

文章编号:1673-2049(2009)04-0007-07

垫板对平齐式端板连接梁柱 节点性能的影响

李国强^{1,2}, 司 洋², 郝坤超³

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;
3. 中国京冶工程技术有限公司, 上海 201206)

摘要:分别采用 ANSYS 有限元分析软件和 Eurocode 3 中的组件法对加入垫板的平齐式端板连接梁柱节点进行了模拟,并将模拟结果与试验结果进行了对比。结果表明:有限元分析所得的弯矩-相对转角曲线以及滞回曲线与试验结果基本吻合,节点的变形也与试验中观察到的变形一致,有限元分析可以很好地模拟此类节点的转动能力和刚度变化;采用组件法计算平齐式端板连接梁柱节点的刚度具有令人满意的精度;垫板的加入对节点整体性能没有太大的影响。

关键词:半刚性;垫板;端板;节点;有限元分析;非线性分析;组件法

中图分类号:TU375 **文献标志码:**A

Influence of Inserted Plate on Behavior of Flush End-plate Beam-to-column Joints

LI Guo-qiang^{1,2}, SI Yang², HAO Kun-chao³

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. China Jingye
Engineering Corporation Limited, Shanghai 201206, China)

Abstract: The flush end-plate beam-to-column joints with inserted plate were modeled using finite element software ANSYS and component method provided in Eurocode 3. The modeled results were compared with experimental results. The results show that the finite element analysis and the experimental data give the similar moment-rotation curves, hysteretic curves and joint deformations; the rotation capacity and stiffness of this type of joint can be simulated well with the finite element method. The stiffness of the joints with satisfying accuracy can be obtained by using component method. The inserted plate does not influence the behavior of beam-to-column joints.

Key words: semi-rigid; inserted plate; end-plate; joint; finite element analysis; nonlinear analysis; component method

0 引 言

如果有限元分析方法可以较好地模拟某一结构

的试验分析结果,则可以方便地进行更多的参数分析,以了解该结构的受力性能。

20 世纪 90 年代以来,有限元分析方法得到了

收稿日期:2009-09-17

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAJ01B02)

作者简介:李国强(1963-),男,湖南株洲人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:gqli@mail.tongji.edu.cn。

进一步的发展,对钢梁柱节点的模拟也考虑了越来越多的因素。Bahaari 等^[1-3]进行了梁柱端板节点 2-D 及 3-D 弹塑性分析,对端板和柱翼缘的接触面用界面单元加以模拟,考虑其接触和分开时不同的受力模式。Choi 等^[4]利用有限元方法分析了端板节点的特性,他们采用完全的三维分析,力图模拟出节点的实际工作状态;进行弹塑性分析时,考虑了螺栓的预拉力以及接触面的复杂受力情况。

为了计算连接的初始转动刚度,欧洲规范 Eurocode 3^[5] (下文简称为 EC3) 中提出了组件法 (Component Method),用来计算各种纯钢节点的初始转动刚度。该方法认为,纯钢节点可以看作是由一系列的组件所构成,这样,纯钢节点的受力特征就可以通过这些组件的受力特性来确定^[6-9]。

本文中笔者利用组件法对有垫板和无垫板的 4 个半刚性端板连接梁柱节点试件的转动刚度进行计算,以获得它们的弯矩-相对转角曲线,并与试验所得曲线进行比较。

1 有限元模型的建立

本文中共对 10 组不同参数的半刚性节点模型进行了有限元分析,各模型编号及相关参数见表 1。

表 1 模型编号及相关参数

Tab. 1 Model Number and Related Parameters				
模型编号	螺栓排数	垫板厚度/mm	试件个数	加载方式
A-00-0	4		1	单调
A-04-0	4	4	1	单调
A-10-0	4	10	1	单调
A-00-1	4		1	循环
A-04-1	4	4	1	循环
A-10-1	4	10	1	循环
B-00-0	3		1	单调
B-08-0	3	8	1	单调
B-00-1	3		1	循环
B-08-1	3	8	1	循环

采用商业通用有限元软件 ANSYS 建立三维实体模型,对无垫板和加入垫板的节点进行非线性分析。为了节约计算时间,利用结构的对称性建立 1/2 节点分析模型。

1.1 梁柱单元

本模型中梁柱以及垫板单元的模拟均采用 Solid45 单元,材料本构关系采用三折线模型,如图 1 所示。网格划分采用体扫描的划分方式,在梁柱节点处采用较密的网格以保证模拟计算的精度,而在节

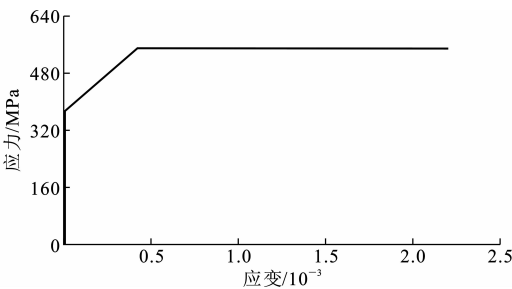


图 1 梁柱单元本构关系模型

Fig. 1 Constitutive Relation Model of Beam and Column Element

点以外的区域采用较疏的网格以节约计算时间,如图 2、3 所示。

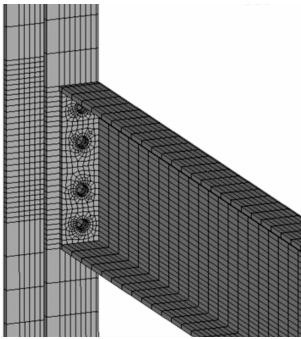


图 2 梁柱 1/2 模型

Fig. 2 Half Model of Beam and Column

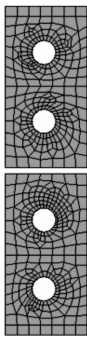


图 3 垫板单元

Fig. 3 Plate Element Inserted

1.2 螺栓单元

为了较好地控制单元大小,螺栓的网格划分采用了体扫描的方式,如图 4 所示,并采用三折线本构关系模型,如图 5 所示。

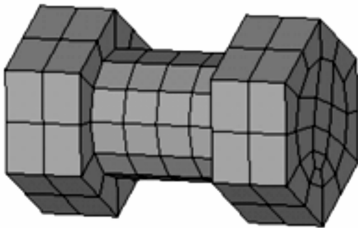


图 4 螺栓单元

Fig. 4 Bolt Element

1.3 接触单元

在本模型中,钢梁、钢柱、垫板以及螺栓之间接触的模拟是最为关键的一步,因为这四者之间的相互作用是通过接触单元来传递的。在本模型中采用三维面接触单元 Target170 和接触单元 Contal73 来模拟接触面,其中包括:钢梁端板与垫板之间的接

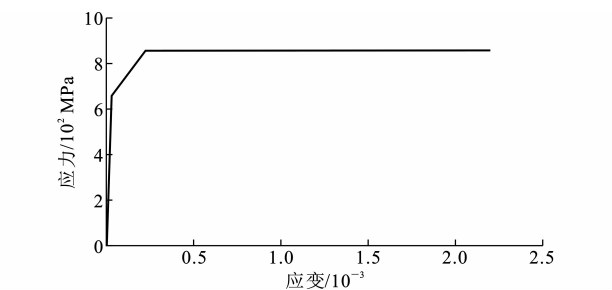


图 5 螺栓单元本构关系模型

Fig. 5 Constitutive Relation Model of Bolt Element

触、垫板与钢柱之间的接触、螺栓头与钢梁端板之间的接触、螺栓壁与钢梁端板之间的接触、螺栓壁与垫板之间的接触、螺栓壁与钢柱之间的接触以及螺栓头与钢柱之间的接触,如图 6、7 所示。

1.4 加载控制

为了更好地控制模型的加载过程,采用梁端位移控制方式进行加载控制。加载过程中各子步的荷载通过读取结果文件中梁端各受力节点的反力后求和得出。

图8为各个试件在加载后的变形情况。从图8

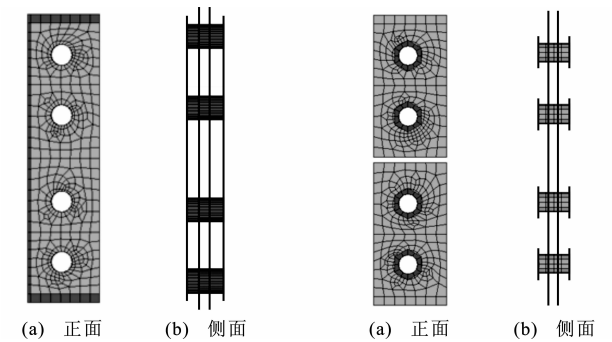


图 6 接触单元

Target170
Fig. 6 Contact Element
Target170

图 7 接触单元

Conta173
Fig. 7 Contact Element
Conta173

可以看出:各个模型的变形情况与试验中观察到的变形情况基本一致^[10]。

2 有限元分析结果

2.1 单调加载模型的弯矩-相对转角曲线

图 9 为 ANSYS 模拟分析结果与单调加载试件试验结果的比较。其中,模型 A-04-0、B-00-0 与

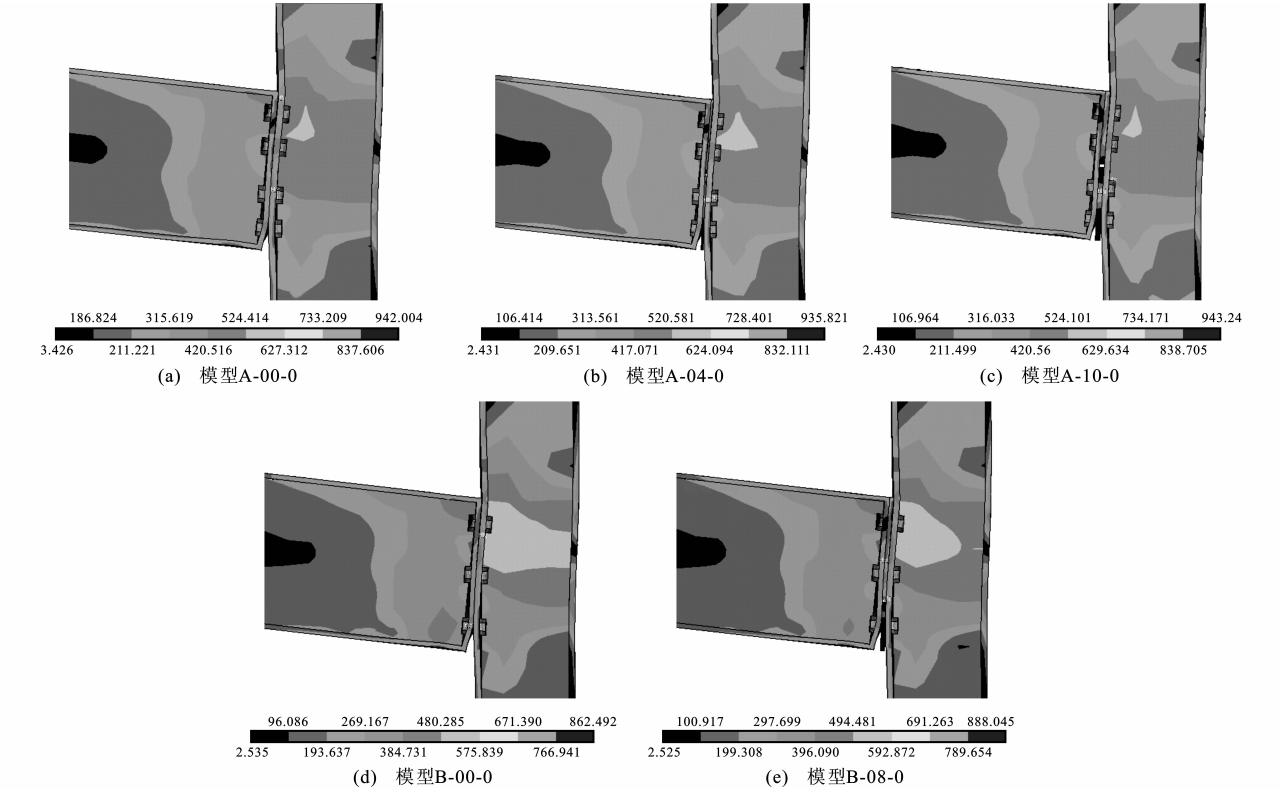


图 8 模型变形(单位:MPa)

Fig. 8 Deformation of Model (Unit:MPa)

B-08-0的ANSYS分析结果与试验结果吻合较好,2条曲线几乎重合。而模型 A-00-1 的试验结果与 ANSYS 分析结果相比,试件的初始转动刚度有一

定不同,但在弯矩达到 120 kN · m 后,2 条曲线趋于一致。总体来讲,ANSYS 中对单调加载试件的模拟分析结果是令人满意的。

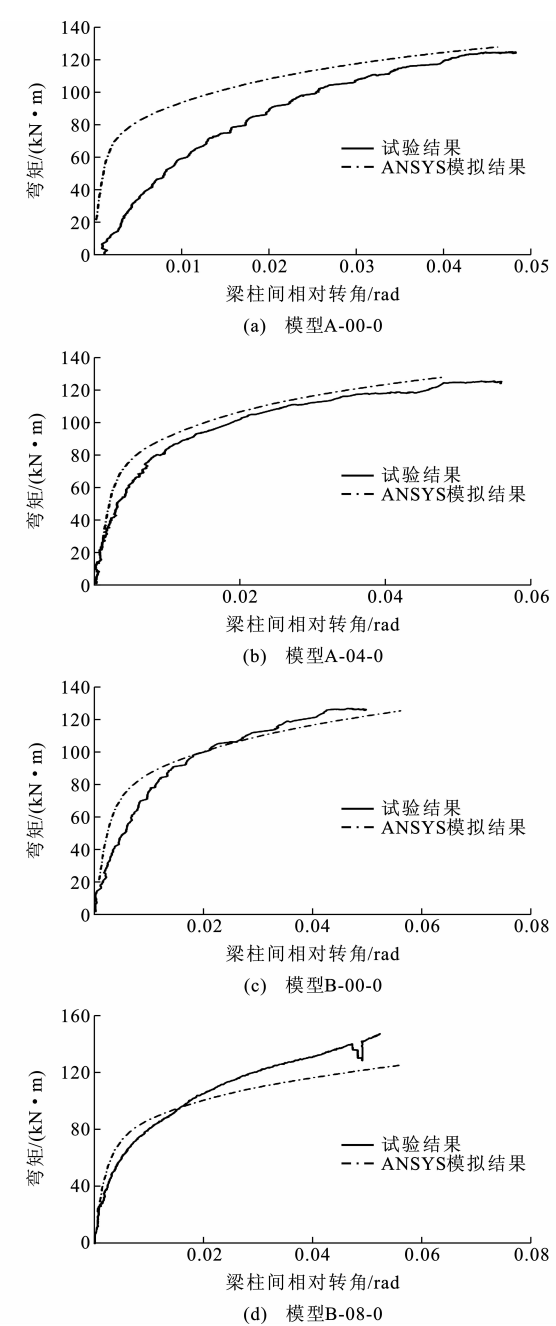


图 9 单调加载模型弯矩-相对转角曲线的比较

Fig. 9 Comparisons of Relations of Moments and Rotation Angles of Monotonic Loading Models

2.2 循环加载模型滞回曲线

图 10 为 ANSYS 模拟分析结果与试验结果的滞回曲线比较。从图 10 可以看出:模型 A-04-1、A-10-1、B-00-1 与 B-08-1 的 ANSYS 模拟分析结果与试验结果吻合较好。模型 A-00-1 的 ANSYS 模拟分析结果与试验结果相比,节点所能承受的最大弯矩基本一致,但 ANSYS 分析结果的正负极限转角均为 0.06 rad 左右,而试验结果中节点的正负转角分别为 0.08、0.04 rad。这是由于试验中试件的一

侧先出现裂缝,导致每次加载该侧裂缝加大,从而两侧极限转角有较大差异。

3 组件法模拟

3.1 节点转动刚度的定义

梁柱节点的转动刚度可用节点的弯矩-转角关系曲线表达式的 1 阶导数来表示,即

$$K_i = \left. \frac{dM}{d\theta} \right|_{\theta=0} \tag{1}$$

式中: K_i 为连接的初始转动刚度; M 为作用在节点上的弯矩; θ 为节点的转角。

欧洲规范 EC3 的组件法的计算内容包括:①识别连接中的各个组件;②确定各组件相互间的关系;③确定各组件的刚度。

对于梁柱端板连接节点,节点转角变形主要包括 2 个部分:由节点域剪切变形引起的剪切转角 θ_c 和由柱翼缘和端板变形引起的梁柱之间的相对转角 θ_{ep} 。

3.2 节点转动刚度的确定

根据 EC3 中的组件法,节点的转动刚度 K_i 可由式(2)确定,即

$$K_i = Ez^2 / (\mu \sum_i \frac{1}{k_i}) \tag{2}$$

$$\mu = \begin{cases} 1 & M_{j,Ed} \leq \frac{2}{3} M_{j,Rd} \\ (1.5 M_{j,Ed} / M_{j,Rd})^\Psi & M_{j,Ed} > \frac{2}{3} M_{j,Rd} \end{cases} \tag{3}$$

式中: E 为材料的弹性模量; k_i 为与节点刚度相关的第 i 个组件的刚度系数; z 为节点的转动力臂; μ 为刚度比; $M_{j,Ed}$ 为节点所承受的弯矩; $M_{j,Rd}$ 为节点的弯矩承载设计值; Ψ 为不同种类连接所使用的系数,对于多排螺栓端板连接节点, $\Psi=2.7$ 。

对于处于不同受力状态下的端板螺栓连接节点,计算其刚度系数 K 需考虑的刚度系数见表 2。

表 2 端板螺栓连接节点刚度系数

Tab. 2 Stiffness Calculating Coefficients for Bolted End-plate Joints

连接方式	受拉螺栓排数	刚度系数
单向	1	$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_{10}$
	≥ 2	k_1, k_2, k_{eq}
双向(两侧弯矩相等)	1	$k_2, k_3, k_4, k_5, k_{10}$
	≥ 2	k_2, k_{eq}
双向(两侧弯矩不等)	1	$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_{10}$
	≥ 2	k_1, k_2, k_{eq}

由表 2 可知:对于端板螺栓连接边节点,需要考虑的组件刚度系数包括柱腹板受剪刚度系数 k_1 、柱

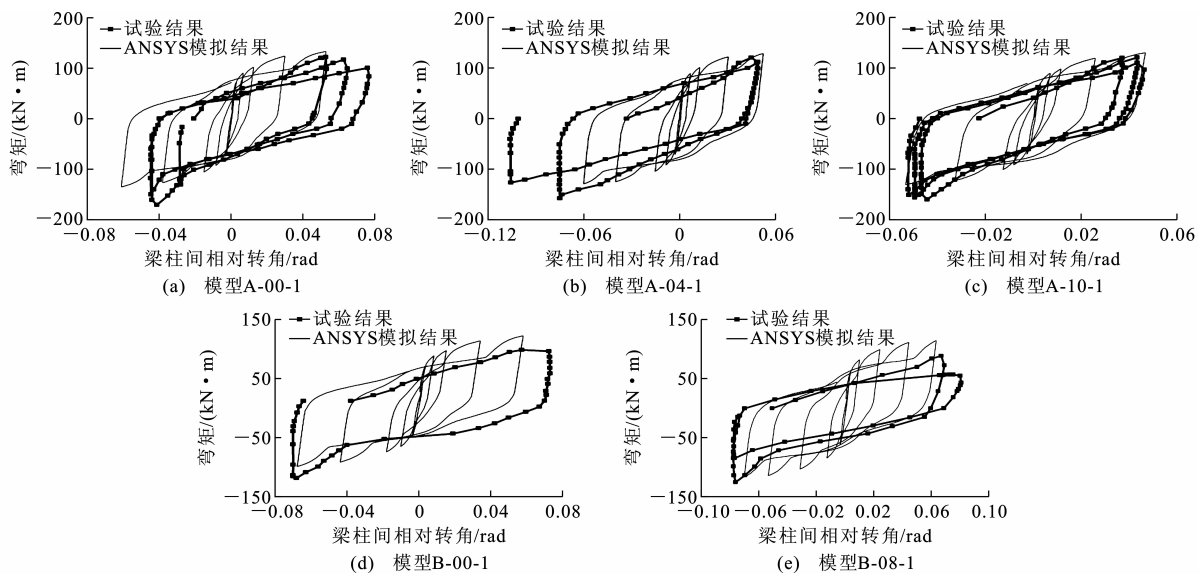


图10 模型滞回曲线的比较

Fig. 10 Comparisons of Hysteretic Curves of Models

腹板受压刚度系数 k_2 、螺栓及端板的等效刚度系数 k_{eq} 。

由于计算结果是与试验曲线中的弯矩-梁柱间相对转角曲线进行比较的,而腹板受剪对梁柱间相对转角没有贡献,所以在计算刚度时忽略 k_1 。

柱腹板受压刚度系数 k_2 可由式(4)确定,即

$$k_2 = \frac{0.7b_{\text{eff},c,wc}t_{wc}}{d_c} \quad (4)$$

式中: d_c 为柱腹板净高; t_{wc} 为柱腹板的厚度; $b_{\text{eff},c,wc}$ 为柱腹板受压区有效宽度。

当所计算的节点为螺栓端板连接时, $b_{\text{eff},c,wc}$ 由式(5)确定,即

$$b_{\text{eff},c,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_p + 5(t_{fc} + s) + s_p \quad (5)$$

$$s = \sqrt{2}a_c \quad (6)$$

式中: s 为与柱翼缘和腹板连接方式有关的系数; s_p 为考虑梁翼缘传递的压力在柱腹板内按 45° 角扩散所得到的长度; t_{fb} 为端板连接节点中梁的翼缘厚度; a_p 为梁翼缘与梁腹板之间焊缝的有效厚度; t_{fc} 为柱的翼缘厚度; a_c 为柱翼缘与柱腹板之间焊缝的有效厚度。

图11为节点计算参数的确定。等效刚度系数 k_{eq} 可由式(7)确定,即

$$k_{eq} = \frac{\sum_r k_{\text{eff},r} h_r}{z_{eq}} \quad (7)$$

$$z_{eq} = \frac{\sum_r k_{\text{eff},r} h_r^2}{\sum_r k_{\text{eff},r} h_r} \quad (8)$$

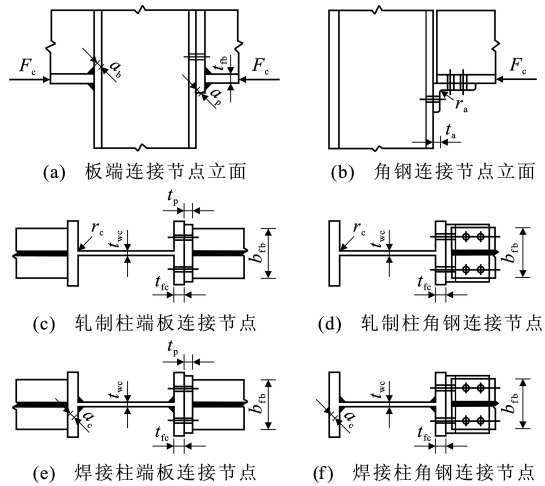


图11 节点计算参数的确定

Fig. 11 Definitions of Calculating Parameters of Joints

$$k_{\text{eff},r} = 1 / \sum_i \frac{1}{k_{i,r}} \quad (9)$$

式中: $k_{\text{eff},r}$ 为第 r 排螺栓的等效刚度系数; h_r 为第 r 排螺栓到受压中心的距离; z_{eq} 为等效力臂; $k_{i,r}$ 为与第 r 排螺栓刚度系数相关的第 i 个组件的刚度系数。

对于螺栓连接端板节点,影响到 k_{eq} 的组件刚度系数包括:

(1) 腹板受拉刚度 $k_{3,r}$, 其计算公式为

$$k_{3,r} = \frac{0.7b_{\text{eff},t,wc}t_{wc}}{d_c} \quad (10)$$

当所计算的螺栓位于端板两端时, $b_{\text{eff},t,wc}$ 为

$$b_{\text{eff},t,wc} t_{wc} = \alpha m \quad (11)$$

式中: α 为系数; m 为端板螺栓孔中心到梁腹板与梁

翼缘连接处的距离,具体定义见图 12。

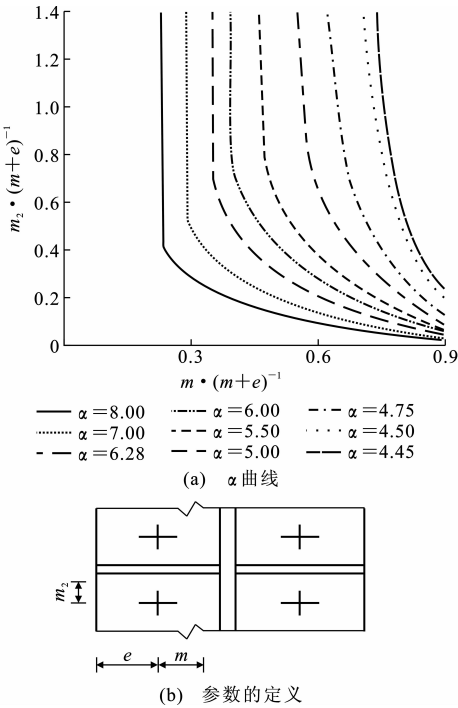


图 12 α 的取值

Fig. 12 Definition of α

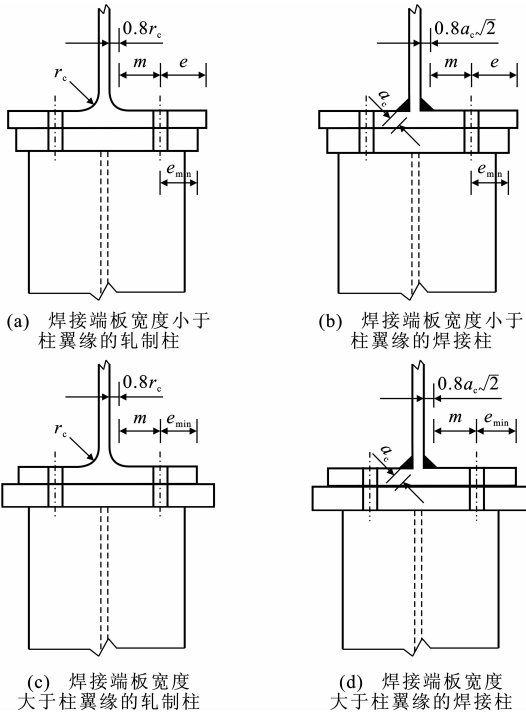


图 13 m 、 e 的取值

Fig. 13 Definitions of m and e

当所计算的螺栓不位于端板两端时, $b_{\text{eff},t,wc}$ 为

$$b_{\text{eff},t,wc} = 4m + 1.25e \quad (12)$$

式中: e 为端板螺栓孔中心到端板侧边缘的距离。

(2) 柱翼缘受弯刚度 $k_{4,r}$, 其计算公式为

$$k_{4,r} = \frac{0.9 l_{\text{eff}} t_{fc}^3}{m^3} \quad (13)$$

式中: l_{eff} 为计算中螺栓所在位置的最小端板有效长度。

当所计算的螺栓位于端板两端时(靠近加劲肋时), l_{eff} 为

$$l_{\text{eff}} = \alpha m \quad (14)$$

当所计算的螺栓不位于端板两端时, l_{eff} 为

$$l_{\text{eff}} = 4m + 1.25e \quad (15)$$

(3) 端板受弯刚度 $k_{5,r}$, 其计算公式为

$$k_{5,r} = \frac{0.9 l_{\text{eff}} t_p^3}{m^3} \quad (16)$$

式中: t_p 为端板厚度。

当所计算的螺栓为最靠近受拉翼缘的一排时, l_{eff} 可由式(14)计算得出; 当所计算的螺栓位于其他排时, l_{eff} 可由式(15)计算得出。

(4) 螺栓受拉刚度 $k_{10,r}$, 其计算公式为

$$k_{10,r} = 1.6 A_s / L_b \quad (17)$$

式中: A_s 为螺栓的截面面积; L_b 为连接件厚度加垫圈厚度加螺栓头厚度及螺母厚度之和的一半。

3.3 组件法对试件的模拟

图 14 为利用组件法计算的 4 个节点的 $M-\theta$ 曲线与试验所得曲线的比较。

从这 4 个节点的理论计算结果与试验结果比较中可以看出, 对于加入垫板的梁柱节点, 组件法计算结果具有令人满意的精度, 这说明 EC3 中规范的组件法可以用于此类半刚性节点的刚度计算。

4 结 语

(1) 通过比较有限元分析结果与试验结果发现, 分析所获的节点转角曲线以及滞回曲线基本吻合, 端板的变形也与试验中观察到的一致, 这说明有限元分析可以很好地模拟此类节点的转动能力和刚度变化。但 ANSYS 有限元模型中无法准确地反映节点的最终破坏形式, 如裂缝的出现等。总体来说, 有限元模型可以用来对此类节点进行进一步的参数分析, 如端板的厚度及形式等对节点的影响。

(2) 通过比较组件法的理论计算结果与试验结果发现, EC3 中的组件法计算该类节点的刚度具有令人满意的精度, 同时也验证了垫板的加入对节点整体性能没有太大的影响。

参考文献:

References:

[1] BAHAAARI M R, SHERBOURNE A N. Computer

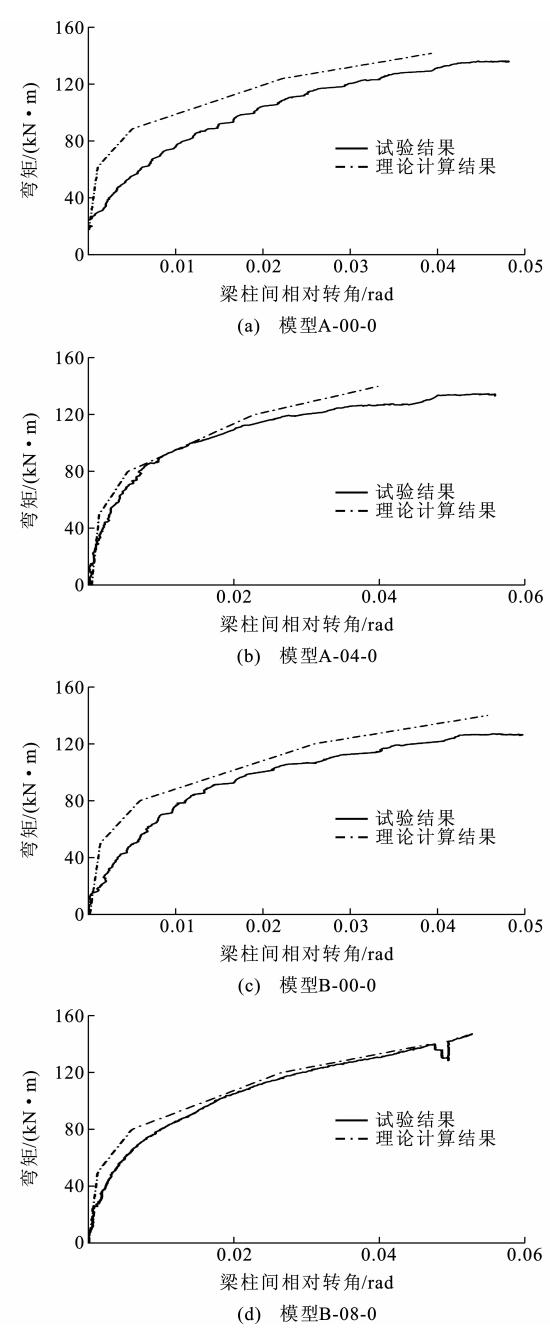


图 14 组件法模型弯矩-相对转角曲线的比较

Fig. 14 Comparisons of Relations of Moments and Relative Rotation Angles of Component Method Models

Modelling of an Extended End-plate Bolted Connection[J]. Computers & Structures, 1994, 52(5): 879-893.

[2] SHERBOURNE A N,BAHAARI M R. 3D Simulation of End-plate Bolted Connections[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(11): 3122-3136.

[3] SHERBOURNE A N,BAHAARI M R. Finite Element Prediction of End Plate Bolted Connection Behavior. I; Parametric Study[J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(2): 157-164.

[4] CHOI C K,CHUNG G T. Refined Three-dimensional Finite Element Model for End-plate Connection[J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(11): 1307-1316.

[5] Eurocode 3, Design of Steel Structures. Part 1. 8; Design of Joints[S].

[6] 潘建荣,王 湛,张 吉. 框架组合梁柱节点的非线性有限元分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2009, 41(5): 654-662.

PAN Jian-rong, WANG Zhan, ZHANG Ji. Nonlinear Finite Element Analysis of Frame Composite Joints[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2009, 41(5): 654-662.

[7] 卢小松,顾 强. 钢框架梁柱栓-焊混合连接极限弯矩的计算[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2008, 40(4): 491-498.

LU Xiao-song, GU Qiang. The Moment Capacity of Welded-bolted Beam to Column Connections in Steel Framework[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2008, 40(4): 491-498.

[8] 张淑云,白国良,李红星,等. 钢筋混凝土框架异型节点抗剪承载力研究[J]. 西安科技大学学报, 2006, 26(2): 170-174.

ZHANG Shu-yun, BAI Guo-liang, LI Hong-xing, et al. Anti-shear Capacity of Abnormal Joints of RC Frame[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2005, 26(2): 170-174.

[9] 綦春明,张志恒. 高层钢筋砼框架结构布置与梁柱截面尺寸整体优化设计研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2008, 40(4): 574-579.

QI Chun-ming, ZHANG Zhi-heng. Study on the Optimization of Structure Layout and Section Sizes of High-rise Reinforced Concrete Beam-column Frames[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2008, 40(4): 574-579.

[10] 司 洋,李国强,郝坤超. 垫板对平齐式端板连接梁柱节点性能影响的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(5): 48-56.

SI Yang, LI Guo-qiang, HAO Kun-chao. Experimental Research on Influence of Inserted Plate on Behavior of Semi-rigid Beam-to-column Joints[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5): 48-56.