坏模式、抗弯承载力与试验结果吻合较好,有限元模型合理可靠.

3 参数 k, α 的确定

对试验结果进行统计分析,确定节点块状拉剪破坏公式中的系数 k 和中心局部屈曲公式中的系数 α .

3.1 参数 k 的确定

根据参数 k 的物理意义,将其定义为由薄膜力引起的轴向应力 σ_N 与节点板的总应力 σ 的比值.图 9 给出了部分试件块状拉剪破坏区域的荷载随参数 k 变化曲线.图 9 中,A4(1)和 A4(2)曲线分别代表 2 个块状拉剪区域的 k 值.表 3 给出了文献[3]中块状拉剪破坏试件在节点失效时的 k 值.设 k 值样本符合正态分布规律,则置信度为 0.95 的单侧置信下限 k 可表达为^[9]

$$k = k_a - t_{0.05}(n_k - 1)S / \sqrt{n_k} \quad (8)$$

式中: k_a 为样本 k 的平均值; n_k 为样本数量; S 为样本标准差; $t_{0.05}(n_k - 1)$ 为 t 分布的值,可查表得到.

根据表 3 中数据和式(8),求得 k 值为 0.59,文献[4]由于试验数据较少,故偏安全的建议 k 值为 0.5,本文提出的 k 值参数相对于文献[4]中的取值有所改进.

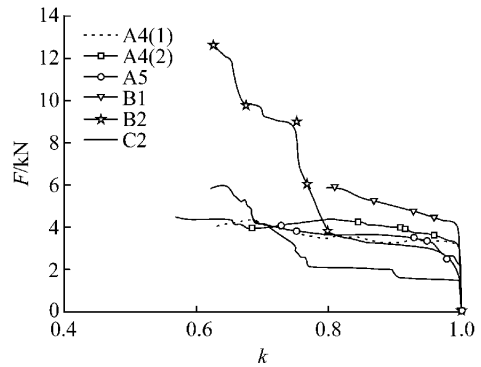


图 9 试件的荷载与参数 k 曲线

Fig.9 Load- k curves of specimens

表 3 参数 k 的试验值

Tab.3 k value of test results

A4(1)	A4(2)	A5	B1	B2	C2
0.625	0.683	0.566	0.795	0.621	0.625

3.2 参数 α 的确定

文献[3]中,A6,A7,B2 和 B3 节点试件的破坏模式为下节点板的中心区域发生局部屈曲.参考文献[3]和文献[10]可得到: $E=69\ 088\ MPa, \nu=0.3, R_0=45\ mm$.设下节点板中心区屈曲时所受到的最大螺栓群剪力为 Q_{umax} ,根据式(1)和式(7),可求得相应的中心区局部屈曲修正系数 α ,如表 4 所示.

表 4 参数 α 的试验值

Tab.4 α value of test results

节点	$Q_{umax}^{[3]}/kN$	t/mm	α
A6	24.89	2.25	1.059
A7	24.51	2.25	1.233
B2	28.99	2.25	1.043
B3	25.48	2.25	1.041

假设 α 值样本服从正态分布规律,则采用求解 k 的方法可以得到置信度为 0.95 的单侧置信下限 α 为 0.984.

4 结果比较

4.1 节点板块状拉剪破坏的比较

参考文献[3]节点试件的尺寸可得到参数如表 5 所示,材料的极限抗拉强度 f_u 为 213.58 Mpa.

根据表 5 和式(2)~(6)得节点板块状拉剪破坏承载力如下:

$$V = 0.59t f_u \sum_{i=1}^m \gamma_i l_i \geq Q \quad (9)$$

$$\begin{cases} m = 3, Q = Q_1 & \text{单连接} \\ m = 5, Q = (Q_1 + Q_2) \cos \frac{\varphi_1}{2} & \text{双连接} \\ m = 7, Q = Q_1 \cos \varphi_1 + Q_2 + Q_3 \cos \varphi_2 & \text{三连接} \end{cases}$$

节点板状拉剪破坏承载力的理论和试验值如表 6.

表 5 试件参数

参数	数值	参数	数值	参数	数值
k	0.59	φ_1	60°	φ_2	60°
单 l_1	65.75 mm	单 l_2	13.50 mm	单 l_3	65.75 mm
双 l_1	65.75 mm	双 l_2	13.50 mm	双 l_3	21.20 mm
双 l_4	13.50 mm	双 l_5	65.75 mm	三 l_1	65.75 mm
三 l_2	13.50 mm	三 l_3	21.20 mm	三 l_4	13.50 mm
三 l_5	21.20 mm	三 l_6	13.50 mm	三 l_7	65.75 mm

表 6 块状拉剪破坏承载力

连接区	节点	破坏区域 ^[3]	Q/kN	V/kN	E_R
单连接	C2	c2	26.87	25.45	5.3%
	A6	c4	27.04	25.45	5.9%
	A4	f45, f56	50.84	47.23	7.1%
	A5	f45	44.78	39.36	12.1%
	B1	f45	43.00	39.36	8.5%
双连接	B2	f45	47.46	39.36	17.1%
	C3	f56, f61	40.14	39.36	1.9%
	C4	f61	41.10	47.23	14.9%
	A4	f456	58.72	65.10	10.9%
三连接	C2	f612	52.56	54.25	3.2%

表 6 表明,和试验结果相比,式(9)求得的节点板单连接区块状拉剪破坏承载力的平均误差为 5.6%;式(9)求得的节点板双连接区块状拉剪破坏承载力的平均误差为 10.3%;式(9)求得的节点板三连接区块状拉剪破坏承载力的平均误差为 7.0%;总误差平均值为 8.7%.结果说明,采用式(9)计算铝合金板式节点块状拉剪破坏承载力安全可靠,并且准确.

4.2 节点板中心局部屈曲的比较

在铝合金板式节点试验中,试件 A6, A7, B2 和 B3 最终因下节点板中心区局部屈曲而失效.根据式(7)和 $\alpha=0.984$ 可求得节点试件下节点板中心区局部屈曲的临界螺栓群剪力 V_{cr} ,其值如表 7 所示.与试验测得的最大螺栓群剪力 Q_{umax} 相比,结合式(1)和式(7)求得的临界螺栓群剪力 V_{cr} 的平均误差为 9.6%,在 10%以内,并且 V_{cr} 一直小于 Q_{umax} ,说明采用式(7)计算铝合金板式节点中心局部屈曲承载力安全可靠,并且准确.

表 7 中心区局部屈曲承载力

节点	Q_{umax} ^[3] /kN	V_{cr} /kN	E_R
A6	24.89	23.13	7.1%
A7	24.51	23.13	5.6%
B2	28.99	23.13	20.2%
B3	25.48	23.13	5.5%

5 板式节点的实用构造要求

5.1 防止节点板状拉剪破坏的构造

在实际工程设计中可以通过限制螺栓孔最小间距的构造要求来防止节点板状拉剪破坏.假设节点的每根杆件所受的弯矩和轴力都相同,并且每根杆件间夹角为 60° ,则为防止节点板状拉剪破坏,其抗剪承载力应大于螺栓的孔壁承压承载力.结合式(2)至式(6)和 $k=0.59$ 可得

$$0.59t f_u L \geq 1.16 f_u n t d \quad (10)$$

$$L = \min \left\{ \sum_{i=1}^3 \gamma_i l_i, 0.58 \sum_{i=1}^5 \gamma_i l_i, 0.5 \sum_{i=1}^7 \gamma_i l_i \right\} \quad (11)$$

式中: $1.16 f_u$ 为铝合金材料孔壁承压强度^[10]; n 为单根杆件一侧翼缘螺栓孔数量; d 为螺栓直径.

假设忽略螺栓孔径 d_0 与螺栓直径 d 的差异,并且螺栓孔间最小孔距为 x ,螺栓孔距外边缘的距离采用最小间距为 $2d_0$ ^[10],则式(10)可以简化为

$$x \geq \frac{4.097n - 0.707}{0.707n + 1.414} d_0 \quad (12)$$

参考文献[3]中节点设计参数,取 n 为 10,每根杆件间夹角为 60° ,则为根据式(12),得到防止节点板状拉剪破坏的螺栓孔间距至少为 $4.73d_0$.实际工程中,通常孔距取为 $2.5d_0$,因此,通常需要验算块状拉剪破坏承载力.

5.2 防止节点板中心区局部屈曲的构造

在实际工程设计中可以通过限制节点板宽厚比的构造要求来防止局部屈曲破坏.为防止先出现节点板中心区局部屈曲破坏,其临界压应力 σ_{cr} 应大于板材的孔壁承压强度,故结合式(7)和 $\alpha=0.984$ 可得:

$$\sigma_{cr} = \frac{14.45}{R_0^2} \frac{Et^2}{12(1-\nu^2)} \geq 1.16 f_u \quad (13)$$

对于常用的 6061-T6 铝合金,取 $f_{0.2} = 240$ MPa, $f_u = 260$ MPa, $E = 70\,000$ MPa^[10],则式(13)可以改为

$$\frac{R_0}{t} \leq 17 \sqrt{\frac{240}{f_{0.2}}} \quad (14)$$

根据式(14), $R_0/t < 17$ 时,节点板可避免发生中心区局部屈曲.实际工程中, R_0/t 通常取 10 左右,因此,通常不需要验算节点板中心区局部屈曲承载力.

6 结论

对铝合金板式节点承载力进行了理论分析,推

导出在弯矩和轴力共同作用下节点板的块状拉剪承载力公式和中心区域局部屈曲公式. 在文献[3]的基础上利用 ABAQUS 软件对板式节点进行数值模拟分析. 通过文献[3]的试验实测结果与相应的有限元模型分析结果的对比, 验证了有限元分析的准确性和试验结果的有效性. 根据试验研究结果, 采用统计学原理确定了承载力折减系数 k 和中心局部屈曲修正系数 α 分别约为 0.590 和 0.984. 试验结果和承载力公式的比较结果显示, 承载力公式安全可靠, 并且较为准确. 最后提出了防止节点板块状拉剪破坏和中心区局部屈曲的构造要求, 并通过试验结果验证了构造要求的正确性.

参考文献:

- [1] 沈祖炎, 郭小农, 李元齐. 铝合金结构研究现状综述[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] 钱基宏, 赵鹏飞, 郝成新, 等. 大跨度铝合金穹顶网壳结构的研究[J]. 建筑科学, 2000, 16(5):7.
QIAN Jihong, ZHAO Pengfei, HAO Chengxin, et al. Development study on large span aluminum alloy dome structure[J]. Building Science, 2000, 16(5):7.
- [3] 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 the load-bearing behavior of aluminum alloy gusset joint[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2014, 42(7): 1024.
- [4] 郭小农, 邱丽秋, 罗永峰, 等. 铝合金板式节点受弯承载力试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 11(4): 47.
GUO Xiaonong, QIU Liqiu, LUO Yongfeng, et al. Experimental research on the bending capacity of aluminum alloy gusset joints [J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2014, 11(4): 47.
- [5] 何福保, 沈亚鹏. 板壳理论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1993.
HE Fubao, SHEN Yapeng. Theory of plates and shells[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1993.
- [6] Mazzolani F M. Aluminum alloy structures [M]. 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1995.
- [7] 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.
- [8] 国家质量技术监督局. GB/T3098, 6—2000 紧固件机械性能 不锈钢螺栓、螺钉和螺柱[S]. 北京: 中国标准出版社出版, 2001.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T3098, 6—2000 Mechanical properties of fasteners-bolts, screws and studs made of stainless-steel [S]. Beijing: Standards Press of China, 2001.
- [9] 印凡成, 夏乐天. 概率论与数理统计[M]. 南京: 河海大学出版社, 2004.
YING Fancheng, XIA Letian. Probability theory and mathematical statistics[M]. Nanjing: Hohai University Press, 2004.
- [10] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB50429—2007 铝合金结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
Construction Ministry of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB50429—2007 Code for design of aluminum structures[S]. Beijing: China Planning Press, 2008.
- [11] 郝淑敏, 罗健, 刘玉猛. 再生混凝土双向板抗冲切性能试验研究[J]. 工程建设与设计, 2013(10):43.
HAO Shumin, LUO Jian, LIU Yumeng. Research on the punching resistance of recycled concrete two-way slabs [J]. Construction & Design for Project, 2013(10):43.
- [12] 蒋凤昌, 周桂香. 包容型再生混凝土板冲切承载力试验及计算方法[J]. 混凝土, 2013(8):55.
JIANG Fengchang, ZHOU Guixiang. Experiment and calculation method on punching shear loading capacity of waste block contained recycled concrete slab[J]. Journal of Concrete, 2013(8):55.
- [13] 林旭健, 郑作樵, 钱在兹. 钢纤维高强混凝土冲切板的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(5):73.
LIN Xujian, ZHENG Zuoqiao, QIAN Zaizi. Experimental study on steel fiber reinforced concrete punching plate[J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(5):73.
- [14] 周克荣. 冲切的全过程、工作机理和承载力研究[D]. 上海: 同济大学, 1990.
ZHOU Kerong. The process, working mechanics and carry capacity research of punching [D]. Shanghai: Tongji University, 1990.
- [15] 林旭健. 钢纤维高强混凝土板抗冲切受力性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1999.
LIN Xujian. Research on SFHSC slab's punching performance [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1999.

(上接第 46 页)