

文章编号:1673-2049(2017)02-0086-09

钢框架延性耗能节点简化模型研究

韩明岚^{1,2}, 王 慧³, 王 燕³, 王 帅³, 牟 政³

(1. 青岛理工大学 理学院, 山东 青岛 266033; 2. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590;
3. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033)

摘要:为简化延性耗能节点有限元数值计算,给大型延性耗能节点钢框架结构简化计算提供基础研究,对梁翼缘局部热处理型节点、盖板加强型节点和翼缘过渡板加强型节点3种构造形式的延性耗能节点简化理论模型进行了理论和数值研究。在节点试验研究基础上引入弹簧单元设计节点简化理论模型,根据弹簧单元广义力和广义位移关系设定弹簧本构关系,充分反映节点域和节点连接组件变形。采用ANSYS有限元软件对节点简化理论模型进行数值计算,提取节点弯矩-转角滞回曲线,将其与试验结果进行对比。结果表明:滞回曲线和试验结果吻合较好,简化理论模型能够体现延性耗能节点的实际力学性能和塑性区发展过程;所得结论可为延性耗能节点钢框架结构数值分析提供新方法。

关键词:延性耗能节点;简化模型;弹簧单元;滞回曲线;试验研究

中图分类号:TU391 **文献标志码:**A

Research on Simplified Model of Ductile and Energy-dissipated Connections in Steel Frames

HAN Ming-lan^{1,2}, WANG Hui³, WANG Yan³, WANG Shuai³, MU Zheng³

(1. School of Science, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, Shandong, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China;
3. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, Shandong, China)

Abstract: In order to simplify finite element numerical calculation of ductile and energy-dissipated connections and afford basic research for simplified calculation of ductile and energy-dissipated connections in steel frame structures, according to heat-treated beam section connection, cover-plate reinforced connection and flange-plate reinforced connection, theoretical and numerical studies on three kinds of simplified theory models of ductile and energy-dissipated connections were conducted. On basis of test study of connections, simplified theory models were designed by introducing spring element, and constitutive relations of the springs were defined according to generalized force and generalized displacement relationship of spring elements, which fully reflected deformation of the panel zone and connection components. Numerical calculation of connection simplified theory models was carried out by using ANSYS software, moment-rotation hysteresis curves were obtained and compared to test results. The results show that hysteresis curves are consistent with test results, and simplified theory model can reflect real mechanical property of ductile and energy-dissipated connection and development of plastic zone. The results

收稿日期:2016-10-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51278259,51678316);青岛市博士后研究人员应用研究项目(2016129)

作者简介:韩明岚(1974-),女,山东日照人,青岛理工大学副教授,工学博士,E-mail:zhanc@163.com。

will provide new method for numerical analysis of steel frame structure with ductile and energy-dissipated connections.

Key words: ductile and energy-dissipated connection; simplified model; spring element; hysteresis curve; test study

0 引言

在 20 世纪 90 年代美国北岭地震和日本阪神地震中,传统栓焊混合梁柱节点表现出不尽人意的抗震能力,节点处出现不同程度的脆断,尽管大多数结构中梁柱节点的破坏是可修复的,但其高昂的维修费用仍旧给财产造成了巨大的损失。随后,美国钢结构协会、焊接协会、SAC 联合组织以及 FEMA 组织等联合研发设计新型节点,经过大量的试验研究和数值计算^[1-2],提出了多种新型延性耗能节点取代传统的栓焊混合梁柱节点,这些延性耗能节点可以概括为 2 种类型:削弱型节点和加强型节点。这 2 种类型节点的最大特点是在强震作用下可以迫使塑性铰在远离梁柱连接焊缝以外区域形成,对结构抗震极其有益。各国学者展开了针对本国型材的新型节点研究工作^[3-8],越来越多的延性耗能节点在工程中得到应用并取得了很好的社会效益。

目前,针对延性耗能节点的研究采用试验和数值计算相结合的方法,通过试验可以获得节点的弯矩-转角滞回曲线,相当于节点的本构关系,利用这种本构关系分析节点的变形特点、刚度退化、损伤程度、能量消耗等抗震性能。数值计算大多采用实体建模分析,根据实际加载进行数值模拟,对比试验分析结果,综合评价延性耗能节点的力学特性及抗震性能。

延性耗能节点钢框架结构体系设计上需要考虑 3 方面的问题:静力分析、稳定性能分析和地震反应分析。延性耗能节点构造比普通节点复杂,对耗能型节点钢框架结构进行数值分析,若采用实体建模计算则比较繁琐,尤其是高层空间框架结构,计算耗时耗力,因此有必要建立能够模拟节点实际力学性能的节点简化理论分析模型,简化框架结构计算过程。

本文在试验研究基础上对 3 种形式的延性耗能节点简化模型进行数值计算,通过引入转动弹簧单元模拟节点域剪切变形和节点连接组件的变形,提出弹簧单元本构关系,通过修正节点弯矩-转角关系设定塑性铰处的弹簧单元刚度,将数值计算的节点弯矩-转角滞回曲线和试验结果进行对比。计算结

果表明,二者滞回曲线吻合良好,取得了较好的一致性。本文研究内容可为新型延性耗能节点钢框架整体结构静力计算和动力计算提供一种简化实用的分析方法。

1 节点简化模型

目前中国关于节点简化理论模型的研究主要针对普通节点,即普通的全焊接和栓焊混接节点^[9],由于延性耗能型节点研究历史还比较短,国内外关于此类节点简化理论模型的研究相对较少。

钢框架结构中梁、柱以弯曲变形为主,节点域以剪切变形为主,梁、柱连接节点简化模型应根据各主要构件的变形特点确定。文献[10]最早提出了梁、柱连接节点简化模型,主要是针对传统的全焊接节点和栓焊混接连接节点,见图 1(图 1 中, h_b 、 h_c 分别为梁和柱的截面高度),节点域周边杆与杆铰接,各杆设定为全刚性,采用拉压弹簧变形体现节点域剪切变形,采用梁端转动弹簧模拟节点转动及塑性区的发展。

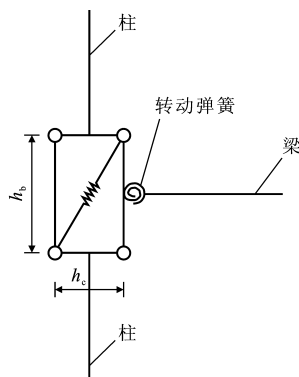


图 1 传统节点简化模型

Fig. 1 Simplified Model of Traditional Connection

削弱型节点和加强型节点均为塑性铰外移型的耗能节点,计算中不但要考虑节点的弹性变形还要考虑塑性变形以及塑性铰形成的位置等因素,因此对于延性节点而言,其简化模型和普通节点的有所不同,Jin 等^[11]提出翼缘圆弧式削弱型节点(RBS 节点)简化模型,该简化模型中利用节点域中心位置布置转动弹簧单元模拟节点域的剪切变形,见图 2。

基于图 1,2 可以得到图 3(a)所示的梁柱新型

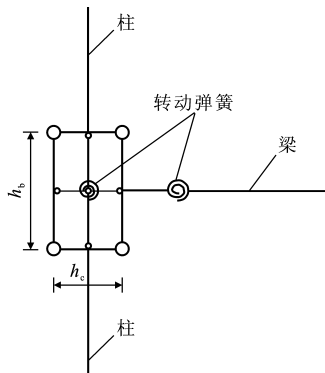


图 2 RBS 节点简化模型

Fig. 2 Simplified Model of RBS Connection

延性耗能节点的简化模型 1, 梁上弹簧单元设置在塑性铰形成处, 便于模拟节点的塑性区发展及节点连接组件的变形。为简化模型中弹簧单元种类, 可以采用转动弹簧替代拉压弹簧, 得到延性耗能节点的简化模型 2, 如图 3(b) 所示, 同样可以模拟节点域的剪切变形, 只是弹簧的刚度设置有所区别。若节点域刚度足够强, 节点简化模型可以采用如图 3(c) 所示的简化模型 3。若为普通节点, 图 3 中各模型的梁弹簧单元需设置在梁端, 以模拟节点实际塑性区的发展位置。

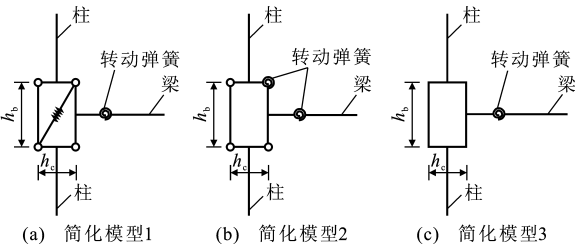


图 3 延性节点简化模型

Fig. 3 Simplified Models of Ductile Connections

2 节点试验研究

文献[12]~[15]试验研究中 3 种节点均为边柱节点, 图 4 给出了节点试验模型简图, 各节点在试验中所采用的约束形式一致, 均通过控制梁端变幅值位移来施加荷载, 但具体的约束手段不尽相同, 试验数据后处理中, 节点转角采用梁端位移法计算, 即定义梁端竖向位移与梁轴线长度的比值为节点转角, 节点处弯矩由梁端荷载与梁轴线长度的乘积计算。

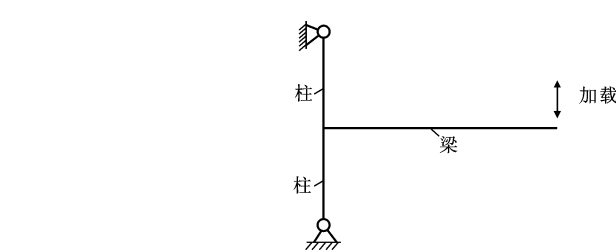


图 4 节点试验模型

Fig. 4 Test Model of Connection

3 种延性耗能节点分别为梁截面热处理型节点 (HBS 节点)^[12]、盖板加强型节点 (CPC 节点)^[13-14]和翼缘过渡板加强型节点 (FPC 节点)^[14-15], 各节点模型见图 5, 各节点梁柱截面尺寸见表 1。

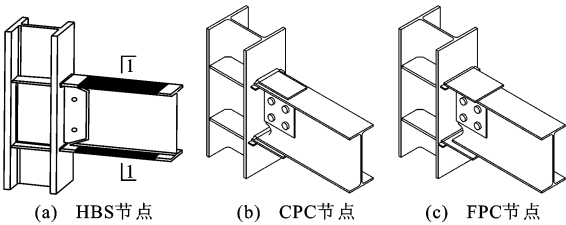


图 5 节点模型

Fig. 5 Models of Connections

2.1 HBS 节点

HBS 节点是由美国北卡罗莱纳州立大学 Hassan 等^[5]提出的一种新型延性耗能节点, 在离开梁柱连接一定距离处对部分梁上下翼缘进行热处理, 图 5(a) 中黑色区域即为梁截面热处理区域, 以截面 1-1 为对称轴对该区域内的梁翼缘进行对称高温处理, 对称轴附近区域温度最高, 可达 1 200 ℃, 边缘区域温度较低, 热处理后材料的力学性能发生改变, 即利用材料高温处理后其屈服应力及强度极限均降低的特点来实现塑性铰外移, HBS 节点尽管表面上没有材料的削减, 但其耗能机理类似 RBS 节点, 可以将其归类为削弱型节点。美国北卡罗莱纳州立大学的 CFL 实验室进行了 HBS 节点试验研究^[12], 试验结果见图 6。

2.2 CPC 节点

图 5(b) 中所示的 CPC 节点是在靠近节点处的梁端上下翼缘分别焊接一定尺寸的盖板来加强梁端翼缘, 通过加强梁端翼缘迫使塑性铰在远离梁柱节

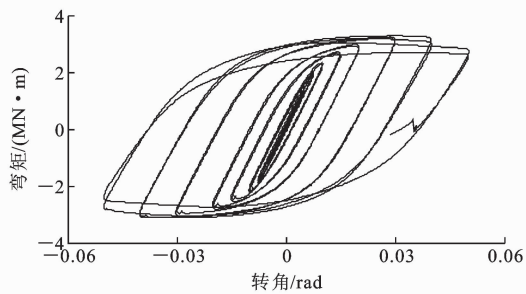
表 1 节点梁柱截面尺寸

Tab. 1 Section Dimensions of Connection Columns and Beams

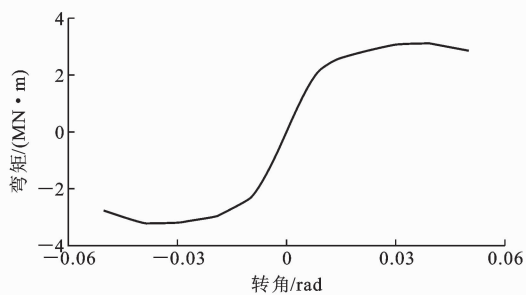
节点类型	梁截面尺寸	柱截面尺寸
HBS 节点	779 mm×266 mm×16.5 mm×30 mm	416 mm×406 mm×30 mm×48 mm
CPC 节点	300 mm×150 mm×6.5 mm×9 mm	250 mm×250 mm×9 mm×14 mm
FPC 节点	300 mm×150 mm×6.5 mm×9 mm	250 mm×250 mm×9 mm×14 mm



(a) 破坏形态



(b) 滞回曲线



(c) 骨架曲线

图 6 HBS 节点试验结果

Fig. 6 Test Results of HBS Connection

点区域形成,避免节点出现脆断。盖板加强型节点试验研究在青岛理工大学结构实验室完成^[13],试验结果见图 7。

2.3 FPC 节点

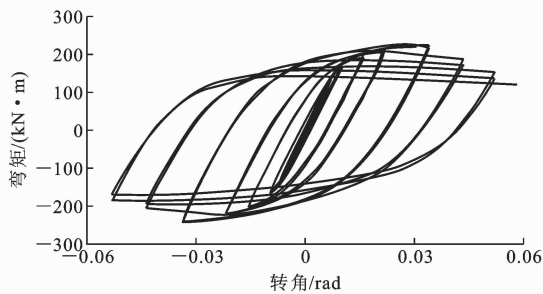
图 5(c)中所示 FPC 节点的构造特征是梁翼缘和柱翼缘不直接连接,而是通过加强板与柱翼缘相连,梁端弯矩通过加强板传递到柱上,与盖板加强型节点的设计思路一样,两者都是通过加强梁端刚度使得塑性铰外移。翼缘过渡板加强型节点试验研究在青岛理工大学结构实验室完成^[15],试验结果见图 8。

3 节点转角

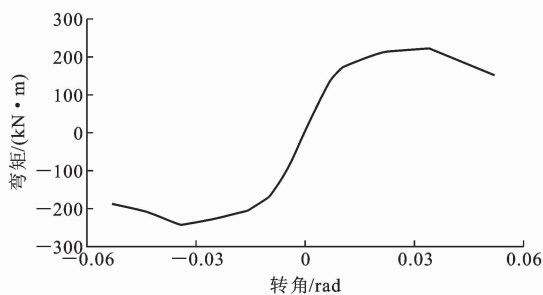
按照节点转角的理论定义,钢框架梁柱连接节点的转角为梁与柱轴线间夹角变化值,图 9 给出了试验中节点转角计算示意图,其中, l 为梁的长度, θ 为节点转角, Δ 为梁端竖向位移, F 为力。为进一步分析节点域的剪切变形,图 9(b)中保留了节点域,



(a) 破坏形态



(b) 滞回曲线



(c) 骨架曲线

图 7 CPC 节点试验结果

Fig. 7 Test Results of CPC Connection

梁、柱用简化加粗轴线替代,为和试验分析一致,图 9(b)中将变形后梁轴线端部平移到节点域中心处分析梁端转角,为便于分析节点域变形,将节点域的变形过程分 2 步说明,首先节点域跟随梁、柱完成转动,其次是本身发生剪切变形,由于节点域的剪切变形,导致梁端和柱端转角也发生变化,存在以下关系式

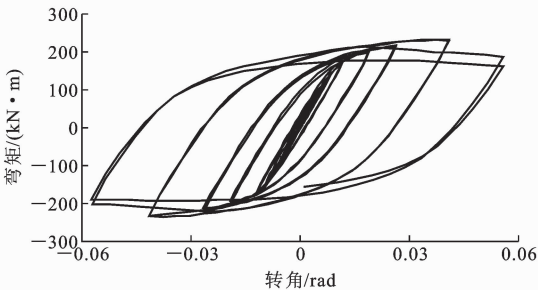
$$\theta'_c = \theta_c - \gamma_1, \theta'_b = \theta_b + \gamma_2, \gamma = \gamma_1 + \gamma_2 \quad (1)$$

式中: θ'_c, θ'_b 分别为节点域发生剪切变形时柱端转角和梁端转角; θ_c, θ_b 分别为节点域仅发生转动时柱端转角和梁端转角; γ 为节点域的总剪切角; γ_1, γ_2 分别为节点域发生剪切变形时横向和纵向剪切角。

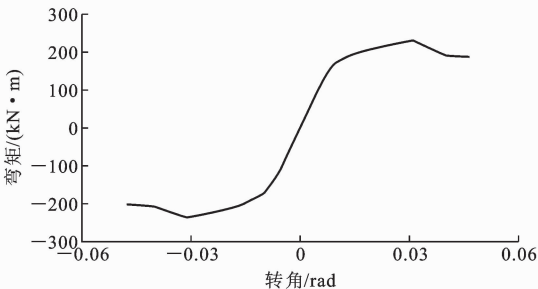
在节点试验中,若不考虑节点域剪切变形,梁端位于 A' 处,梁端所对应转角为 θ_b ,若考虑节点域的剪切变形,梁端位于 A 处,梁端所对应的转角为 θ'_b ,可见考虑节点域剪切变形后,梁端位移增加,相应的梁端转角也增大,因此在理论计算中节点域的剪切



(a) 破坏形态



(b) 滞回曲线



(c) 骨架曲线

图 8 FPC 节点试验结果

Fig. 8 Test Results of FPC Connection

变形不应忽略。

试验数据后处理中节点转角 θ 定义为

$$\theta = \frac{\Delta}{l + h_c/2} \quad (2)$$

从图 9(b)中可以看出,由试验^[12-13,15]得到的节点转角 θ 介于 θ_b 和 θ'_b 之间,试验得到的节点总转角应为层间位移角,假定节点为完全刚性,梁端转角和柱端转角相等。

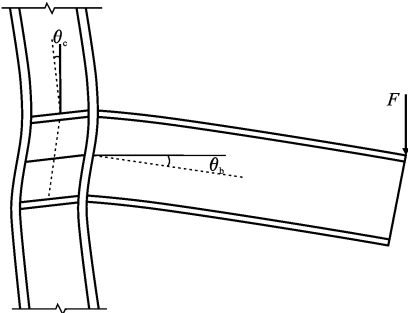
按照节点转角的定义有

$$\theta = \theta'_b - \theta_c \quad (3)$$

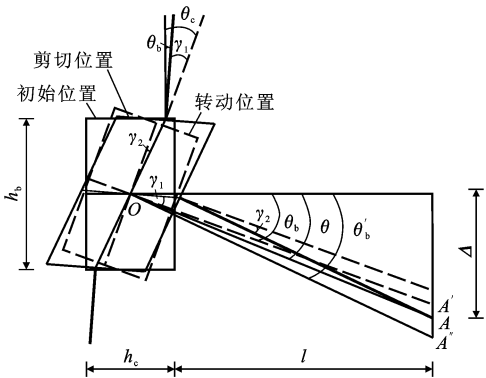
将式(1)代入式(3)中得到

$$\theta = \theta_b - \theta_c + \gamma \quad (4)$$

若节点完全刚性,认为 $\theta_b = \theta_c$,节点转角即为节点域的剪切角,研究表明,梁柱连接节点的刚度大多介于刚接和铰接之间^[16],梁端转角、节点域剪切角



(a) 节点变形1



(b) 节点变形2

图 9 节点及节点域变形

Fig. 9 Deformations of Connection and Panel Zone

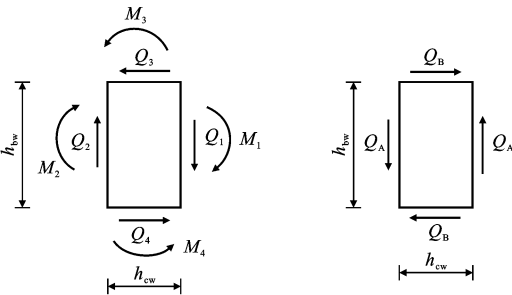
以及柱端转角等都会影响节点的总转角,节点域的剪切变形在节点总转角中占有较大的比例^[10,12]。

4 节点域及梁的弹簧单元刚度

简化模型中合理确定弹簧单元刚度是计算中最关键问题,针对不同的节点简化模型,弹簧刚度设置有所不同,但均通过广义力-广义位移关系确定。

4.1 剪切角计算

在侧向力作用下,假定梁端、柱端弯矩分别由梁翼缘和柱翼缘承担,同时忽略其他因素影响,节点域的变形主要为纯剪切变形,节点域受力分析如图 10 所示。



(a) 受力分析

(b) 等效分析

图 10 节点域受力分析

Fig. 10 Force Analysis of Panel Zone

等效剪力和梁端内力、柱端内力关系如下

$$Q_A = (M_3 + M_4)/h_{cw} - (Q_1 + Q_2)/2 \quad (5)$$

$$Q_B = (M_1 + M_2)/h_{bw} - (Q_3 + Q_4)/2 \quad (6)$$

式中: M_1, M_2 均为梁端弯矩; M_3, M_4 均为柱端弯矩; Q_1, Q_2 均为梁端剪力; Q_3, Q_4 均为柱端剪力; Q_A 为梁端等效剪力; Q_B 为柱端等效剪力; h_{cw}, h_{bw} 分别为柱腹板高度和梁腹板高度。

对边柱节点, 式(5), (6)中 $M_2 = 0, Q_2 = 0$ 。

节点域剪切变形如图 11 所示, 由图 11(a) 可以看出, $ABDC$ 为节点域初始状态, $A'B'D'C'$ 为节点域纯剪切变形后的状态, 不考虑转动。为方便计算, 可将剪切变形 $A'B'D'C'$ 分 2 种情况分别进行分析, 在图 11(b) 中将 A 点固定, 节点域剪切变形可由 $ABEC'$ 状态和 $AB'FC$ 状态合成而得, 相当于图 11(a) 中的初始状态平移到 A' 处, 同样, 图 11(c) 中将 B 点固定, 节点域剪切变形由 $ABD'H$ 状态和 $A'BDG$ 状态合成而得, 相当于图 11(a) 中的初始状态平移到 B' 处。

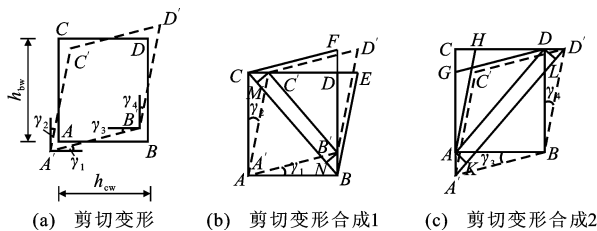


图 11 节点域剪切变形

Fig. 11 Shear Deformation of Panel Zone

在图 11(b) 做 $C'M$ 和 $B'N$ 垂直于 BC , 在弹性范围内剪切变形较小时, 存在如下关系

$$\left. \begin{aligned} \gamma_1 &\approx \frac{L_{BB'}}{h_{cw}} \\ \gamma_2 &\approx \frac{L_{CC'}}{h_{bw}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: $L_{BB'}, L_{CC'}$ 分别为线段 BB', CC' 的长度, 其余同。

根据三角形对应关系得到

$$\left. \begin{aligned} L_{CC'} &= \frac{L_{CM}\sqrt{h_{bw}^2 + h_{cw}^2}}{h_{cw}} \\ L_{BB'} &= \frac{L_{BN}\sqrt{h_{bw}^2 + h_{cw}^2}}{h_{bw}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\gamma' = \gamma_1 + \gamma_2 = \frac{\delta_1\sqrt{h_{bw}^2 + h_{cw}^2}}{h_{bw}h_{cw}} \quad (9)$$

式中: $\delta_1 = L_{CM} + L_{BN}$, 即为沿 BC 对角线的缩短量。

同样在图 11(c) 中做 AK 和 DL 垂直于 $A'D'$, 在弹性范围内剪切变形较小时, 存在如下关系

$$\left. \begin{aligned} \gamma_3 &\approx \frac{L_{AA'}}{h_{cw}} \\ \gamma_4 &\approx \frac{L_{DD'}}{h_{bw}} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: γ_3, γ_4 分别为节点域发生剪切变形时 B' 处横向和纵向剪切角。

根据三角形对应关系得到

$$\left. \begin{aligned} L_{AA'} &= \frac{L_{A'K}\sqrt{h_{bw}^2 + h_{cw}^2}}{h_{bw}} \\ L_{DD'} &= \frac{L_{D'L}\sqrt{h_{bw}^2 + h_{cw}^2}}{h_{cw}} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$\gamma'' = \gamma_3 + \gamma_4 = \frac{\delta_2\sqrt{h_{bw}^2 + h_{cw}^2}}{h_{bw}h_{cw}} \quad (12)$$

式中: $\delta_2 = L_{A'K} + L_{D'L}$, 即为沿 AD 对角线的伸长量。

将式(9)和式(12)中的剪切角取平均值, 得到剪切角和伸缩量的关系, 即^[7]

$$\gamma = \frac{\gamma' + \gamma''}{2} = \frac{\delta\sqrt{h_{bw}^2 + h_{cw}^2}}{h_{bw}h_{cw}} \quad (13)$$

式中: $\delta = (\delta_1 + \delta_2)/2$, 即为节点域沿对角线伸长量和缩短量的平均值。

试验中沿节点域对角线布置位移计可测得节点域对角线的伸缩量。

4.2 节点域的弹簧刚度

图 3(a) 与图 3(b) 两种简化模型最大区别在于节点域处的弹簧性质不同, 一种为轴向拉压弹簧, 一种为转动弹簧, 弹簧性质改变且其刚度设置方式也不相同。

图 3(a) 中轴向拉压弹簧刚度由 $F-\delta$ 对应关系给出, 根据图 10(b) 的受力分析得到拉压弹簧的力 F 为

$$F = \sqrt{Q_A^2 + Q_B^2} \quad (14)$$

δ 为对角线的伸缩量, 依据式(13)可以得到

$$\delta = \frac{\gamma h_{bw} h_{cw}}{\sqrt{h_{bw}^2 + h_{cw}^2}} \quad (15)$$

图 3(b) 所示节点域转动弹簧刚度由 $M_\gamma-\gamma$ 关系给出, 根据弹簧所处的位置可以确定, 即

$$M_\gamma = Q_A h_{cw} = Q_B h_{bw} \quad (16)$$

4.3 梁的弹簧刚度

对于图 1 所示的普通节点简化模型, 弹簧布置在梁端, 其刚度可直接根据节点处的弯矩-转角关系来定义; 图 3 所示的简化模型中, 梁弹簧均设置在塑性铰处, 不能直接根据节点处弯矩-转角关系确定, 需要根据塑性铰的位置适当调整弯矩和转角。假设削弱型节点或加强型节点形成的塑性铰与柱翼缘的

距离为 e , 节点中心处弯矩为 M_c , 塑性铰处弯矩为 M_p , 见图 12。

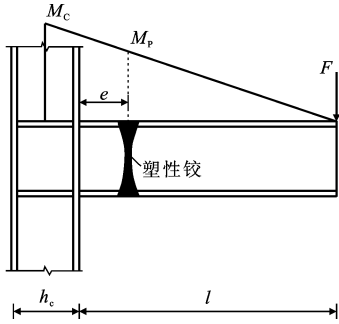


图 12 塑性铰位置

Fig. 12 Location of Plastic Hinge

分析图 12 可得 M_c 和 M_p 分别为

$$M_c = F(l + h_c/2) \quad (17)$$

$$M_p = F(l - e) = \frac{M(l - e)}{l + h_c/2} \quad (18)$$

梁端位移 Δ 包含弹性位移 Δ_e 和塑性位移 Δ_p , 节点转角 θ 包含弹性转角 θ_e 和塑性转角 θ_p , 存在如下关系

$$\left. \begin{aligned} \Delta &= \Delta_e + \Delta_p \\ \theta &= \theta_e + \theta_p \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

梁的抗弯刚度为 EI , 梁端弹性位移和节点弹性转角可以按照下式计算

$$\Delta_e = \frac{F(l + h_c/2)^3}{3EI} \quad (20)$$

$$\theta_e = \frac{F(l + h_c/2)^2}{3EI} \quad (21)$$

梁端塑性位移和节点塑性转角可按式计算

$$\left. \begin{aligned} \Delta_p &= \Delta - \Delta_e \\ \theta_p &= \frac{\Delta_p}{l + h_c/2} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

根据节点转角计算公式, 可以得到塑性铰处的转角 θ' 为

$$\theta' = \frac{F(l - e)^2}{3EI} + \frac{\theta_p(l - e)}{l + h_c/2} \quad (23)$$

图 9 中梁的弹簧单元刚度由 $M_p - \theta'$ 关系确定, 根据式(18), (23)分别计算 HBS 节点、CPC 节点和 FPC 节点塑性铰处的弯矩-转角骨架曲线, 如图 13 所示。

5 对比分析

利用 ANSYS 分别对以上 3 种延性耗能节点进行有限元数值分析, 节点约束见图 4。HBS 节点材料为美国标准 A992 钢, 它是一种高强度、低合金钢, 下屈服强度为 345 MPa, 上屈服强度为 450

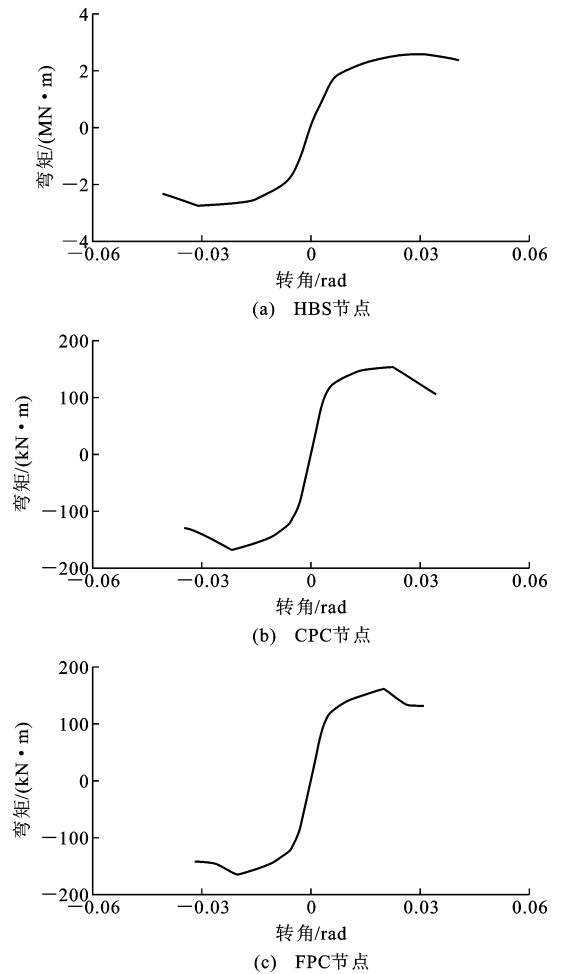


图 13 弯矩-转角骨架曲线

Fig. 13 Moment-rotation Skeleton Curves

MPa, 适用于强震地区; CPC 节点和 FPC 节点材料为 Q235, A992 钢和 Q235 材料的弹性模量均为 200 GPa。试验中 HBS 节点的几何尺寸为足尺, 梁轴线长度为 3.612 m, 柱高为 3.66 m, 塑性铰出现在距离柱翼缘表面约 380 mm 处, 高温处理区起始点距离柱翼缘 178 mm^[12]; 盖板加强型节点和翼缘过渡板加强型节点均选用 1:2 缩尺比例, 梁轴线长和柱高均为 1.5 m, CPC 节点塑性铰约在距离柱翼缘表面 320 mm 处形成^[13], 其中盖板长度为 250 mm, FPC 节点塑性铰约在距离柱翼缘表面 325 mm 处形成, 其中翼缘板截面尺寸为 250 mm × 250 mm^[15], 各节点的梁柱截面尺寸见表 1。

有限元模型采用 Beam188 单元划分网格, 弹簧单元采用非线性 Combin39 单元模拟, 由于梁上的 Combin39 弹簧单元不能模拟荷载的下降段, 所以在实际的有限元计算中只计算了荷载的上升段, 试验中节点域上的弹簧单元均处于弹性阶段, 且变形很小。HBS 节点有限元模型及加载最后一步时的

竖向位移云图见图 14。

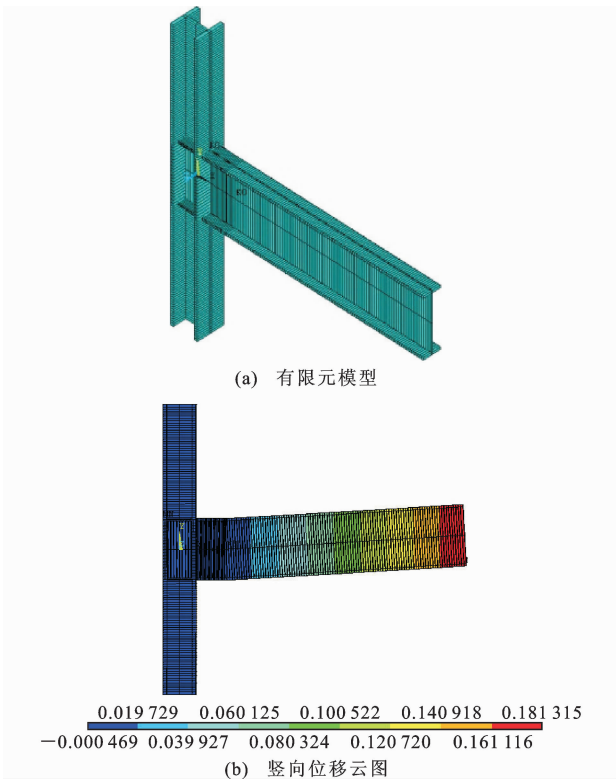


图 14 HBS 节点有限元计算结果(单位:m)
Fig. 14 Finite Element Calculation Results of HBS Connection (Unit:m)

为充分对比有限元数值计算结果和试验结果,有限元计算中节点的转角和弯矩采用的计算方法和试验中的计算方法一致,各节点的弯矩-转角滞回曲线对比见图 15。

从图 15 可以看出:采用简化模型计算的节点弯矩-转角滞回曲线和试验的滞回曲线有一致的变化规律,HBS 节点的弯矩-转角滞回曲线在荷载上升段吻合得较好,有限元数值计算的极限荷载比试验结果小 2.8%,但 CPC 节点和 FPC 节点极限荷载的有限元计算结果与试验结果差别略大,2 种节点数值计算的极限荷载均比试验结果高约 23.4%,后 2 种加强型节点的计算结果与试验数据采集精确度有一定关系,总体来说,利用节点简化模型可以较好地分析延性耗能节点的力学性能。

6 结 语

(1)提出的节点简化模型考虑了节点域剪切变形以及连接构件的变形。节点简化模型中弹簧单元刚度由广义力-广义位移曲线定义,可通过试验或有限元数值计算结果获取,弹簧本构关系设置是简化模型中的关键问题。

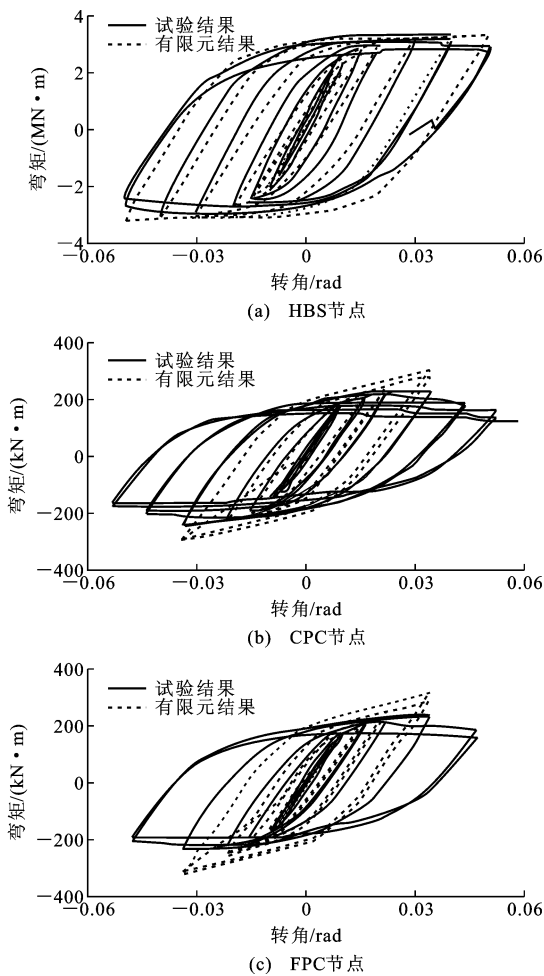


图 15 各节点弯矩-转角滞回曲线对比
Fig. 15 Comparison of Moment-rotation Hysteresis Curves of Connections

(2)综合比较试验结果和有限元数值计算结果可知,二者节点滞回曲线荷载上升段规律基本一致,HBS 节点极限荷载有限元计算结果与试验结果相差 2.8%,几乎一致,但 CPC 节点和 FPC 节点的有限元计算结果与试验结果差别稍大,总体看来,利用节点简化模型分析延性耗能节点的滞回性能是可行的,后续可以进一步对加强型节点试验研究和节点简化理论模型进行深入研究。

(3)该节点简化模型可用于钢框架节点抗震性能分析以及整体钢框架结构计算分析,尤其对高层钢框架结构可简化计算过程。

参考文献:

References:

[1] GUPTA A, KRAWINKLER H. Prediction of Seismic Demands for SMRFs with Ductile Connections and Elements[R]. Sacramento: SAC, 1999.
[2] LEE K. Performance Prediction and Evaluation of

- Steel Special Moment Frames for Seismic Loads[D]. Urbana-Champaign: University of Illinois, 2000.
- [3] 郁有升, 王 燕. 钢框架梁翼缘削弱型节点力学性能的试验研究[J]. 工程力学, 2009, 26(2): 168-175.
YU You-sheng, WANG Yan. Experimental Study on the Mechanical Property of Reduced Beam Section Connections of Steel Frames[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(2): 168-175.
- [4] JONES S L, FRY G T, ENGELHARDT M D. Experimental Evaluation of Cyclically Loaded Reduced Beam Section Moment Connections[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(4): 441-451.
- [5] HASSAN T, SYED S. An Innovative Seismic Performance Enhancement Technique for Steel Building Beam-column Connections[C]//EERI. Proceedings of 9th US National & 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering. Toronto: EERI, 2010: 5049-5058.
- [6] 王 燕, 董立婷. 梁端腋板加强节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(7): 9-17.
WANG Yan, DONG Li-ting. Experimental Study on Seismic Behavior of Haunched Enhanced Joints[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(7): 9-17.
- [7] KIM T, WHITTAKER A S, GILANI A S J, et al. Experimental Evaluation of Plate-reinforced Steel Moment-resisting Connections[J]. Journal of Structure Engineering, 2001, 128(4): 483-491.
- [8] CHEN S J, TU C T. Experimental Study of Jumbo Size Reduced Beam Section Connections Using High-strength Steel[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(4): 582-587.
- [9] 施 刚, 袁 锋, 霍 达, 等. 钢框架梁柱节点转角理论模型和测量计算方法[J]. 工程力学, 2012, 29(2): 52-60.
SHI Gang, YUAN Feng, HUO Da, et al. The Theoretical Model and Measuring Calculation Method of the Beam-to-column Joint Rotation in Steel Frames[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(2): 52-60.
- [10] FAELLA C, PILUSO V, RIZZANO G. Structural Steel Semirigid Connections[M]. Boca Raton: CRC Press, 1999.
- [11] JIN J, EI-TAWIL S. Seismic Performance of Steel Frames with Reduced Beam Section Connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(4): 453-471.
- [12] SCHWEIZER D Q. Experimental Investigation of Innovative Seismic Performance Enhancement Techniques for Steel Building Beam to Column Moment Connections[D]. Raleigh: North Carolina State University, 2013.
- [13] 黑伟伟. 钢框架盖板加强型节点低周反复荷载试验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2010.
HEI Wei-wei. Experimental Study of Steel Frame Cover-plate Reinforced Joints Under Cyclic Loading[D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2010.
- [14] 王 燕, 董立婷. 钢框架加强型节点抗震性能试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(增 1): 94-100.
WANG Yan, DONG Li-ting. Experimental Study and Finite Element Analysis of Seismic Performance on Enhanced Joints in Steel Frame[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(S1): 94-100.
- [15] 冯 双. 钢框架梁端翼缘板式加强型节点力学性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2010.
FENG Shuang. Mechanical Study of Steel Frame Flange-plate Reinforced Joints at Beam-end[D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2010.
- [16] 施 刚, 石永久, 王元清, 等. 多层钢框架半刚性端板连接的试验研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(3): 391-394.
SHI Gang, SHI Yong-jiu, WANG Yuan-qing, et al. Experimental Study on Semirigid End-plate Connections in Multi-story Steel Frames[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2004, 44(3): 391-394.