

顶底角型件高强螺栓 连接铝合金梁柱节点有限元分析

陈培旭, 张铮, 冯若若

(福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 以顶底角型件高强螺栓连接铝合金梁柱节点为研究对象, 利用有限元软件建立数值模型, 并根据试验实测数据验证了有限元的准确性。探讨了轴压比、节点域厚度和顶底角型件厚度对节点力学性能的影响。对算例计算所得弯矩-转角曲线进行分析, 拟合回归了三参数模型中形状系数的近似解析公式。结果表明, 节点在合适的轴压比、节点域厚度和顶底角型件厚度下能表现出良好的抗震性能。提出的形状系数近似计算公式较为准确可靠, 可为实际工程的连接设计方法提供理论依据。

关键词: 铝合金; 梁柱节点; 有限元分析; 弯矩-转角曲线; 形状系数

中图分类号: TU323.5

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2021)03-0268-07

Finite element analysis of aluminum alloy beam-column nodes connected by top-bottom corner-piece high-strength bolts

CHEN Peixu, ZHANG Zheng, FENG Ruoruo

(School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: With the top-bottom corner-piece high-strength bolts to connect the aluminum alloy beam-column nodes as the research object, a numerical model was established with the finite element software, and the accuracy of the finite element was verified according to the experimental data. The effects of axial compression ratio, thickness of joint domain and thickness of the top and bottom corner-piece on the mechanical properties of the joints were discussed. The bending moment-rotation curve calculated by the calculation example was further analyzed, and the approximate analytical formula of the shape coefficient in the three-parameter model was fitted and regressed. Results show that the joints can exhibit good seismic performance under appropriate axial compression ratio, joint domain thickness and top-bottom corner section thickness. The proposed approximate calculation formula for the shape coefficient is more accurate and reliable, and provides a theoretical basis for the actual engineering connection design method.

Keywords: aluminum alloy; beam-column nodes; finite element analysis; bending moment-rotation curve; shape coefficient

铝合金框架在房屋建筑中的应用愈加广泛, 节点是框架结构主要受力枢纽, 可靠的节点设计对结构的适用性和安全性起着重要作用。对于铝合金框架梁柱节点, 规范规定除不锈钢以外, 铝合

金不宜与其他材料直接接触^[1], 不锈钢材料更适合做节点的连接件, 且焊接热输入会显著降低铝合金母材强度^[2-3], 检查和修复较为复杂^[4], 因此工程多采用机械连接, 国内学者对铝合金机械连

收稿日期: 2021-04-08

基金项目: 建设部国家标准《铝合金结构技术标准》编制项目(建标[2016]248号); 福建工程学院科研发展基金(GY-Z17159)

第一作者简介: 陈培旭(1995—), 男, 福建泉州人, 硕士研究生, 研究方向: 钢结构。

通信作者: 张铮(1978—), 男, 河南焦作人, 教授, 博士, 研究方向: 钢结构和新型结构体系。

接梁柱节点性能开展了研究^[5-6],但其力学性能研究仍不充分。高强螺栓连接是机械式连接的主要方式,能提高铝合金结构节点的刚度,可改善节点由于半刚性带来的承载力低问题^[7],应用潜力大。

参考钢框架半刚性连接节点形式,结合铝合金结构在工程中的应用和优势,选用节点刚度较大的带双腹板角型件顶底加肋角型件连接铝合金梁柱节点进行研究,铝合金梁、柱和不锈钢角型件通过高强螺栓实现机械连接。通过对比有限元计算结果和试验数据,验证了有限元方法的准确性,探讨了轴压化、节点域厚度和顶底角型件厚度对节点力学性能的影响规律,根据典型算例的弯矩-转角曲线计算结果,拟合回归三参数模型中形状系数的近似解析公式,可为铝合金框架的研究提供依据。

1 有限元分析

1.1 本构模型

梁柱采用 6061-T6 铝合金材料,双腹板及顶底带肋角型件采用 S304 不锈钢。铝合金的应力-应变曲线具有非线性和连续性的特点,经研究,由 Ramberg-Osgood 模型得到的曲线与铝合金材料性实测数据基本一致,可用 Ramberg-Osgood 模型表述铝合金 6061-T6 的本构^[8-9],其本构模型如式(1)所示,Steinhardt^[10]建议了公式中参数 n 值的取值方式(即 $n = f_{0.2}/10$)。不锈钢的应力-应变曲线公式参考不锈钢结构技术规程^[11],高强螺栓本构参照文献^[12]中的三折线模型,相应的材料参数均取规范的标准值。

$$\varepsilon = \sigma/E + 0.002 (\sigma/f_{0.2})^n \quad (1)$$

式中: ε 为应变; σ 为应力(MPa); E 为弹性模量(MPa); $f_{0.2}$ 为名义屈服强度(MPa); n 为应变硬化参数。

1.2 有限元模型

梁柱截面尺寸分别为 280 mm×100 mm×6 mm×8 mm 和 150 mm×150 mm×7 mm×10 mm,梁长 1 050 mm,柱长 1 900 mm,采用 8.8 级 M12 高强螺栓,节点构造示意图如图 1。利用 Abaqus 有限元软件建立铝合金梁柱节点模型,梁、柱、角型件和螺栓均采用 C3D8R 实体单元,以螺栓荷载的方式施加预紧力至 48.5 kN^[13]。为准确模拟节点受力全过程,板件与板件间采用摩擦系数为 0.2^[5]的切向库伦摩擦接触,螺杆与孔壁间采用法向

“硬接触”,较好地模拟出板件错动前的板件摩擦以及板件错动后的孔壁挤压。柱两端边界设为铰接,不能发生平动,只允许绕柱强轴转动,梁加载端约束面外平动位移,节点以每级 4 mm 的位移增量进行加载。

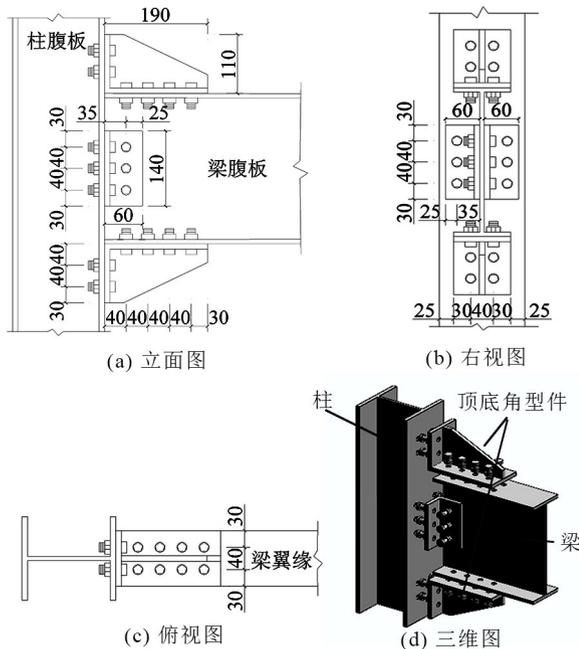


图 1 节点构造示意图(单位:mm)

Fig.1 Node structure diagram (unit: mm)

2 有限元结果与试验对比

将有限元计算结果与文献^[5]试验数据进行对比。如图 2 所示,有限元在梁翼缘第一排螺栓处应力集中,与文献^[5]节点在该位置发生断裂的破坏模式较为一致。有限元结果中,节点各部件受拉、受压区的 Mises 应力接近或刚达到材料的极限强度,出现局部塑性屈服区域,判定节点发生破坏。

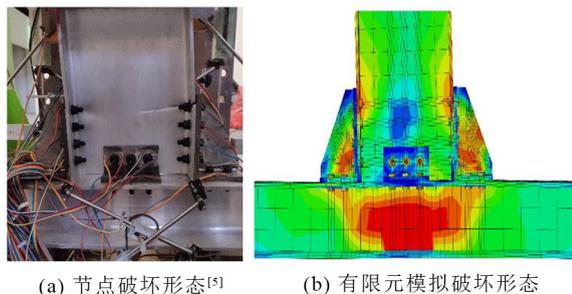


图 2 节点实际破坏形态和有限元模拟破坏比较

Fig.2 Comparison of actual failure mode and finite element simulation of the node

节点荷载-位移曲线的有限元模拟和试验对比见图 3, 每级荷载循环下两者滞回环的形状大致相同, 对比正负向加载的极限承载力, 正向和负向差值分别为 3.6% 和 6.3%, 两曲线吻合程度较好。根据以上对比分析, 有限元计算结果与试验实测数据吻合良好, 验证了有限元模型及分析方法的准确性, 可进行相应的分析计算。

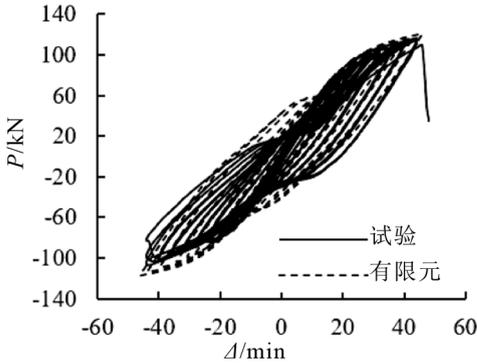


图 3 荷载-位移曲线对比

Fig.3 Load-displacement curve comparison

3 参数分析

3.1 轴压比对节点力学性能影响

考虑了柱端轴压比分别为 0、0.2、0.4 和 0.6

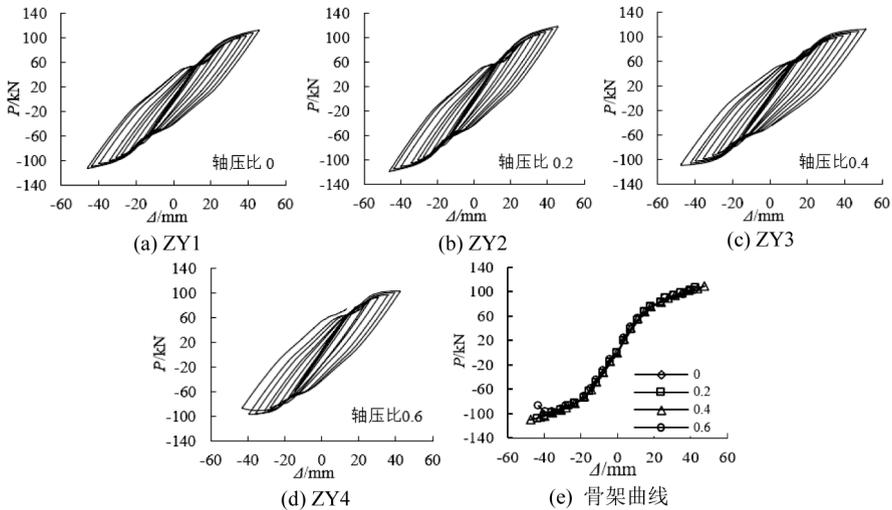


图 4 不同轴压比的滞回曲线及骨架曲线汇总

Fig.4 Hysteresis curve and skeleton curve with different axial load ratios

3.2 节点域厚度对节点力学性能影响

建立了节点域厚度分别为 3、5、7 和 9 mm 的 4 个模型, 节点域是指柱腹板在梁高范围内的区域, 有限元计算及分析结果如图 5 和表 2 所示。节点极限承载力和初始刚度随着节点域厚度的增

的 4 个模型, 不同轴压比下滞回曲线及骨架曲线如图 4 所示, 分析结果如表 1, K_c 为节点初始刚度, F_{max} 为极限承载力, E 为累积耗能。节点的初始连接刚度和累积耗能随着柱端轴压比的增加而增大, 极限承载力随轴压比的增大呈先升后降的趋势。ZY2、ZY3 和 ZY4 相对 ZY1 来说, 节点初始刚度增幅分别为 6.5%、13.0% 和 17.3%, 初始刚度在轴压比 0.4 前增大, 速率较快, 在轴压比 0.4 之后增加变缓, 节点累积耗能增幅分别为 5.3%、9.2% 和 16.4%, 可见节点初始刚度和累积耗能随轴压比的增加略有增大。节点极限承载力在轴压比为 0.2 时, 达到了最大值, 最大值和最小值相差 4.2%, 承载力随轴压比的增大, 变化并不明显。

表 1 不同轴压比的计算结果

Tab.1 Calculation results of different axial compression ratios

算例编号	轴压比	$K_c /$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	$F_{max} /$ kN	$\Sigma E /$ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)
ZY1	0.0	4 623	102.6	15.2
ZY2	0.2	4 896	104.9	16.0
ZY3	0.4	5 203	102.6	16.6
ZY4	0.6	5 388	100.6	17.7

加而增大, 累积耗能随节点域厚度增大呈逐渐下降的趋势。JD2、JD3 和 JD4 相对 JD1, 节点极限承载力分别提高了 43.9%、78.8% 和 81.6%, 极限承载力在节点域厚度 3~7 mm 内增加的速率快, 在厚度 7 mm 后, 节点承载力增长趋于稳定, 上升

较平缓。节点初始刚度的增幅分别为 17.1%、37.1%和 42.9%，节点域厚度在 7 mm 之前，初始刚度的增幅明显，节点域厚度在 7 mm 后，提供的初始刚度贡献并没有那么突出。累积耗能分别减小了 5.18%、17.1%和 21.2%，相同位移荷载下，节点域的厚度越大，节点的累积耗能能力越弱，累积耗能在节点域厚度 7 mm 后，下降缓慢。节点域

厚度小时，试件变形主要集中在节点域，节点的塑性变形能力强。随着节点域厚度的增加，节点塑性变形能力主要由梁来提供并逐渐下降，节点累积耗能随着节点域厚度的增加而下降，并最终趋于稳定。节点在不同节点域厚度下表现出的抗震性能不同，在进行节点设计时，需选用合理的节点域厚度。

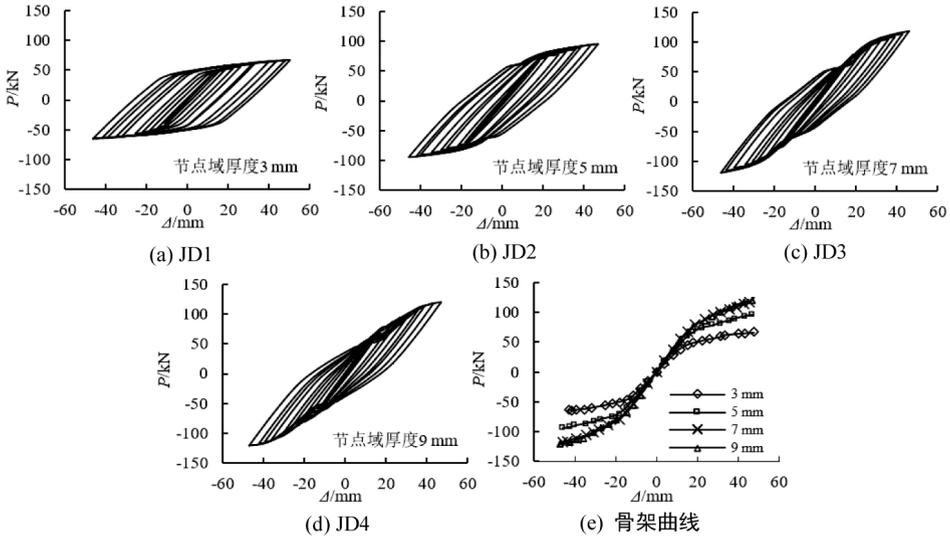


图 5 不同节点域厚度的滞回曲线及骨架曲线汇总

Fig.5 Hysteresis curve and skeleton curve with different node domain thicknesses

表 2 不同节点域厚度的计算结果

Tab.2 Calculation results of different node domain thicknesses

算例编号	节点域厚度/mm	$K_c / (kN \cdot m^{-1})$	F_{max} / kN	$\Sigma E / (kN \cdot m)$
JD1	3	3 512	66.9	19.3
JD2	5	4 102	96.3	18.3
JD3	7	4 795	119.6	16.0
JD4	9	5 021	121.5	15.2

3.3 顶底角型件厚度对节点力学性能影响

以顶底角型件厚度为 6、8、9 和 10 mm 建立了 4 个模型，各节点有限元结果如图 6 和表 3 所示。随着顶底角型件厚度的增大，节点的初始刚度和极限承载力也逐渐增加。LJ2、LJ3 和 LJ4 相对 LJ1，节点初始刚度分别提高了 6.8%、9.1%和 11.4%，初始刚度在顶底角型件厚度 8 mm 后，增加的速率趋于平缓。节点极限承载力的增幅分别

为 25.2%、30.9%和 35.1%，可见角型件厚度在 8 mm 后，对节点极限承载力提供的贡献有限。各顶底角型件厚度下，节点的累积耗能相差不大，最大值和最小值相差 3.2%。分析可知，顶底角型件在超过一定厚度时对节点极限承载力和初始刚度的提高并不大，在设计时亦应采用合适的顶底角型件厚度。

表 3 不同角型件厚度的计算结果

Tab.3 Calculation results of different corner-piece thicknesses

算例编号	角型件厚度/mm	$K_c / (kN \cdot m^{-1})$	F_{max} / kN	$\Sigma E / (kN \cdot m)$
LJ1	6	4 416	86.5	15.8
LJ2	8	4 689	108.3	16.3
LJ3	9	4 815	113.2	16.0
LJ4	10	4 934	117.0	16.1

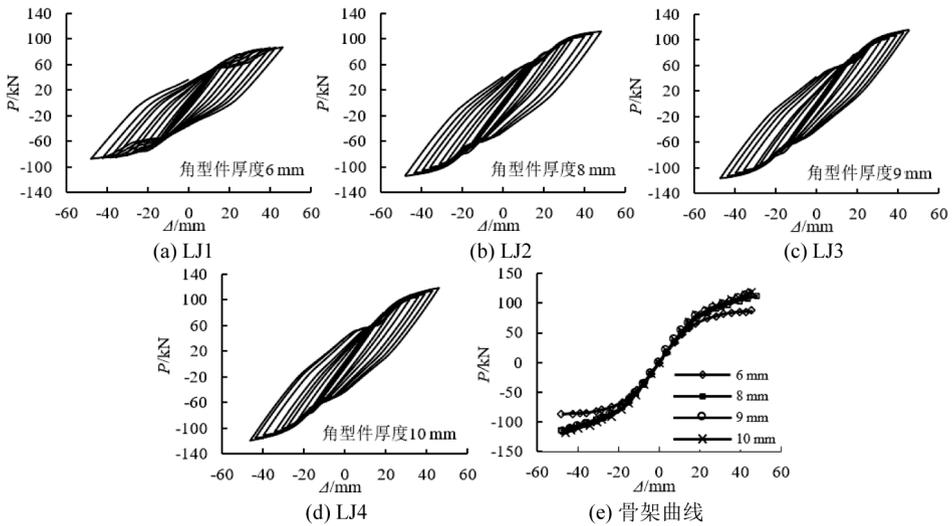


图 6 不同顶底角型件厚度下滞回曲线及骨架曲线汇总

Fig.6 Hysteresis curve and skeleton curve under different part thicknesses

3.4 形状系数

为将节点的柔性考虑到框架结构设计中,可将获得的半刚性连接节点弯矩-转角曲线引入相关设计软件,便能对框架结构进行设计。此时,提出一个可靠的弯矩-转角曲线作为相应的设计依据。本文选用三参数模型对节点进行研究。三参数模型^[14]具体方程如式(2)。

$$M = \frac{R_i \theta}{[1 + (\theta/\theta_0)^n]^{\frac{1}{n}}} \quad (2)$$

式中: R_i 和 M_u 分别为节点初始刚度 ($\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$) 和极限弯矩 ($\text{kN} \cdot \text{m}$); θ_0 为参考塑性转角, $\theta_0 = M_u/R_i$; n 为形状系数,根据 $M - \theta$ 曲线拟合得到。

考虑了柱翼缘厚度 t_{cf} 、柱腹板厚度 t_{cw} 、梁截面高度 h_b 、顶底角型件厚度 h_j 、顶底角型件长度 l 、柱翼缘连接螺栓中心至梁上翼缘的距离 g_e 、顶角型件与柱上翼缘连接处螺栓的中心距 g_t 、螺栓直径 d 、顶角型件与梁上翼缘连接处螺栓的端距 p_e 、顶角型件与梁上翼缘连接处螺栓的中心距 p_t 、顶角型件与柱翼缘连接处的螺栓中心距 p 、顶角型件与梁上翼缘连接处螺栓的中心距 s 以及轴压比 μ 相应因素。建立了 36 个有限元模型算例,以算例 1 为基准,其余算例由算例 1 转变得到,各影响因素的含义如图 7 所示。算例 1 中,梁、柱均采用 H 形截面,截面尺寸分别为 $280 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 和 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,

角型件截面为 $190 \text{ mm} \times 110 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$,螺栓端距 p_e 和 g_e 均为 40 mm ,螺栓间距 p_t 和 g_t 均为 40 mm ,螺栓直径 12 mm ,螺栓间距 s 和 p 分别取 40 mm 和 60 mm ,轴压比 μ 为 0.4 。

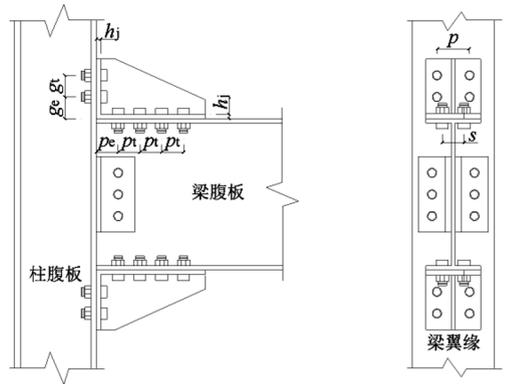


图 7 影响因素含义示意图

Fig.7 Schematic diagram of the implications of influencing factors

算例 2~4 柱翼缘厚度 t_{cf} 取值在 $8 \sim 14 \text{ mm}$,算例 5~7 梁高度 h_b 取值在 $220 \sim 260 \text{ mm}$,算例 8~10 柱腹板厚度 t_{cw} 取值在 $5 \sim 11 \text{ mm}$,其余 26 个节点算例的角型件厚度 h_j 取值 $6 \sim 10 \text{ mm}$,角型件长度 l 取值 $100 \sim 150 \text{ mm}$,螺栓端距 p_e 和 g_e 取 $30 \sim 60 \text{ mm}$,螺栓间距 p_t 和 g_t 分别取 $35 \sim 50 \text{ mm}$ 和 $30 \sim 60 \text{ mm}$,螺栓直径 d 取 $14 \sim 18 \text{ mm}$,螺栓间距 s 和 p 取 60 mm 和 40 mm ,轴压比 μ 取 $0.2 \sim 0.8$ 。

对以上 36 个典型算例进行数值计算分析,根据计算得到的弯矩-转角曲线,结合节点初始刚度及极限弯矩值,基于弯矩-转角曲线的三参数

模型,通过数值分析的方法对各个算例的形状系数 n 进行拟合,表 4 汇总了各算例初始刚度、极限弯矩和形状系数拟合值。

表 4 各算例的初始刚度、极限弯矩和形状系数

Tab.4 Summary of initial stiffness, ultimate bending moment and shape coefficient

算例编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
初始刚度/(kN·m·rad ⁻¹)	4 005	3 109	4 271	4 487	3 785	4 188	4 334	3 948	4 053	4 340	2 948	3 007
极限弯矩/(kN·m)	83.1	78.2	94.5	98.6	82.3	85.0	86.3	70.5	86.6	88.2	69.3	75.2
形状系数	3.26	3.84	2.84	2.67	3.01	2.97	2.84	2.44	3.18	2.89	3.42	3.96
算例编号	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
初始刚度/(kN·m·rad ⁻¹)	3 657	4 019	4 019	4 020	3 954	4 066	4 128	3 922	4 092	4 182	4 011	4 010
极限弯矩/(kN·m)	78.5	86	86.5	86.9	84.0	84.4	85.1	85.2	86.0	86.2	83.2	84.0
形状系数	3.47	3.01	3.00	3.00	3.13	2.99	2.91	2.96	2.86	2.84	2.94	3.23
算例编号	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
初始刚度/(kN·m·rad ⁻¹)	4 077	4 002	4 017	4 025	4 016	4 022	4 038	3 981	3 916	4 184	4 012	3 809
极限弯矩/(kN·m)	84.1	83.0	84.2	85.3	87.1	87.3	88.8	84.8	86.9	70.2	81.2	75.5
形状系数	3.36	3.12	3.20	3.05	3.26	3.24	3.08	3.07	3.46	2.76	3.12	3.55

节点基于三参数模型弯矩-转角曲线的形状系数 n 值与极限弯矩 M_u 和初始刚度 R_i 的比值有关,定义 $\theta_0 = M_u/R_i$,其中 θ_0 为参考塑性转角。将以上 36 个算例形状系数拟合值与参考塑性转角 θ_0 值进行整理汇总,如图 8 所示。形状系数 n 呈带状分布,对形状系数 n 进行线性回归处理,图 8 中的直线为 36 个节点算例回归得到的 $M-\theta$ 曲线形状系数 n 的近似解,对应的方程如式(3)所示。

$$n = 157.2\theta_0 - 0.19 \quad (3)$$

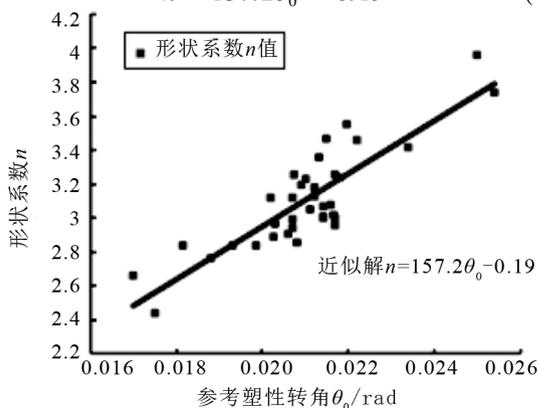


图 8 形状系数 n 散点分布图及近似解

Fig.8 Scatter point distribution diagram of shape coefficient n and its approximate solution

为验证铝合金梁柱节点弯矩-转角曲线形状系数 n 近似解析公式的准确性,比较了各算例有限元精确计算的弯矩-转角曲线与基于形状系数近似解 n 值的弯矩-转角曲线。因篇幅限制,图 9 给出了前 7 个算例的弯矩-转角曲线对比。可见,各算例基于三参数模型得到的近似弯矩-转角曲线与有限元精确计算结果吻合良好,基于三参数模型提出的形状系数 n 近似解析公式较为可靠、准确。

4 结论

1)随着轴压比的增大,节点极限承载力基本无变化,节点初始刚度和累积耗能逐渐增大,轴压比 0.6 时的初始刚度和累积耗能比无轴力时分别增加 17.3%和 16.4%。

2)随着节点域厚度和顶底角型件厚度的增大,节点初始刚度和极限承载力逐渐增加。节点域和顶底角型件在达到一定厚度后,节点初始刚度和极限承载力增加较为有限。节点累积耗能随节点域厚度的增加而下降,而角型件厚度对累积耗能的影响不大,节点在设计时需选择合理的节点域厚度和角型件厚度。

3) 根据三参数模型及算例计算结果拟合回归得到的形状系数近似解析公式, 较为准确可靠, 可为今后工程提供依据和参考。

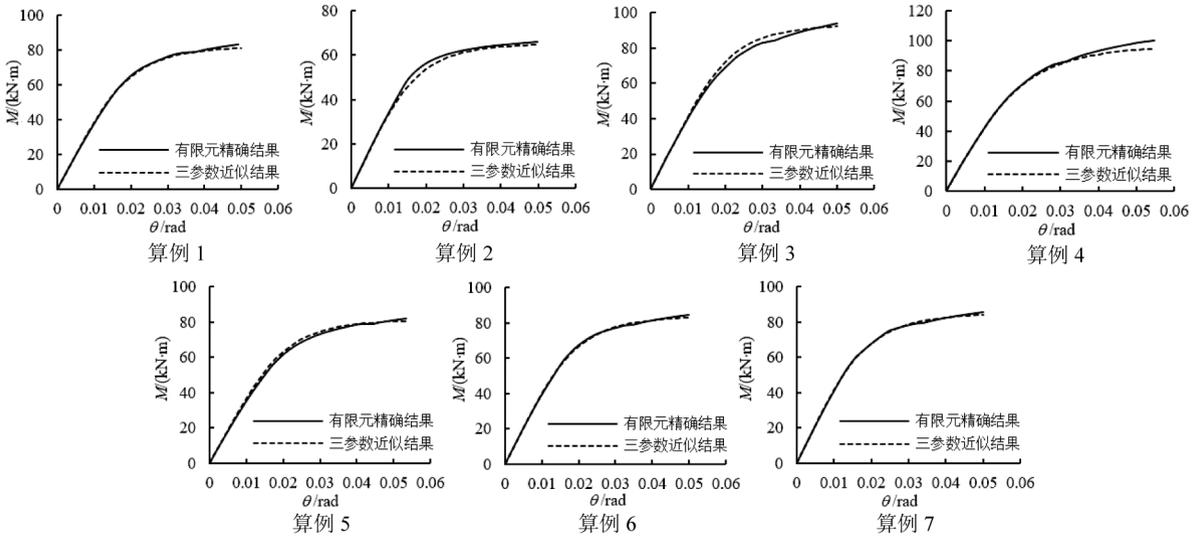


图 9 有限元精确计算与三参数模型近似 $M-\theta$ 曲线比较

Fig.9 Comparison between finite element calculation and approximate $M-\theta$ curve

参考文献:

- [1] 中华人民共和国建设部. 铝合金结构设计规范: GB 50429—2007[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- [2] 李静斌, 张其林, 丁洁民. 铝合金焊接节点力学性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(2): 25-32.
- [3] 吴芸, 张其林. 纵向焊接铝合金构件的试验和设计研究[J]. 建筑钢结构进展, 2008, 10(1): 29-33, 62.
- [4] 程明, 石永久, 王元清. 铝合金结构的连接及其设计方法[J]. 建筑科学, 2006, 22(3): 85-88, 69.
- [5] WANG Z X, WANG Y Q, ZHANG Y, et al. Experimental investigation on the behaviour of aluminium alloy beam-to-column joints connected by swage-locking pins[J]. Engineering Structures, 2020, 213: 110578.
- [6] 廖仁生. 铝合金框架全螺栓连接梁柱节点受力性能研究[D]. 福州: 福建工程学院, 2020.
- [7] 黄伟宝, 彭洋, 董军. 铝合金结构高强螺栓摩擦型连接研究[C]//中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会第16届(ISSF-2018)学术交流会暨教学研讨会论文集, 2018: 340-346.
- [8] 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): 110-117.
- [9] 张铮. 铝合金结构压弯构件稳定承载力研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [10] Steinhardt O. Construction in civil engineering[J]. Aluminum, 1971, 47: 31-39; 254-261.
- [11] 中华人民共和国工业和信息化部. 不锈钢结构技术规范: CECS 410—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [12] 王修军, 王燕, 安琦. 装配式梁柱外环板高强螺栓连接节点抗弯承载力及节点刚度研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(S2): 75-82.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构高强度螺栓连接技术规程: JGJ 82—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [14] RICHARD R M, ABBOTT B J. Versatile elastic-plastic stress-strain formula[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1975, 101(4): 511-515.

(责任编辑: 陈雯)