

文章编号: 1000-5013(2009)03-0309-06

# SRC 框架节点非线性单元模型及试验验证

刘 轩, 郭子雄

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 通过对型钢混凝土(SRC)柱-混凝土(RC)梁组合件试验现象和测量数据的分析, 提出一种较为简化的多分量 SRC 节点单元模型. 该模型的构造方法以节点受力机理为基础, 以考虑节点非线性变形特征为目标, 可以综合考虑节点区域多种变形, 并能应用于组合结构节点的弹塑性全过程分析. 结合此单元模型的传力路径与变形组成特点, 建立与单元模型相对应的简化计算模型, 用于提高模型计算效率. 计算与试验结果比较表明, 提出的组合结构节点单元模型可以较好地模拟节点的非线性反应, 具有较好的计算精度.

**关键词:** 型钢混凝土结构; 节点; 非线性单元模型; 剪切变形

**中图分类号:** TU 31

**文献标识码:** A

在型钢混凝土(Steel Reinforced Concrete, SRC)组合结构框架体系中, 由于型钢的加入, 梁柱节点的受力状态相对混凝土(RC)结构更加复杂. 对于实际结构体系, 抗震设计要求“强节点”, 而根据以往震害经验, 在罕遇地震作用下, 很多建筑的倒塌和严重损坏都是由节点破坏所造成的. 因此, 有必要对节点构件的塑性非线性性能进行深入的研究分析, 建立能够准确反映节点受力变形特征, 尤其是可以反映节点构件屈服之后的非线性性能的单元模型, 帮助工程技术人员对建筑结构体系做出更准确的抗震性能分析. 结构构件计算模型最主要的特征是, 能够正确模拟结构的受力变形特性. 多分量分析模型被广泛应用于国外组合结构节点的分析中, 其中, 最著名的是 Innsbruck 模型<sup>[1]</sup>. 它是一种基于节点各种变形特性, 把节点的所有非线性变形等效成无尺寸、非线性转动弹簧变形的模型. Innsbruck 模型具有模拟直观、计算精确的优点, 但其建立是基于钢梁-钢柱-混凝土板形式的组合结构, 有一定的局限性. 本文对型钢混凝土(SRC)组合结构的节点受力性能和变形特征进行分析, 提出一种多分量节点单元模型<sup>[2]</sup>.

## 1 节点受力机理及其变形特征

试验过程中, SRC 节点典型受力变形状态, 如图 1 所示. 由试验及理论分析, 可以得到如下 3 点合理的节点传力机理.

(1) 节点周边梁柱截面受压混凝土压力及柱型钢受压区压力的合力, 将大部分或全部直接传入节点钢骨腹板核心区, 由节点区型钢腹板、翼缘及加劲肋所构成的钢框部分承担. 即构成型钢部分“框架-剪力墙”机构.

(2) 节点型钢区受压翼缘、加劲肋的压力, 将大部分或全部直接传到节点型钢内核心区混凝土上, 并在大致沿核心区对角线方向形成有一定宽度的混凝土斜压应力带. 即构成传递节点剪力的斜压杆机构.

(3) 柱型钢、梁纵筋、搭接板在节点周边梁柱截面中所受到的拉力和压



图 1 SRC 节点典型受力变形状态

Fig. 1 Typical deformation  
state of SRC joint

收稿日期: 2008-06-13

通信作者: 郭子雄(1967), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事工程结构抗震与防災的研究. E-mail: guozxey@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(E0410024); 福建省重大专项前期研究项目(2005YZ1017); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-06-0571)

力的合力, 将贯穿段粘结效应传入节点区混凝土. 其中, 大部分或全部将以周边剪应力形式传入节点, 并在节点内混凝土中形成相对均匀的剪应力场. 该剪应力场的主压应力始终由型钢和混凝土承担, 主拉应力在导致节点钢骨核心区外部混凝土沿斜向开裂后, 将由节点水平箍筋平行受力方向箍肢和沿受力方向的柱边排列的柱纵筋分担. 即构成节点型钢核心区外部混凝土桁架机构.

由文[3]的结果可以看出 SRC 节点的变形特征. 节点区的变形以节点核心区的剪切变形为主, 而其他变形所占比例很小. 试验过程中, 节点剪切变形比例的第一次增大, 大致对应了试件节点核心区初裂时刻. 随着组合件达到屈服状态, 节点核心区剪切变形继续增大, 当核心区钢骨腹板达到屈服状态时, 节点核心区剪切变形达到最大值.

节点核心区在承受两端梁传递弯矩时, 会产生拉、压变形. 这种变形对组合件总体变形贡献的比例与梁对节点约束程度的强弱成正比. 同时, 节点区变形还包括承受轴力的竖向压缩变形. 由于这几种变形成分相对节点剪切变形所占比例很小, 目前尚未见相关量测的研究报道.

2 节点单元模型

SRC 节点单元可以按照不同的受力变形组成部分进行分解, 得到其多分量有限元分析模型. 在建立模型之前先做如下 4 点假定<sup>[4-6]</sup>: (1) 节点在弹性阶段处于平面应力状态, 且遵守小变形假定; (2) 忽略翼缘框的抗剪作用, 仅考虑型钢腹板的抗剪作用; (3) 忽略钢筋、型钢与混凝土之间的粘结滑移影响; (4) 忽略柱纵筋的销栓作用. 据此, 可以构造考虑横向拉压变形、剪切变形的 SRC 节点多分量单元模型, 如图 2 所示. 其中, 节点剪切变形由集中在单元中间部分的无尺寸剪切弹簧  $k_s$  模拟, 横向拉伸压缩变形由单元上部左右两端的无尺寸转动弹簧  $k_{e,i}$  和单元下端的无尺寸平动弹簧  $k_c$  模拟.

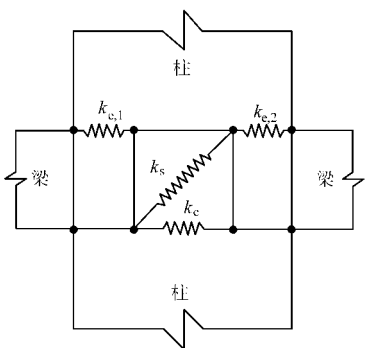


图 2 多分量 SRC 节点单元模型  
Fig. 2 A multi component model for SRC joint

3 节点单元刚度矩阵

对节点进行弹塑性分析, 需要对节点模型建立相应的结构刚度矩阵, 然后, 通过对结构有限元方程的计算得到所需杆端力和杆端变形. 由于节点单元模型中没有建立相关的弹簧单元, 无法用于考虑柱对节点核心区的作用. 所以, 应在建立单元刚度矩阵时, 加入柱对节点核心区的影响作用.

考虑 9 个自由度的节点核心区计算模型, 如图 3 所示. 该模型与单元模型相对应, 其中,  $d$  为节点截面宽度,  $h$  为节点高度. 节点核心区单元的刚度矩阵可由计算模型建立, 其有限元方程可表示为

$$P^e = k^e d^e.$$

上式中,  $k^e$  为单元的切线刚度矩阵,  $P^e$  和  $d^e$  分别为计算模型单元的节点力和节点位移向量.

由于变形的易叠加性, 柔度矩阵的建立往往更容易, 也更方便. 因此, 节点模型的刚度矩阵可通过柔度矩阵的转换得到. 在建立柔度矩阵时, 模型考虑以下 5 点假定变形: (1) 节点核心区剪切变形; (2) 节点区横向拉压变形; (3) 节点核心区钢骨翼缘弯曲变形; (4) 柱弯曲变形对节点区的影响; (5) 柱轴向变形对节点区的影响. 基于以上假设, 由柔度矩阵元素  $f_{ij}$  的定义推导, 可得到单元柔度矩阵各元素.

由图 4 对  $f_{3,3}$  进行推导. 首先, 在杆①右侧施加单位弯矩, 把单位弯矩等效成平行模型上、下杆件的作用力  $1/h$ , 计算模型中各杆件内力. 由各弹簧受力状态可得到机构的总体位移为

$$\Delta = \Delta_s + \Delta_c + \Delta_{e,2} = \frac{1}{hk_s} + \frac{1}{hk_c} + \frac{1}{hk_{e,2}}.$$

其次, 再由位移计算右端杆①的转动角度, 有

$$\theta_3 = \frac{\Delta}{h} = \frac{1}{h^2} \left( \frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_c} + \frac{1}{k_{e,2}} \right).$$

此转角值即对应柔度矩阵元素  $f_{3,3}$ , 其他元素计算依此类推. 柔度矩阵  $F^e$  的具体表达式为

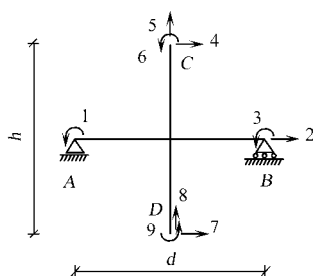


图 3 中节点计算模型

Fig. 3 A calculation model of middle joint

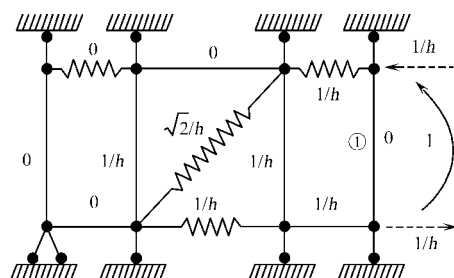
图 4 元素  $f_{3,3}$  的推导

Fig. 4 A deduction of element  $f_{3,3}$

$$\mathbf{F}^e = \begin{bmatrix} f_{1,1} & 0 & f_{1,3} & f_{1,4} & 0 & 0 & f_{1,7} & 0 & 0 \\ & f_{2,2} & 0 & f_{2,4} & 0 & 0 & f_{2,7} & 0 & 0 \\ & & f_{3,3} & f_{3,4} & 0 & 0 & f_{3,7} & 0 & 0 \\ & & & f_{4,4} & 0 & f_{4,6} & f_{4,7} & 0 & 0 \\ & & & & f_{5,5} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \text{对称} & & & & f_{6,6} & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & f_{7,7} & 0 & 0 \\ & & & & & & & f_{8,8} & 0 \\ & & & & & & & & f_{9,9} \end{bmatrix}.$$

$$\mathbf{F}^e = \begin{bmatrix} f_{1,1} & 0 & f_{1,3} & f_{1,4} & 0 & 0 & f_{1,7} & 0 & 0 \\ & f_{2,2} & 0 & f_{2,4} & 0 & 0 & f_{2,7} & 0 & 0 \\ & & f_{3,3} & f_{3,4} & 0 & 0 & f_{3,7} & 0 & 0 \\ & & & f_{4,4} & 0 & f_{4,6} & f_{4,7} & 0 & 0 \\ & & & & f_{5,5} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \text{对称} & & & & f_{6,6} & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & f_{7,7} & 0 & 0 \\ & & & & & & & f_{8,8} & 0 \\ & & & & & & & & f_{9,9} \end{bmatrix}.$$

上式中,  $f_{1,1} = \frac{1}{h^2}(\frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_c} + \frac{1}{k_{e,1}})$ ,  $f_{3,3} = \frac{1}{h^2}(\frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_c} + \frac{1}{k_{e,2}})$ ,  $f_{1,3} = \frac{1}{h^2 k_s}$ ,  $f_{1,4} = f_{3,4} = -\frac{1}{2hk_s}$ ,  $f_{1,7} = f_{3,7} = \frac{1}{2hk_s}$ ,  $f_{2,2} = 2f_{2,4} = 2f_{2,7} = \frac{1}{k_{e,1}} + \frac{1}{k_{e,2}}$ ,  $f_{5,5} = f_{8,8} = \frac{h}{2EA_c}$ ,  $f_{6,6} = f_{9,9} = \frac{h}{2EI_c}$ ,  $f_{4,6} = -\frac{h^2}{8EI_c}$ ,  $f_{4,7} = -\frac{1}{4k_s} + \frac{1}{2k_{e,1}} + \frac{h^3}{24EI_c}$ ,  $f_{4,4} = f_{7,7} = \frac{1}{4k_s} + \frac{1}{2k_{e,1}} + \frac{1}{2k_{e,2}} + \frac{h^3}{24EI_c}$ ;  $k_s$ ,  $k_c$ ,  $k_{e,i}$  分别为单元模型对应弹簧单元的刚度,  $A_c$  为柱截面面积,  $E$  为混凝土弹模,  $I_c$  为柱截面惯性矩. 由柔度矩阵  $F$  并采用公式  $K_b = F^{-1}$ , 可计算得到单元刚度矩阵 ( $9 \times 9$ ). 通过建立转换矩阵  $T$  (参照文[7]), 由公式  $K = TK_bT^T$ , 可得到计算模拟所需的 12 个自由度的总体单元刚度矩阵  $K$ .

#### 4 弹簧单元的恢复力模型

#### 4.1 剪切弹簧单元刚度恢复力模型

采用修正的 Takeda 模型双折线骨架曲线<sup>[8]</sup>, 如图 5(b) 所示. 初始刚度  $k_e = P_y / \Delta_y$ , 屈服后的刚度  $k_{vp} = \alpha_s k_e$ , 其中  $\alpha_s$  为折简系数. 滞回规则如图 5(a) 所示. 卸载和再加载制度如图 5(c) 所示.

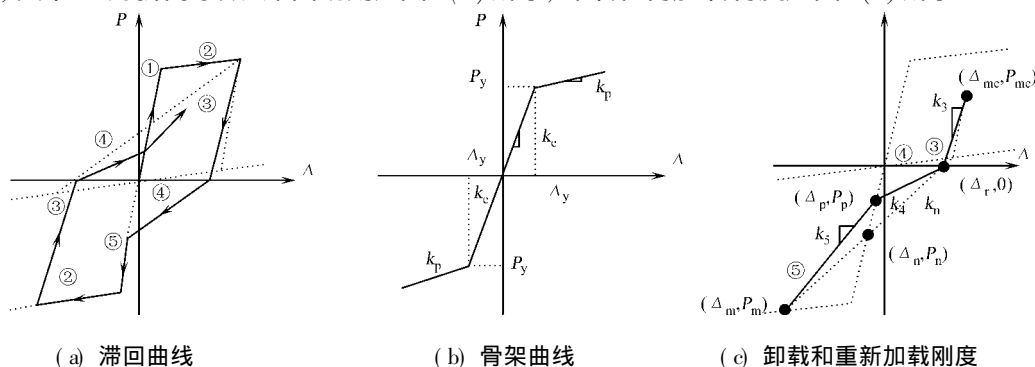


图 5 修正的 Takeda 模型

Fig.5 Modified Takeda model

#### 4.2 剪切弹簧单元刚度恢复力模型特征点确定

按照上述恢复力模型确定剪切弹簧单元刚度( $k_s$ ), 并按照型钢混凝土节点抗剪桁架机构分析计算

特征点的取值. 考虑 SRC 节点剪切屈服状态以型钢屈服为特征, 此时, 节点区斜压杆由混凝土与型钢腹板共同组成. 图 6(a) 的比拟桁架描绘了节点核心区箍筋倾斜布置(与柱纵筋倾角  $\beta$ ) 的一般情况. 它也可以用来表示桁架所承担的外剪力  $V_s$  与各内力之间的关系. 承受压力  $C_d$  的斜压杆与柱纵筋的倾角为  $\alpha$ . 由图 6(a) 中节点 A 的平衡力多边形(图 6(b)), 可得

$$V_s = C_d \sin \alpha = T_s \sin \beta.$$

当  $T_s$  表示所有穿过斜裂缝的箍筋和腹板受拉内力之合, 其在节点区单位长度内承受的力为  $T_s/s$ . 有

$$\frac{T_s}{s} \cdot \frac{A_v f_s}{s} \approx \frac{V_s}{d \sin \beta (\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{ctg} \beta)}.$$

式中,  $A_v$  为沿节点高度按间距  $s$  布置的箍筋与型钢腹板截面面积之合,  $d$  为节点宽度. 为方便, 取  $f_s$  近似为型钢腹板应力. 结合桁架模型, 当取  $\alpha = 45^\circ, \beta = 90^\circ$  时, 推导出应力  $f_s$  的表达式为  $f_s = V_s s / d A_v$ .

因此, 这部分箍筋与腹板的总体伸长值为

$$\Delta_s = \frac{f_s}{E_s} d = \frac{V_s s}{E_s A_v}.$$

计算斜压杆等效宽度  $b_w$  时, 将型钢腹板等效成混凝土, 可得到

$$b_w = b + \frac{t E_s}{E}.$$

式中,  $b$  为梁截面有效宽度,  $t$  为腹板厚度,  $E_s$  为型钢腹板弹模.

由桁架机构产生的斜压应力可以近似地表示为

$$f_{cd} = \frac{C_d}{b_w h_s} = \frac{V_s}{b_w h_s \sin \alpha}.$$

其中,  $h_s$  为斜压杆区高度, 有

$$h_s \approx s \times \sin \alpha$$

因此, 斜压杆的压缩值即为

$$\Delta_c = \frac{f_{cd}}{E} \sqrt{2} h = \frac{2 V_s h}{E b_w h_s}.$$

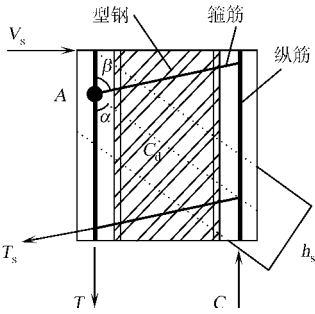
其中,  $h$  为节点高度;  $E$  为混凝土弹模.

由于只须确定节点核心区的剪切变形, 假定弦杆  $x$  为无限刚性, 即弦杆的截面积为无穷大. 规定箍筋的伸长值为  $\Delta_s$ , 斜压杆的压缩值为  $\Delta_c$ . 按图 6(c) 可求出剪切变形为

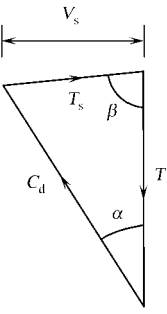
$$\Delta = \Delta_s + \Delta_c = \Delta_s + \sqrt{2} \Delta_c.$$

所以, 节点核心区的剪切变形为

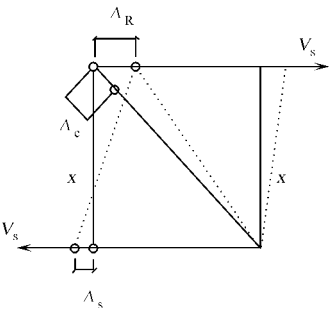
$$\theta_k = \frac{\Delta}{h} = \frac{1}{h} \left( \frac{V_s s}{E_s A_v} + \frac{2 \sqrt{2} V_s}{E b_w h_s} \right).$$



(a) 节点比拟桁架模型



(b) 节点 A 的平衡力多边形



(c) 剪切变形

图 6 节点区桁架模型的分析

Fig. 6 Analysis of truss model in joint

假设节点区为具有  $45^\circ$  斜裂缝, 则构件按桁架作用考虑的抗剪刚度就是  $\theta = 1$  时的  $V_s$  值. 此时,  $C_d$  值即为模型弹簧  $k_s$  的刚度值. 取  $f_s = f_y$  并带入上述公式, 可计算出节点屈服特征点. 考虑到极限破坏阶段混凝土的极限压应变, 以及相应的应力-应变关系的确定存在许多不确定因素, 为简化<sup>[9]</sup>, 直接采

用《YB 9082- 1997 钢筋混凝土结构技术规程》的计算方法, 通过材性试验得到钢材极限抗拉强度计算节点极限抗剪承载力. 计算结果误差控制在 5% 以下, 可为工程界所接受. 同时, 由试验结果并经过对弹簧  $k_s$  在塑性阶段的刚度值的分析和试算( 推荐取  $\alpha_s= 0.15$ ), 可得到弹簧  $k_s$  屈服后刚度  $k_p$  的取值.

由于 SRC 节点区这两种弹簧对应得变形很小, 考虑  $k_c, k_{e,i}$  仅处于线弹性状态, 因此, 弹簧  $k_c, k_{e,i}$  的刚度选取, 可以参照文[ 10] 建议取定值进行估算.

## 5 模型的验证

### 5.1 SRC 组合结构节点试验概况

试件与原型的几何比例为 1 : 2, 梁反弯点之间距离为 2. 4 m, 柱反弯点之间距离为 1. 8 m, 轴压力系数为 0. 25, 梁截面尺寸为 200 mm  $\times$  250 mm, 柱截面尺寸为 250 mm  $\times$  250 mm, 试件的截面特征如表 1 所示. 试件 SRCJ3 和 SRCJ4 的混凝土立方体抗压强度分别为 46. 8 MPa 和 43. 5 MPa.

表 1 试件参数

Tab. 1 Parameters of the specimen

试件编号	梁			柱		节点
	纵筋	箍筋	型钢	纵筋	箍筋	核心区箍筋
SRCJ3	4 $\Phi$ 14+ 4 $\Phi$ 16	$\Phi$ 6@ 100	HW 125 $\times$ 125	4 $\Phi$ 12	$\Phi$ 6@ 100	$\Phi$ 6@ 100
SRCJ4	4 $\Phi$ 14+ 4 $\Phi$ 16	$\Phi$ 6@ 100	HW 125 $\times$ 125	4 $\Phi$ 12	$\Phi$ 6@ 100	$\Phi$ 6@ 150

图 7 为试验装置, 考虑  $P-\Delta$  效应的影响, 试验采用柱端水平加载方式, 竖向荷载由液压千斤顶作用于柱顶. 竖向千斤顶前端球铰和柱底球铰允许柱顶与柱脚沿加载方向转动, 两侧梁端分别设有带上下轴承的拉杆与台座相连, 以模拟组合件边界条件. 节点核心区部分的主要试验结果, 如表 2 所示. 表 2 中,  $P$  为层间剪力,  $\gamma$  为节点剪切变形.

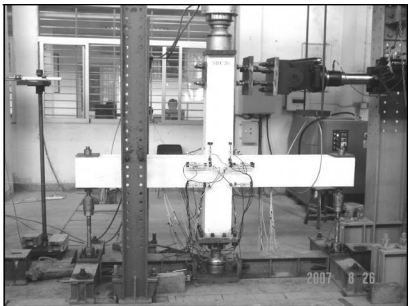


图 7 试验装置

Fig. 7 Rest setup

表 2 主要试验结果

Tab. 2 Main experimental results

试件	$P_{\alpha}/\text{kN}$	$\gamma_{\alpha}/\text{mrad}$	$P_y/\text{kN}$	$\gamma_y/\text{mrad}$	$P_{\max}/\text{kN}$	$P_u/\text{kN}$	$\gamma_u/\text{mrad}$
SRCJ3	68. 6	0. 50	78. 6	1. 7	92. 8	78. 9	4. 1
SRCJ4	67. 5	0. 48	80. 6	1. 4	88. 2	74. 9	3. 4

### 5.2 模拟计算对比

为了验证本文提出的节点单元模型, 根据所提出模型对试验的 SRC 组合件试件 SRCJ3, SRCJ4 进行非线性分析. 采用对比层间剪力- 节点剪切变形层间位移的骨架曲线进行验证, 节点剪切变形层间位移的确定参见文[ 3]. 由于试验构件最终破坏状态为“节点剪切- 梁端弯剪破坏”, 忽略了节点区横向拉压变形单元, 所以模拟时只考虑剪切变形单元. 所得到的“层间剪力- 节点剪切变形层间位移”骨架曲线的对比结果, 验证了模型的可行性, 如图 8 所示.

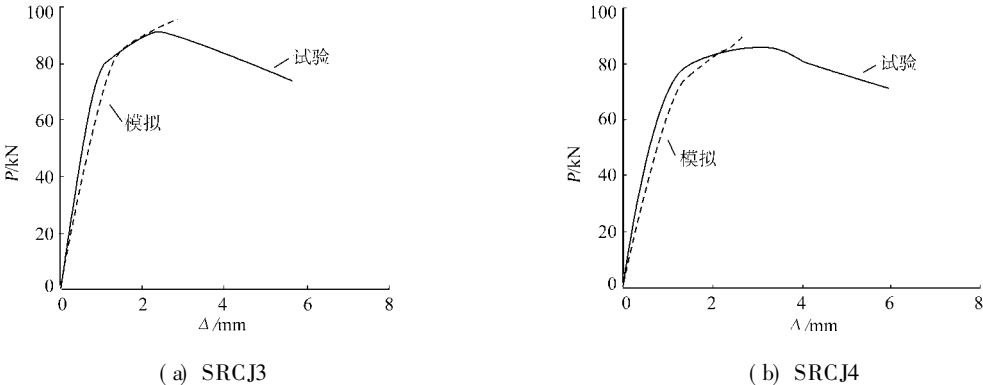


图 8 计算与试验结果的比较

Fig. 8 Comparisons between the analytical and experimental results

## 6 结束语

提出的节点单元模型能够考虑 SRC 节点在复杂应力状态下, 节点区横向拉压变形和节点剪切变形, 并能够对 SRC 节点进行非线性全过程分析. 建立了与节点单元模型对应的简化计算模型, 可以有效地建立模型单元的总刚度矩阵, 整个推导过程力学概念明确. 通过模拟分析, 所选取的恢复力模型能较好地反映节点受力变形特性.

### 参考文献:

- [1] HUBER G, TSCHEMMERNEG G F. Modelling of beam to column joints[J]. Constructure of Steel Research, 1998, 45( 2): 199-216.
- [2] 郭子雄, 周素琴. 考虑多种非线性变形的 RC 框架单元模型[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2003, 24( 2): 156-161.
- [3] 庄云. SRC 柱 RC 梁组合件抗震性能试验研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2007.
- [4] BAYO E, CABRERI J M, GIL B. An effective component based method to model semi rigid connections for the global analysis of steel and composite structures[J]. Engineering Structures, 2006, 28: 97-108.
- [5] GAIL F K, KAREN C C. Partial resistance factor design on steel concrete beam columns[J]. Engineering Structures, 2004, 26: 857-866.
- [6] RASSATI G A, LEON R T. Component modeling of partially restrained composite joints under cyclic and dynamic loading[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130( 2): 343-351.
- [7] MCGUIRE W, GALLAGHER R, ZIEMIAN R. Matrix structural analysis[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1979.
- [8] TOHMA J, HWANG H. Hysteretic model for reinforced concrete containment[C] // Transactions of the 9th International SMIRT Conference. Lousanne [s. n. ], 1987: 25-256.
- [9] 郭子雄, 庄云, 刘阳. SRC 节点受力性能试验与抗剪强度计算方法比较[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39( S2): 428-434.
- [10] Structural Steelwork Eurocodes Development of a Trans National Approach. Eurocodes for composite structures [S]. [s. l.]: SSEDTA, 2001.

## A Multi-Component Joints Model for Analyzing the Nonlinear Response of SRC Composite Structures

LIU Xuan, GUO Zixiong

( College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** Based on the experimental results of the joints of the steel reinforced concrete (SRC) column and reinforced concrete (RC) beam, a new multi component joint model is proposed. The model considers the two aspects, the resistance mechanism of SRC joints, the nonlinear deformation behavior of the joint respectively, which can be used to analyze the elastic plastic overall response of SRC joints. To improve the calculation efficiency, a simplified calculation model is also established, which considers the loading path and deformation behavior of the joint model. The comparison of the experimental and analytical results indicates that this joint model can simulate properly the nonlinear response of SRC joints with good accuracy.

**Keywords:** steel reinforced concrete structures; joints; nonlinear multi component model; shear deformation

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)