

圆钢管柱-H 型钢梁外加强环式节点性能有限元分析

隋伟宁, 时庆泽

(沈阳建筑大学 土木工程学院, 沈阳 110168)

摘要:应用有限元软件 ABAQUS 建立了 7 组圆钢管柱-H 型钢梁外加强环式节点分析模型, 建立了包含梁翼缘宽度和厚度、梁腹板厚度和高度、圆钢管柱壁厚、外环板宽度、轴压比等参数的节点承载力和刚度评价公式。利用 OpenSees 软件模拟一组试验试件, 试验试件中的节点参数选用已有的承载力和刚度评价公式, 通过分析结果与试验结果的对比, 验证了节点评价公式的正确性以及节点建模的可行性, 该方法可以应用到钢框架节点设计研究中。

关键词:钢结构; 有限元分析; ABAQUS; OpenSees; 承载力评价公式

中图分类号: TU398.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)S1-0028-07

The finite element analysis of the joints of circular hollow section column and H-shaped beams

Sui Weining, Shi Qingze

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, P. R. China)

Abstract: Seven of circular hollow section column and H-shaped beams analysis models were established by ABAQUS. The main parameters include the beam flange thickness and width, the beam web thickness and height, the column thickness, the external diaphragm width and the thickness. The influence of the main parameters on the bearing capacity and the stiffness had been investigated. OpenSees program also been used in this paper to compare with the test results using the evaluating formula come from the finite element analysis results.

Key words: steel structure; finite element analysis; ABAQUS; OpenSees; evaluation formula of bearing capacity

圆钢管柱-H 型钢梁外加强环式节点已被广泛应用到钢框架中^[1], 圆钢管柱-H 型钢梁的外加强环式节点性能影响钢框架的抗震性能, 是目前国内外学者研究的重点。在实际钢框架工程中柱与梁的连接是介于刚性连接与铰接的半刚性连接^[2], 半刚性连接能承受一定的弯矩, 又能发生一定的转动。由于现有规范^[3-5]没有给出圆钢管柱-H 型钢梁外加强环式节点抗弯性能与节点域的抗剪性能, 在实

际应用中带来许多不便。本文通过有限元数值分析方法研究节点的弯矩-转角^[6]关系与节点域的剪力-剪切角关系, 为该类节点在工程实际中的应用奠定理论基础。

1 有限元模型建立

在 ABAQUS 有限元软件中建立模型, 模型中所有单元均采用完全积分的四边形壳单元 S4R, 材

收稿日期: 2015-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(51108278); 辽宁省教育厅项目(LJQ2013063)

作者简介: 隋伟宁(1979-), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事钢结构抗震性能研究, (E-mail) swnwzf19790627@hotmail.com.

料均采用 Q235,弹性模量 206 GPa,屈服应力为 235 MPa,泊松比取 0.3。所建立的经典模型^[7]是在已有实验和有限元模拟的基础上建立圆钢管柱-H型钢梁外加强环式半刚性节点^[8],得到其在静力荷载作用下的力学性能、破坏模式、节点域抗剪承载力、节点抗弯承载力,并加以分析^[9]。通过研究分析各个参数^[10]对圆钢管柱-H型钢梁外环板连接的半刚性节点性能^[11]的影响,得到半刚性节点的抗弯承载力以及抗剪承载力表达式。为研究单参数对圆钢管柱-H型钢梁外环板^[12]连接半刚性节点的影响,首先建立一个经典模型,根据经典模型调整参数。本文选取 10 个参数,其中圆钢管柱的直径 $D=400$ mm,圆钢管柱的长度 $H=1\ 350$ mm,梁的长度 $L=1\ 600$ mm,保持不变;7 个可变参数(圆钢管柱壁厚 t_c ,梁翼缘宽度 b_f ,梁翼缘厚度 t_f ,梁腹板厚度 t_w ,梁腹板高度 h_f ,外环板宽度 h_s ,轴压比 n)变化范围如表 1 所示。

表 1 模型参数变化

模型参数变化范围/mm						
t_c	b_f	$t_s(t_f)$	t_w	h_f	h_s	n
6~14	140~240	6~22	6~22	180~300	25~150	0.1~0.9

有限元模型与边界条件如图 1 所示,加载方式为反对称加载。

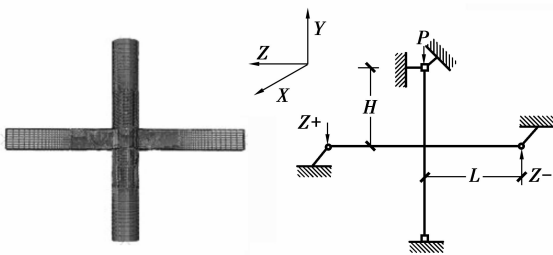


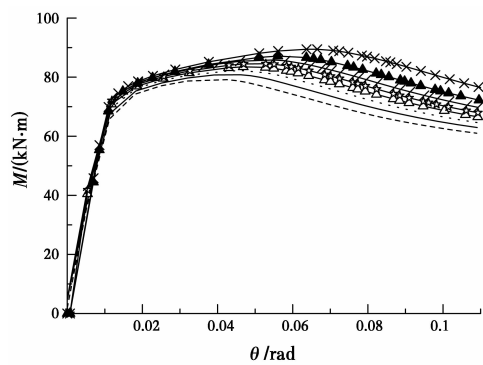
图 1 有限元模型以及边界条件

2 各参数对节点抗弯承载力与节点域抗剪承载力的影响

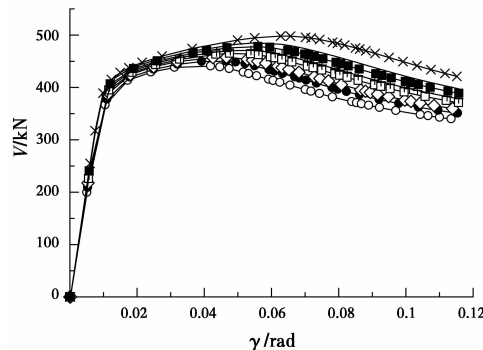
2.1 梁翼缘宽度 b_f 对节点承载力和刚度的影响

根据经典模型选取梁翼缘宽度的范围为 140~280 mm,通过对比图 2(a)各个参数下弯矩-转角关系,得到随着梁翼缘宽度的增大,节点的抗弯承载力显著增强,节点的梁翼缘宽度每增加 20 mm,其刚度增加 5%左右,屈服承载力增加 5%左右,极限承载

力增加 1.5%左右,梁翼缘宽度对节点的抗弯承载力有一定影响。通过对比图 2(b)各个参数下的剪力-剪切角关系,得到随着梁翼缘宽度的增大,曲线趋势逐渐上升,节点的抗剪承载力显著增强, $B_f=280$ mm 模型的初期刚度变化率以及极限承载力变化率最大, $B_f=220$ mm 模型、 $B_f=240$ mm 模型、 $B_f=260$ mm 模型初期刚度有所下降但极限承载力变化率有所上升,梁翼缘宽度对节点的抗弯承载力有一定影响。



(a) 梁翼缘宽度弯矩-转角关系曲线



(b) 梁翼缘宽度剪力-剪切角关系曲线

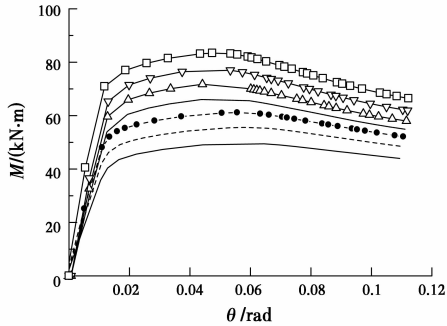
注: \circ $b_f=140$ \bullet $b_f=160$ \diamond $b_f=180$ \square $b_f=200$
 \triangle $b_f=220$ \blacksquare $b_f=240$ — $b_f=260$ \times $b_f=280$

图 2 梁翼缘宽度承载力曲线

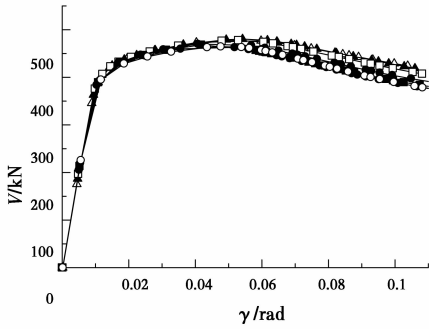
2.2 梁腹板高度 h_f 对节点承载力和刚度的影响

为研究梁腹板高度 h_f 对节点承载力的影响,建立了 7 个有限元模型,选取梁腹板高度 h_f 范围为 180~300 mm,从图 3(a)可以看出,随着梁腹板高度 h_f 增大,抗弯承载力显著增强,梁腹板高度每增加 20 mm,刚度增加 2%左右,屈服承载力增加 3%左右,极限承载力增加 2%左右,梁腹板高度对节点的抗弯承载力与极限承载力有显著影响。通过对比图 3(b)各个参数下的剪力-剪切角关系,得到随着梁腹板高度 h_f 的增大,只有 $h_f=220$ mm 模型极限承载力增大了 3%, $h_f=240$ mm 模型极限

承载力降低了 6%， $h_f = 280$ mm 模型与 $h_f = 300$ mm 模型极限承载力均降低了 3%；总体来看初期刚度变化不大， $h_f = 240$ mm 模型初期刚度降低了 6%， $h_f = 280$ mm 模型初期刚度增大了 2%，梁腹板高度对节点的抗剪承载力有一定影响，但影响不大。



(a) 梁腹板高度弯矩-转角关系曲线



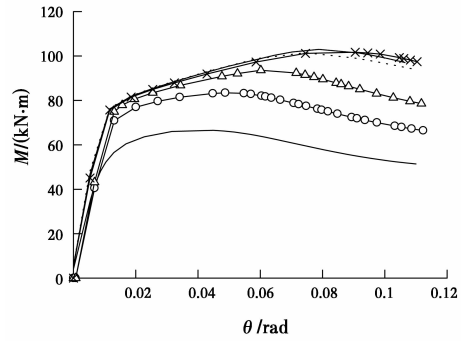
(b) 梁腹板高度剪力-剪切角关系曲线

注：—□— $b_f=180$ —▲— $b_f=200$ —□— $b_f=220$ —●— $b_f=240$
—■— $b_f=260$ —●— $b_f=280$ —○— $b_f=300$

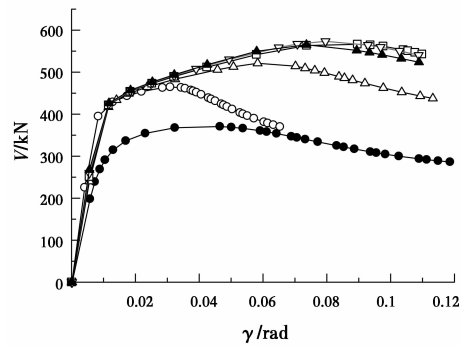
图 3 梁腹板高度承载力曲线

2.3 外环板宽度 h_s 对节点承载力和刚度的影响

根据经典模型选取外环板宽度 h_s 的范围为 25~150 mm，从图 4(a)中可以看出，随着外环板宽度 h_s 增大，抗弯承载力增强，得到初期刚度随着外环板宽度增大，抗弯承载力显著增强，但到后期，外环板宽度对抗弯承载力的影响较小。通过对比图 4(b)中各个参数下的剪力-剪切角关系，总体来看节点的初期刚度变化率呈增大趋势，极限承载力变化率也呈增大趋势， $h_s = 125$ mm 模型的初期刚度变化率最大，增大了 46%，极限抗剪承载力变化率也是最大，增大了 55%； $h_s = 75$ mm 模型的初期刚度变化率最小，降低了 28%，极限抗剪承载力增加了 41%。实际设计中要考虑外环板宽度 h_s 对节点域抗剪承载力的影响。



(a) 外环板宽度抗弯承载力影响曲线



(b) 外环板宽度剪力-剪切角关系曲线

注：—●— $b_s=25$ —○— $b_s=50$ —△— $b_s=75$ —□— $b_s=100$
—▽— $b_s=125$ —▲— $b_s=150$

图 4 外环板宽度承载力曲线

2.4 柱壁厚度 t_c 对节点承载力和刚度的影响

如图 5(a)所示，选取柱壁厚度 t_c 的范围为 6~14 mm，随着圆钢管柱柱壁厚度 t_c 增大，抗弯承载力显著增强，加载初期随着柱壁厚度增大，对刚度影响很大，但随着圆钢管柱壁厚度的增大，后期对刚度的影响逐渐减小，总体来看，圆钢管柱壁厚度对刚度影响较大。如图 5(b)所示，通过对比各个参数下的剪力-剪切角关系，得到随着圆钢管柱壁厚度 t_c 的增大，节点的抗剪承载力有一定增强，初期刚度变化率先减小后逐渐增大， $t_c = 8$ mm 与 $t_c = 10$ mm 模型初期刚度分别减少了 19%和 4%， $t_c = 12$ mm 模型初期刚度增大了 10%， $t_c = 14$ mm 模型初期刚度增大了 25%；随着柱壁厚度增大，极限抗剪承载力变化率逐渐增大， $t_c = 14$ mm 模型增大了 81%。综上，在节点设计时应考虑柱壁厚度 t_c 对节点域性能的影响。

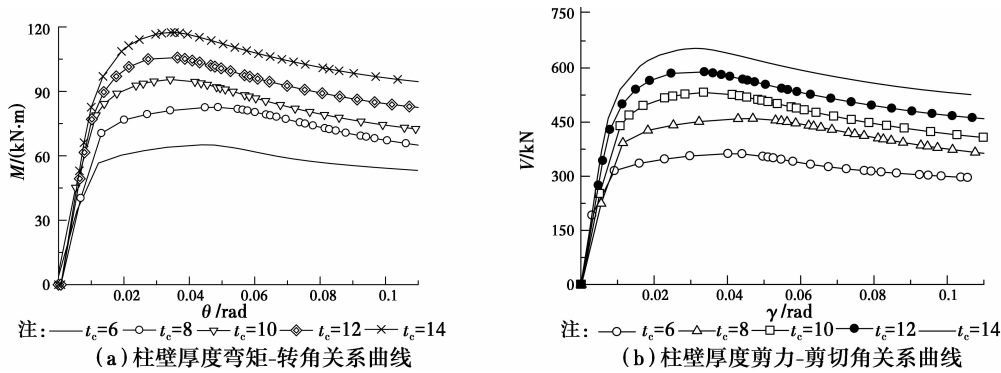


图 5 柱壁厚度承载力曲线

2.5 梁翼缘厚度 t_f 对节点域承载力和刚度的影响

如图 6(a)所示,根据经典模型选取梁翼缘厚度 $t_s = t_f$ 的范围为 6~22 mm,随着梁翼缘厚度的增大,抗弯承载力增强,初期随着外环板厚度增大,屈服承载力和极限承载力都有明显提高,但后期影响程度明显减小,外环板厚度对抗弯承载力有一定影响。通过对比图 6(b)各个参数下的剪力-剪切角关系,

初期刚度变化率先增大后减小, $t_s = t_f = 18$ mm 模型初期刚度变化率增大较大,增大了 80%, $t_s = t_f = 20$ mm 模型增大了 2%;节点的极限承载力变化率呈上升趋势而且上升趋势明显, $t_s = t_f = 14$ mm 模型的极限承载力变化率最大,增大了 1.07 倍,屈服抗剪承载力增加 15%左右。综上,梁翼缘厚度 $t_s = t_f$ 对节点域的抗剪承载力、初期刚度有显著影响。

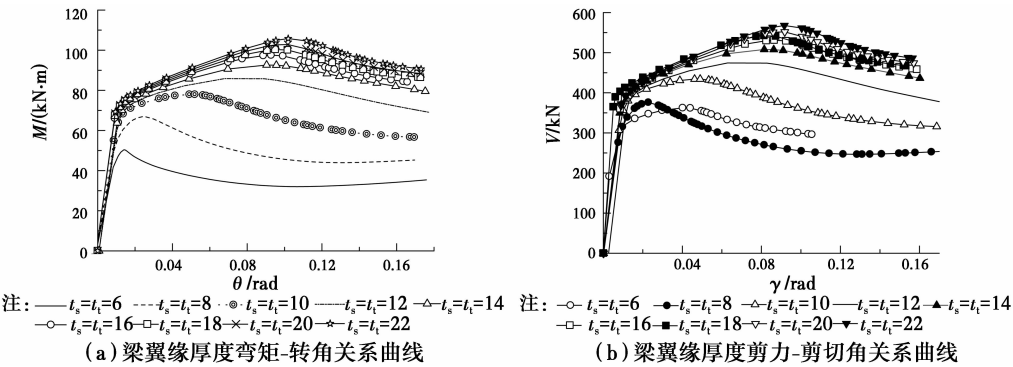


图 6 梁翼缘厚度承载力曲线

2.6 梁腹板厚度 t_w 对节点域承载力和刚度的影响

如图 7(a)所示,随着梁腹板厚度的增加,节点的初期刚度有一定增加,但不是很明显,曲线几乎重合,屈服转角与屈服弯矩几乎一致。综上,梁腹板厚度不是影响节点域性能的因素,在分析参数对圆钢管柱-H型钢梁节点性能的影响时可以忽略梁腹板

厚度对节点域性能的影响。如图 7(b)所示,抗剪刚度变化率几乎没有变化,极限承载力变化率也几乎没有变,可以看出梁腹板厚度 t_w 对节点域性能均无影响。综上,在实际设计节点时可以忽略梁腹板厚度 t_w 对节点域性能的影响。

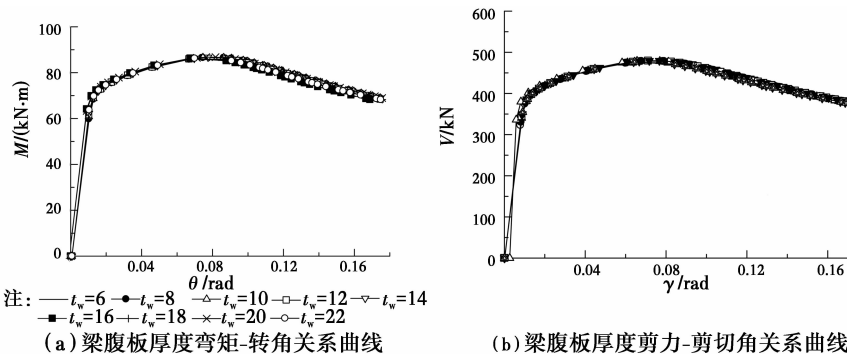


图 7 梁腹板厚度承载力曲线

2.7 轴压比 n 对节点域承载力和刚度的影响

如图 8(a)所示,轴压比所选取的范围是 0.1~0.9,随着轴压比的增大抗弯承载力有所波动,可以说明轴压比对弯矩-转角关系曲线有一定影响。由图 8(a)对比刚度曲线,轴压比由 0.1~0.5,刚度逐渐增大,轴压比由 0.5~0.9 刚度逐渐减小,由此可

见轴压比对抗弯承载力和刚度有一定影响。如图 8(b)所示,通过对比各个参数下的剪力-剪切角关系,随着轴压比的增大,抗剪承载力有所下降,通过对比图 8(b)抗剪刚度影响曲线,轴压比 n 对抗剪刚度有一定影响,轴压比增大为 0.9 时抗剪刚度增大幅度较大,轴压比对抗剪承载力有一定影响。

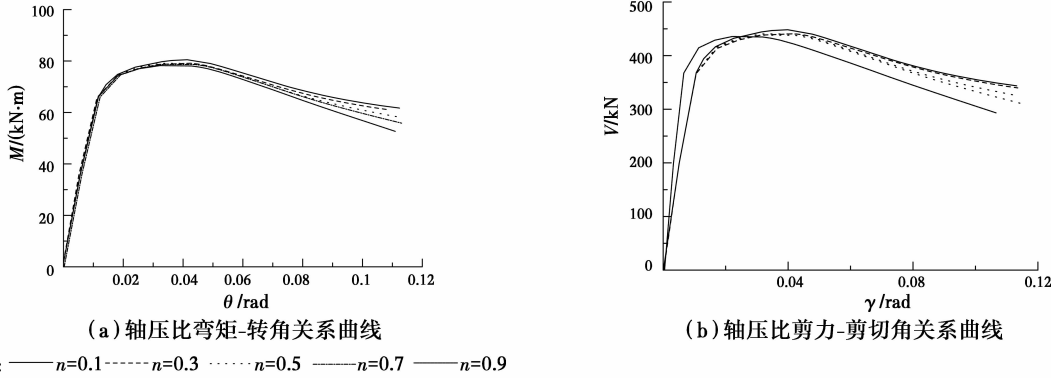


图 8 轴压比承载力曲线

3 各参数对节点域承载力和刚度影响非线性回归分析

通过非线性回归分析考察单个参数对节点^[11]

$$M_y = (-0.0008n + 0.03) \left(\frac{D}{b_f}\right)^{-0.25} \left(\frac{D}{h_f}\right)^{-0.86} \left(\frac{D}{h_s}\right)^{-0.24} \left(\frac{D}{t_c}\right)^{-0.68} \left(\frac{D}{t_s}\right)^{-0.3} \sigma_y R^2 L \quad (1)$$

$$M_u = (-0.0018n + 0.03) \left(\frac{D}{b_f}\right)^{-0.19} \left(\frac{D}{h_f}\right)^{-0.91} \left(\frac{D}{h_s}\right)^{-0.3} \left(\frac{D}{t_c}\right)^{-0.7} \left(\frac{D}{t_s}\right)^{-0.45} \sigma_y R^2 L \quad (2)$$

$$K_0 = (-840n + 193328) \left(\frac{D}{b_f}\right)^{-0.22} \left(\frac{D}{h_f}\right)^{-1.206} \left(\frac{D}{h_s}\right)^{-0.072} \left(\frac{D}{t_c}\right)^{-0.512} \left(\frac{D}{t_s}\right)^{-0.04} EIL^2/R^3 \quad (3)$$

$$K_1 = (6300n + 9708) \left(\frac{D}{b_f}\right)^{-0.85} \left(\frac{D}{h_f}\right)^{-1.73} \left(\frac{D}{h_s}\right)^{0.113} \left(\frac{D}{t_c}\right)^{-1.61} \left(\frac{D}{t_s}\right)^{0.8} EIL^2/R^3 \quad (4)$$

通过非线性回归分析考察单个参数 $D/b_f, D/h_f, D/h_s, D/t_c$ 和 D/t_s 以及 n 对节点的屈服剪力与极限剪力的影响, V_e 为节点域体积, d_a 为梁长度, n 为轴压比, F_y 为屈服应力值,通过软件回归分析得出屈服抗剪承载力 V_y 公式与极限抗剪承载力 V_u 公

屈服弯矩与极限弯矩的影响,经软件回归分析得出屈服抗弯承载力 M_y 公式与极限抗弯承载力 M_u 公式,初期刚度 K_0 公式与二次刚度 K_1 公式:

式; d_c 为钢管柱轴心距离, d_b 为梁翼缘重心之间的距离, t_p 为钢管厚度。

$$\text{系数 } k = \frac{4}{\pi} \quad V_e = 2d_c \cdot d_b \cdot t_p \quad (5)$$

$$V_u = (-3.2n + 102.77) \left(\frac{D}{b_f}\right)^{-0.056} \left(\frac{D}{h_f}\right)^{0.221} \left(\frac{D}{h_s}\right)^{-0.256} \left(\frac{D}{t_c}\right)^{-0.63} \left(\frac{D}{t_s}\right)^{-0.36} \frac{V_e}{d_a k} \sqrt{1-n^2} \frac{F_y}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

$$V_y = (-0.32n + 14.53) \left(\frac{D}{b_f}\right)^{-0.085} \left(\frac{D}{h_f}\right)^{0.11} \left(\frac{D}{h_s}\right)^{-0.13} \left(\frac{D}{t_c}\right)^{-0.456} \left(\frac{D}{t_s}\right)^{-0.137} \frac{V_e}{d_a k} \sqrt{1-n^2} \frac{F_y}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

通过非线性回归分析考察单个参数 $D/b_f, D/h_f, D/h_s, D/t_c$ 和 D/t_s 以及 n 对节点的抗剪刚度 K_{L0} 与二次抗剪刚度 K_{L1} 的影响, G 为剪切模量, pV

为剪切面积,通过软件回归分析得出初期抗剪刚度 K_{L0} 公式与极限抗剪刚度 K_{L1} 公式:

$$\text{剪切面积: } pV = d_b \cdot A/2 \quad (8)$$

$$K_{L0} = (1.7n + 2.04) \left(\frac{D}{b_f}\right)^{-0.033} \left(\frac{D}{h_f}\right)^{-0.01} \left(\frac{D}{h_s}\right)^{-0.01} \left(\frac{D}{t_c}\right)^{-0.4} \left(\frac{D}{t_s}\right)^{0.15} G_p V \quad (9)$$

$$K_{L1} = (0.067n + 0.04) \left(\frac{D}{b_f}\right)^{-0.02} \left(\frac{D}{h_f}\right)^{-0.5} \left(\frac{D}{h_s}\right)^{0.11} \left(\frac{D}{t_c}\right)^{0.073} \left(\frac{D}{t_s}\right)^{0.067} G_p V \quad (10)$$

4 梁柱节点域公式应用与数值模拟对比研究

按照试验模型尺寸以及试验条件^[13],以 OpenSees^[14]为平台,根据屈服抗弯承载力公式 M_y 与极限抗弯承载力 M_u 公式以及初期刚度 K_0 与极限刚度 K_1 公式计算出节点域转角弹簧的双线性材料 Bilin^[15] 的相关参数;利用屈服抗剪承载力 V_y 公式与极限抗剪承载力 V_u 公式以及初期抗剪刚度 K_{L0} 公式与极限抗剪刚度 K_{L1} 公式计算出节点域^[16] 剪切弹簧所用材料 Hysteretic Material 本构关系,将其应用到 Joint2D 节点模型^[17] 中进行数值分析^[13],以验证公式和建模方法的正确性。图 9 为节点建模方法,图 10 为梁端强制位移加载图。

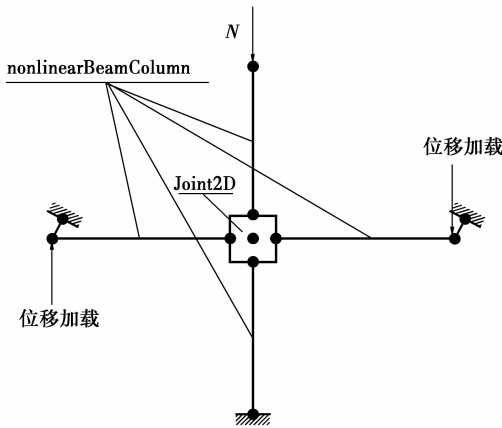


图 9 节点加载模型

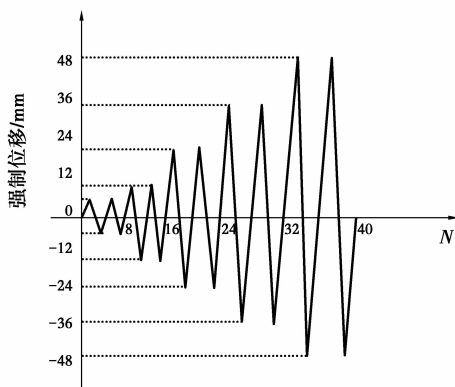


图 10 位移加载

本文模拟了圆钢管柱-H 型钢梁节点模型在轴向荷载作用的同时 H 型钢梁两端受到滞回荷载^[18] 的作用,结合试验结果与本文中数值模拟结果,如图 11 可以看出试件的有限元滞回曲线^[19] 的计算结果与试验结果吻合较好,随着位移增大,承载力增大趋

势明显,曲线的饱满程度、形状以及尺寸基本一致。证明了本文应用节点模型 Joint2D 以及建模方法的正确性及合理性,为节点模型应用到钢框架中抗震性能^[20] 的研究奠定了坚实基础。

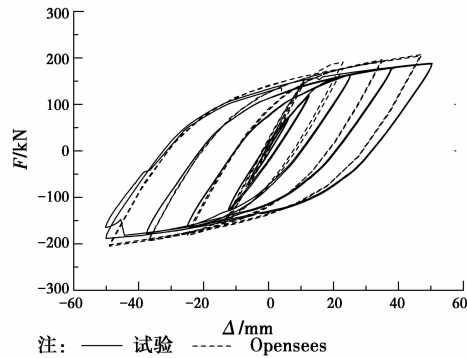


图 11 滞回曲线对比图

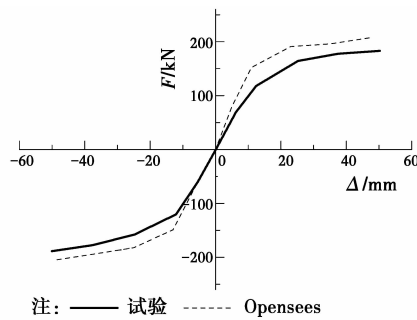


图 12 骨架曲线对比

通过对骨架曲线的分析,提取出试验与有限元曲线的最大荷载与最大位移以及弹性阶段的刚度,对比分析试验与有限元曲线的误差程度,如表 2 所示,最大荷载误差为 10%,最大位移误差为 2%,弹性刚度为 2%,可以得到 OpenSees 模拟结果与试验结果拟合程度较好。

表 2 误差对比

数据来源	最大荷载/kN	最大位移/mm	弹性刚度
试验	188.59	50.25	11.24
OpenSees	207.11	49.03	11.44
误差/%	10	2	2

5 结论

利用 ABAQUS 软件建立 7 组有限元模型,分别考察 7 组变化参数(t_c 圆钢管柱壁厚, b_f 梁翼缘宽度, t_f 梁翼缘厚度, t_w 梁腹板厚度, h_f 梁腹板高度, h_s

外环板宽度,轴压比 n)对节点域承载力的影响,利用非线性数据处理软件,对 7 组参数进行非线性回归分析,并利用 OpenSees 软件对圆钢管柱-H 型钢梁节点模型进行了模拟,通过对比模拟结果与试验结果得出以下结论:

1)单参数变化对节点承载力和刚度的关系曲线有不同程度的影响,得出参数与承载力和刚度之间的关系,通过非线性回归分析得到影响参数与极限承载力、屈服承载力、初期刚度、屈服刚度的计算公式。

2)数值模拟结果与试验结果的拟合程度验证了建模方法以及节点域抗弯承载力公式与抗剪承载力公式应用的可行性和合理性。

3)基于 OpenSees 的分析模型能很好地模拟钢结构节点的弹塑性性能,可将此应用于整体的框架节点中,对于整体的钢框架弹塑性性能的评估是合理的。

参考文献:

- [1] 潘振华,潘鹏,叶列平,等. 自复位钢框架节点有限元模拟及参数分析[J]. 建筑结构学报,2011(3):35-42.
- [2] 石永久,王萌,王元清,等. 钢框架端板连接半刚性节点受力性能分析[J]. 工程力学,2011(9):51-58.
- [3] Specification for Structural Steel Buildings: ANSI/ASIC360-05 [S]. American Institute of Steel Construction,2005.
- [4] Eurocode3:Design of Steel Structures-Part 1-1:General Rules and Rules for Buildings[S]. 1993.
- [5] 中华人民共和国建设部. 钢结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [6] 丁洁民,沈祖炎. 一种半刚性节点的实用计算模型[J]. 工业建筑,1992(11):29-32.
- [7] 张晓霞. 钢结构框架梁柱节点连接设计方法探讨[J]. 山西建筑,2011(5):43-44.
- [8] 潘伶俐,陈以一. 考虑竖向加劲肋作用的 H 形梁柱节点试验研究[J]. 建筑结构学报,2012,33(12):1-9.
- [9] 钢构造接合部设计指针[S]. 日本建筑学会,2001.
- [10] Dong L J, Sui W N, Li G C. Finite element analysis on joint of ultra-high steel columns and steel core barrel outrigger truss[J]. Advanced Materials Research,2011(1):834-837.
- [11] Díaz C, Victoria M, Marti P, et al. FE model of beam-to-column extended end-plate joints [J]. Journal of Constructional Steel Research,2011,67:1578-1590.
- [12] 白雪. 左右梁位置偏移的外加强环式钢框架异型节点的试验研究及有限元分析[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2013.
- [13] Tsavdaridis K D, Faghieh F, Nikitas N. Assessment of perforated steel beam-to-column connections subjected to cyclic loading [J]. Journal of Earthquake Engineering,2014,18(8):1302-1325.
- [14] Mazzoni S, McKenna F, Scott M H, et al. Open system for earthquake engineering simulation (OpenSEES) command language manual[CP]. 2007.
- [15] Lignos D G, Krawinkler H. Deterioration modeling of steel components in support of collapse prediction of steel moment frames under earthquake loading [J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 137 (11): 1291-1302.
- [16] Tsavdaridis K D, D'Mello C. Vierendeel bending study of perforated steel beams with various novel web opening shapes through nonlinear finite-element analyses[J]. Journal of Structural Engineering(United States),2012,138:1214-1230.
- [17] Sengupta P, Li B. Hysteresis behaviour of reinforced concrete non-ductile beam-column joints [C]// Proceedings of the Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering Building an Earthquake-Resilient Society,2011.
- [18] Zhang Y Z, Li Y Q, Luo J H, et al. Experimental study on load-carrying behaviour of large-section CFT columns with distributive beam and inner diaphragm detailing in joints under compressing and bending loads[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47 (11):45-54.
- [19] 袁军. 考虑节点模型的钢筋混凝土框架抗震性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

(编辑 胡志平)