

文章编号: 1000-4750(2011)08-0099-07

# 基于 ADINA 的 CSRC 节点抗震性能有限元模拟

\*刘 阳, 郭子雄

(华侨大学土木工程学院, 福建, 泉州 362021)

**摘 要:** 进行了 3 个核心型钢混凝土(CSRC)节点在低周反复荷载作用下的抗震性能试验, 研究了核心型钢在节点区的截断锚固形式对试件抗震性能的影响。详细介绍了采用大型通用有限元软件 ADINA 对 CSRC 节点试件进行非线性有限元模拟的关键技术, 通过该文完成的 3 个试件对程序进行验证。计算结果表明, 该文使用的有限元模型可以合理的反应 CSRC 节点的受力特征, 计算所得的材料应力状态、混凝土裂缝发展趋势和试件骨架曲线等结果与试验吻合良好。在此基础上分析了核心型钢在节点区的锚固构造、混凝土强度和强节点系数等参数对 CSRC 节点性能的影响。参数分析表明: 强节点系数降低, 试件强度增加, 但变形能力减小。核心型钢在节点区的锚固面积增加, 试件强度和变形能力增加。该文成果可为 CSRC 结构的工程实践提供参考。

**关键词:** 核心型钢混凝土节点; 试验研究; ADINA; 有限元分析; 节点构造

中图分类号: TU398 文献标志码: A

## FEM ANALYSIS OF THE SEISMIC BEHAVIOR OF CSRC JOINTS WITH ADINA

\*LIU Yang, GUO Zi-xiong

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

**Abstract:** Three core steel reinforced concrete (CSRC) joints were tested under cyclic loading to investigate the effect of truncation and embedded details of core steel in joint core to the seismic performance of the specimens. The FEM method used in this paper to simulate the CSRC joints with ADINA was introduced and three tested CSRC joints were simulated to verify the program. It was indicated that the calculated results, including the stress state of material, crack development of concrete and the skeleton curves of specimens, showed good agreement with test results. Based on the program verification, nonlinear finite element analysis of the joints with different anchor details of core steel, concrete strength and strength ratio of joint to beam were carried out. Parameter analysis indicated that the strength of specimens increased with the increase of strength ratio of joint to beam, while the deformation ability of specimens decreased. When the anchor area of core steel in joint core increased, the strength and deformation ability of specimens increased. This paper can provide references for the engineering practice of CSRC structures.

**Key words:** core steel reinforced concrete joint; experimental study; ADINA; FEM analysis; joint core detail

核心型钢混凝土(Core Steel Reinforced Concrete, CSRC)结构是指在普通钢筋混凝土柱截面核心设置含钢率较低的实腹式型钢所形成的新型结构形

式<sup>[1-2]</sup>。该结构形式可有效的提高大轴压比 RC 柱的抗震性能, 突破规范规定的 RC 柱轴压比限值<sup>[3]</sup>, 从而减小柱截面尺寸并避免出现短柱。CSRC 柱与

收稿日期: 2009-12-17; 修改日期: 2010-01-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51006133, 50978107); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-06-0571);

福建省自然科学基金项目(2010J05117, 2010J01298); 厦门市科技计划项目(3502Z20103030); 华侨大学科研基金项目(09BS620)

作者简介: \*刘 阳(1982—), 男, 山东潍坊人, 讲师, 博士, 主要从事工程抗震防灾研究(E-mail: lyliuyang@hqu.edu.cn);

郭子雄(1967—), 男, 福建惠安人, 教授, 博士, 博导, 副院长, 主要从事工程抗震防灾研究(E-mail: guozxcy@hqu.edu.cn).

SRC 柱相比, 由于型钢配钢率较低(2%~3%)、型钢截面高度较小, 梁的纵筋可方便的在节点区贯通, 避免或减少在型钢上打孔, 降低施工难度。与核芯配筋柱相比, 能节省钢筋笼绑扎的工作量和芯柱箍筋的用钢量, 施工方便, 钢材利用率高。与钢结构和钢管混凝土结构相比, 又有抗火性能好、造价低等优点。因此, 在 RC 柱中设置核心型钢, 是 RC 结构重载柱提高抗震性能的主要组合结构形式之一。

组合结构的节点是结构抗震性能研究的重要内容, 国内外学者对不同形式的组合结构节点抗震性能进行了一些卓有成效的研究<sup>[4-9]</sup>, 在组合节点的非线性有限元分析方面也做了大量工作。宗周红等<sup>[7]</sup>提出了考虑局部屈曲和开裂的钢材循环本构关系, 建立了两类方钢管混凝土柱与钢梁连接节点的空间非线性分析模型, 对其在低周反复荷载作用下的滞回性能进行了非线性分析计算。聂建国等<sup>[8]</sup>基于方钢管混凝土柱内隔板式节点及外加加强环式节点的低周反复荷载试验, 对试件进行了单调加载和循环加载作用下的受力性能分析, 并进行了参数分析。申红侠<sup>[9]</sup>等采用 ANSYS 对 5 个“梁贯通”型 RCS 梁柱中节点进行三维非线性有限元分析, 与试验结果吻合良好。这些工作为组合结构的深入研究提供了参考, 而在关于 CSRC 节点的有限元模拟方面, 还未见有相关工作报道。

在实际工程中, 过渡层柱中的核心型钢需要以合适的形式截断, 为研究核心型钢在节点区的不同截断形式对节点抗震性能的影响, 为实际工程提供科学依据, 本文在试验研究<sup>[10]</sup>基础上, 采用大型通用有限元软件 ADINA 对 CSRC 节点进行非线性有限元受力全过程数值模拟和参数分析, 以期对 CSRC 结构的推广应用提供参考。

## 1 试验研究概况

### 1.1 试件概况

制作了 3 个 CSRC 节点试件, 试件取自于常规多层多跨框架结构在侧向荷载作用下相邻梁柱反弯点之间的典型单元。模型与原型的几何比例为 1:2, 梁反弯点之间距离为 2.4m, 柱反弯点之间距离为 1.8m。所有试件配筋均相同(如图 1)。核心型钢尺寸均为  $h_w \times b_f \times t_w \times t_f = 80\text{mm} \times 60\text{mm} \times 10\text{mm} \times 10\text{mm}$ , 在节点核芯区分别采用 2 种构造形式, 如图 2 所示。试件详细参数见表 1。混凝土立方体抗压强度为

43.73MPa, 其他材料性能见表 2。

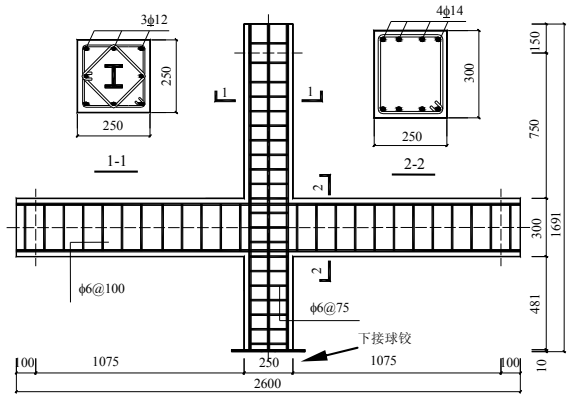


图 1 节点试件尺寸及配筋详图  
Fig.1 Section characteristics and stirrup details

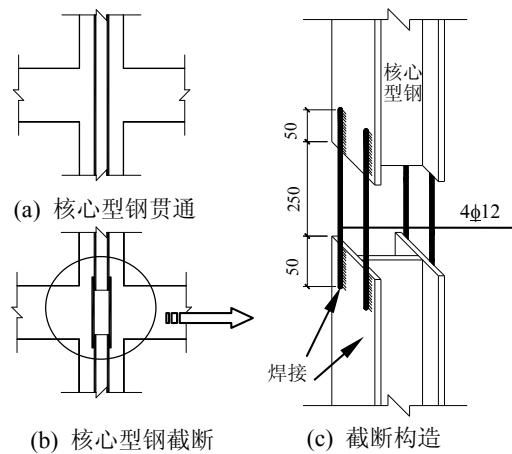


图 2 核心型钢节点核芯区构造示意图  
Fig.2 Details of core steel in joint core

表 1 试件配筋及参数表

Table 1 Parameters of specimens

试件名称	$n$	$\eta_j$	核心型钢节点构造
CSRC-J-1	1.0	0.99	A
CSRC-J-2	1.0	0.88	B
CSRC-J-3	0.9	0.88	B

说明: 表中,  $n$  为试件设计轴压比,  $\eta_j$  为强节点系数, 即节点设计抗剪强度与梁端屈服时节点承受剪力之比<sup>[3]</sup>。核心型钢节点区构造见图 2, 表中 A 对应图 2(a), B 对应图 2(b)。

表 2 材料性能

Table 2 Material properties

材料	$d, t/\text{mm}$	$f_y/\text{MPa}$	$\epsilon_y/\mu\epsilon$	$f_b/\text{MPa}$
纵筋	12	339.9	1700	511.0
	14	380.8	1904	557.8
箍筋	6	303.9	1520	462.5
型钢	10	272.4	1297	395.4

说明: 表中,  $d$  为钢筋直径,  $t$  为型钢厚度,  $f_y$  为屈服强度,  $\epsilon_y$  为屈服应变,  $f_b$  为极限强度。

### 1.2 加载装置及量测方案

为了使试件能够真实反应框架结构的变形情况和  $P-\Delta$  效应, 本课题组研发了柱端加载的试验装

置(如图 3),柱脚通过一个万向铰固定于加载台座上,梁端通过二力杆支撑,以模拟实际框架中的边界条件。柱顶轴力通过 200t 液压千斤顶施加并保持恒定,柱端通过 MTS 伺服作动器施加水平荷载。

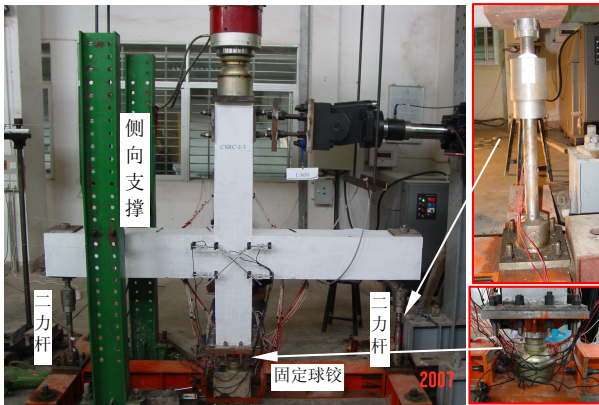


图 3 加载装置  
Fig.3 Test setup

水平荷载和竖向荷载通过压力传感器直接量测。电子位移计主要用于量测柱顶水平力作用点的侧向位移及柱底可能发生的滑移。钢筋、型钢应变采用 3mm×5mm 电阻应变片及应变花量测。纵筋应变片布置在梁端塑性铰区域,箍筋应变片用来测量可能发生的剪切变形和侧向膨胀。所有力、位移和应变信号均通过 MTS-GT 控制系统和 DH3816 数据采集仪自动采集。

施加水平荷载前,先施加预定竖向荷载,并保持恒定。水平加载采用低周往复静力加载制度,采用位移控制,屈服前每个幅值循环一次,屈服后每个幅值循环三次。

### 1.3 主要试验结果

#### 1.3.1 破坏形态

3 个试件的破坏过程及试验现象相似,均经历了梁端初裂→节点初裂→梁纵筋屈服→节点核心区箍筋屈服→梁端弯曲裂缝贯通→节点剪切裂缝贯通,试件最终由于节点核心区混凝土的剪切破坏而导致承载的降低并最终失效。由于梁端纵筋均达到不同程度的强化,弯曲变形显著,典型试件的极限破坏状态如图 4 所示。

#### 1.3.2 滞回曲线

试件典型的荷载-位移滞回曲线如图 5 所示。由于节点剪切裂缝在反复加载过程中的张开和闭合,试件滞回曲线有明显的捏拢效应。

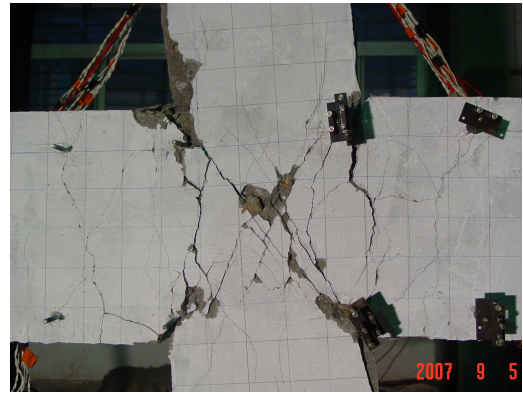


图 4 试件 CSRC-J-1 最终破坏形态  
Fig.4 Failure modes of CSRC-J-1

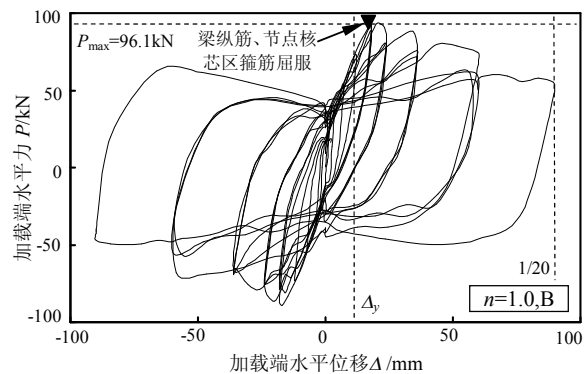


图 5 CSRC-J-2 荷载-位移滞回曲线  
Fig.5 Hysteretic curves of CSRC-J-2

#### 1.3.3 骨架曲线

试件骨架曲线如图 6 所示。由图 6 可见,试件骨架曲线的上升段基本重合,轴力较小的试件 CSRC-J-3 的初始刚度略小于其他试件。轴压比相同的条件下,核心型钢截断的试件 CSRC-J-2 比核心型钢未截断的试件 CSRC-J-1 下降段斜率略大,最大荷载基本相同。

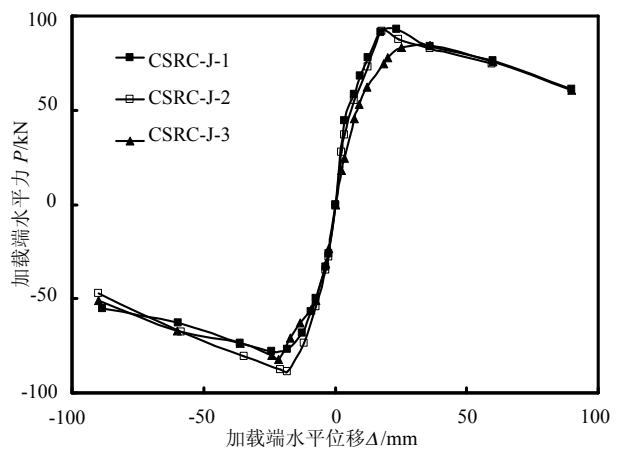


图 6 试件骨架曲线汇总  
Fig.6 Skeleton curves of specimens

## 2 有限元模型的建立

商业通用非线性有限元程序 ADINA 在钢筋混凝土结构的模拟方面有强大的功能<sup>[12]</sup>。ADINA 中有专门的混凝土材料(Concrete)模型，并开发了 Rebar 单元来用于钢筋的模拟并可自动处理钢筋与周围混凝土单元的连接关系，为复杂配筋模型的建立提供了有效的方法。

### 2.1 单元类型

混凝土及核心型钢采用 8 节点 3-D Solid 单元。钢筋采用 ADINA 8.0 版本后专门开发的 Rebar 单元模拟，采用分离式建模方法。

### 2.2 混凝土本构模型

混凝土是一种拉压性能有较大差异的复杂材料<sup>[11]</sup>，ADINA 中自带的混凝土材料模型包含以下 3 个基本内容，即：1) 非线性的应力-应变关系，模拟混凝土材料在较大压应变下的损伤；2) 采用破坏包络面来定义混凝土材料在拉压状态下的破坏；3) 材料拉裂或压碎后的性能模拟。该模型为复杂的混凝土材料的模拟提供了一条简单而有效的途径。

#### 2.2.1 混凝土的受压行为

混凝土材料的单轴应力-应变关系是其本构的基础，ADINA 采用的典型的单轴应力-应变关系如图 7 所示。曲线方程由式(1)~式(4)确定。

$$\frac{\sigma}{\sigma_c} = \begin{cases} E_0 \varepsilon; & \varepsilon \geq 0 \\ \frac{\left(\frac{E_0}{E_s}\right)\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right)}{1 + A\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right) + B\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right)^2 + C\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right)^3}; & \varepsilon \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$A = \frac{\left[\frac{E_0}{E_u} + (p^3 - 2p^2)\frac{E_0}{E_s} - (2p^3 - 3p^2 + 1)\right]}{(p^2 - 2p + 1)p} \quad (2)$$

$$B = 2\frac{E_0}{E_s} - 3 - 2A \quad (3)$$

$$C = 2 - \frac{E_0}{E_s} + 2A \quad (4)$$

其中： $E_0$  为混凝土的初始弹性模量； $E_s = \sigma_c / \varepsilon_c$ ， $p = \varepsilon_u / \varepsilon_c$ ， $E_u = \sigma_u / \varepsilon_u$ ； $\sigma_t$ 、 $\sigma_c$  和  $\sigma_u$  分别表示混凝土的抗拉强度、抗压强度和极限抗压强度； $\varepsilon_t$ 、 $\varepsilon_c$  和  $\varepsilon_u$  分别表示对应的应变； $\sigma'_c$ 、 $\sigma'_u$ 、 $\varepsilon'_c$  和  $\varepsilon'_u$  分别表示多轴应力状态下的对应应力和应变； $\sigma_{tp}$  表示拉裂后混凝土的残余抗拉强度。

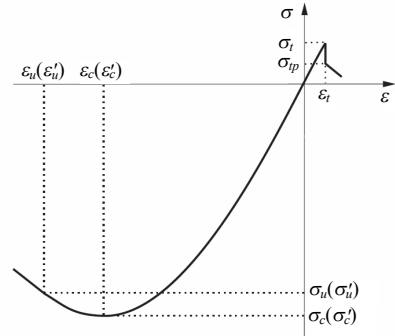


图 7 混凝土单轴应力-应变曲线  
Fig.7 Uniaxial stress-strain relationship of concrete

当材料应变  $\varepsilon < \varepsilon_u$  时，材料的应力线性释放至 0，应变软化段斜率按下式确定。

$$E'_u = \frac{\sigma_u - \sigma_c}{\varepsilon_u - \varepsilon_c} \quad (5)$$

本文取  $\varepsilon_c = 0.002$ ， $\varepsilon_{cu} = 0.0033$ 。

#### 2.2.2 混凝土的受拉行为

当主应力方向的拉应力超过了材料抗拉强度，混凝土即被拉裂。混凝土拉裂后的性质表现为通过破坏面的法向和切向刚度与应力的降低。

带裂缝混凝土由于钢筋的作用，体现为受拉软化(Tension stiffening)，其应力-应变关系如图 8 所示。拉裂后混凝土剪切模量的变化如图 9 所示。其中， $\xi$  为定义受拉软化的用户输入变量，应注意保证  $\xi > 1$ ，否则解不唯一。通常较大的  $\xi$  值有利于数值求解的收敛，程序默认取  $\xi = 8$ 。 $\eta_f$  为剪切模量折减

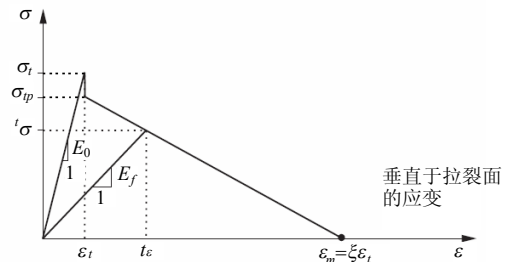


图 8 受拉破坏后材料应力的计算  
Fig.8 Material module for stress calculation after tensile failure

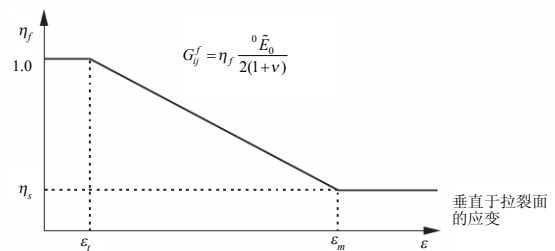


图 9 受拉破坏后的材料剪切模量  
Fig.9 Shear module of concrete after tensile failure

系数,其确定依赖一系列的物理参数(如图 9),其中  $\tilde{E}_0$  为 0 时刻材料的弹性模量,  $\nu$  为泊松比,程序默认取  $\eta_f=0.5$ 。

### 2.2.3 混凝土的破坏包络面

混凝土材料的拉裂和压溃分别由破坏包络面控制,如图 10 和图 11 所示。

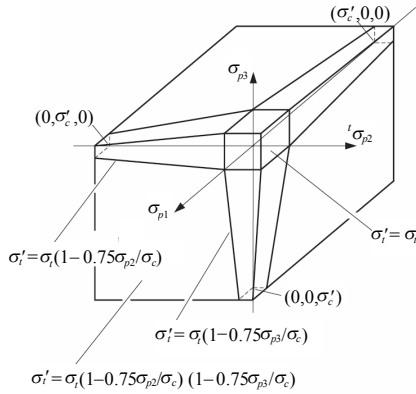


图 10 混凝土三轴受拉破坏包络面  
Fig.10 Triaxial tensile failure envelope of concrete model

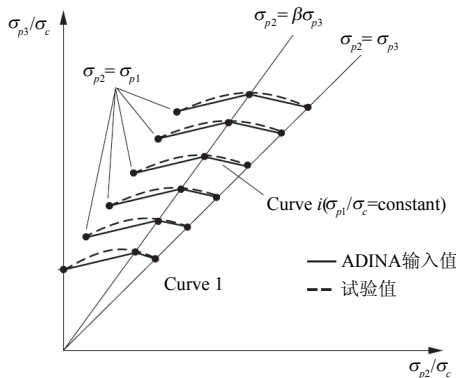


图 11 混凝土三轴压破坏包络面  
Fig.11 Triaxial concrete compressive failure envelope

### 2.3 钢材材料模型

钢材均采用考虑强化的弹塑性双线性材料(Plastic-Bilinear)本构。需要设置的主要参数有:初始弹性模量  $E_s$ 、泊松比  $\nu$ 、屈服强度  $f_y$ 、屈服后刚度和最大容许塑性应变等。模型还允许用户定义材料应变强化类型和受加载速率的影响等属性。本文选用忽略加载速率影响的随动强化模型(Kinematic Strain Hardening)。屈服强度根据材性试验确定,屈服后刚度根据 Y. Higashibata 的建议取  $0.01E_s$ 。

### 2.4 钢材与混凝土的界面处理

由于核心型钢截面高度较小,接近截面中和轴,因此其应力水平较低,相应的对与混凝土之间的粘结力需求也较低。相关试验<sup>[1]</sup>也表明,CSRC 柱发生弯曲破坏后,核心型钢与混凝土之间的粘结

并无明显破坏。因此,有限元模型不考虑两者之间的相对滑移。

钢筋采用 ADINA 开发的 Rebar 单元模拟,建模时仅需定义钢筋的物理模型、材料模型和单元类型,程序会在计算时自动将钢筋划分网格,并在钢筋与 3D 实体单元交接处生成新节点,增加约束方程耦合,这大大降低了钢筋混凝土试件的建模难度。

### 2.5 有限元模型的建立

为提高计算效率,编制 ADINA 命令流文件(INP 文件),采用“自下而上”的建模方式,先生成节点,通过节点生成块体(Body)。沿柱高方向将柱分成 5 段,其中节点核芯区高度与梁高相等,使梁块体与节点核芯区的块体在水平方向对齐,以保证网格划分的质量。在边界和加载点处设置弹性垫块以消除应力集中的影响。

梁端约束竖向平动自由度,水平方向平动自由度不约束,以模拟梁端简支的边界条件。柱底在刚性垫块中线处约束竖向和水平向的平动自由度,以模拟柱底的铰接边界条件。柱顶通过等效面荷载模拟恒定轴力。在柱顶刚性垫块边缘施加位移荷载。有限元模型如图 12 所示。

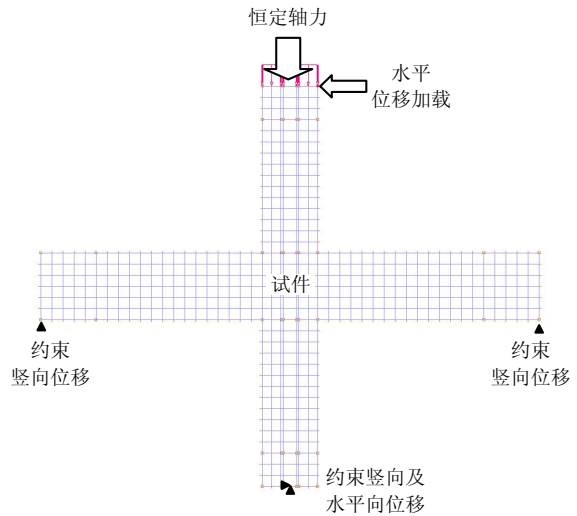


图 12 CSRC 节点有限元模型  
Fig.12 FEM model of CSRC joints

## 3 计算结果验证及参数分析

### 3.1 单调加载骨架曲线验证

图 13 为计算骨架曲线与试验骨架曲线的对比。由图 13 可见,计算骨架曲线与试验骨架曲线整体吻合较好,但计算骨架曲线下降段较短,且在 1/30 位移角之后,与试验骨架曲线的差异增加。这是由于节点核芯区混凝土发生剪切破坏,计算过早不收

敛，导致试件极限位移偏小。另外，混凝土材料的受拉破坏准则对发生剪切破坏的混凝土试件计算结果起控制作用，而该部分定义还较为粗糙，也造成计算结果与试验的差异。但计算骨架曲线的总体发展趋势与试验骨架曲线吻合较好，可以此为基础对 CSRC 节点试件进行参数分析。

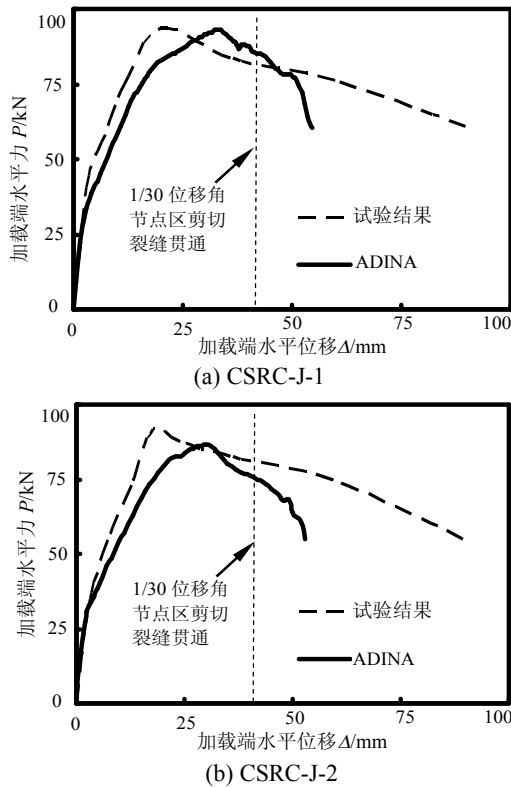


图 13 有限元计算骨架曲线与试验结果对比  
Fig.13 Comparison of calculated skeleton curves and test results

### 3.2 其它计算结果

图 14 是试件梁柱纵筋在极限状态下的应力分布图，深色表示拉应力，浅色表示压应力。由图 14 可见，有限元计算结果与试验趋势吻合良好，可以合理的反应节点试件中梁柱组成部分的受力特征。

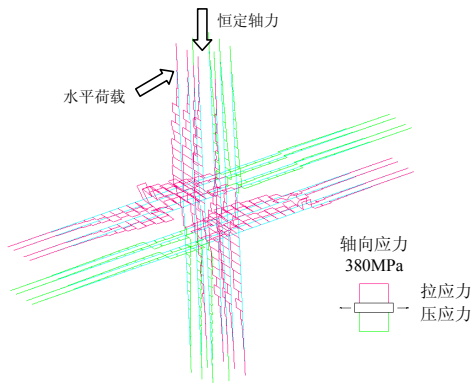


图 14 纵筋应力分布  
Fig.14 Stress distribution of longitudinal bars

图 15 为试件 CSRC-J-1 节点核心区核心型钢在极限状态下的应力分布。由图 15 可见，有限元计算结果可以合理的反应核心型钢翼缘的拉压应力状态和腹板的弯剪复合受力状态。

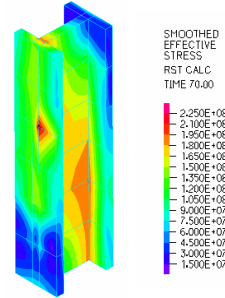


图 15 节点核心区核心型钢应力分布  
Fig.15 Stress distribution of core steel

### 3.3 参数分析

为深入研究 CSRC 节点试件的受力性能，了解各参数对试件性能的影响，作者以试件 CSRC-J-1 为标准模型进行了参数分析。分析时仅改变一个参数，其他参数保持不变。

#### 3.3.1 核心型钢截断锚固面积

核心型钢的截断可以使得梁纵筋在节点区的贯通不受阻碍，方便施工。但核心型钢若完全截断，对试件的抗震性能会有一定的削弱，因此，采用一定形式的连接锚固构造是必要的。

图 16 为核心型钢不同锚固面积的 CSRC 节点试件的单调加载骨架曲线。图 16 中， $\alpha = A_s/A_a$  为核心型钢在节点核心区的面锚固率， $A_s$  为锚固钢筋截面积， $A_a$  为核心型钢截面积。试件 CSRC-1、CSRC-3 和 CSRC-4 仅  $\alpha$  不同，其他参数均相同，试件 CSRC-1 和 CSRC-2 节点核心区核心型钢锚固钢筋强度分别为 235MPa 和 345MPa，其他参数均相同。

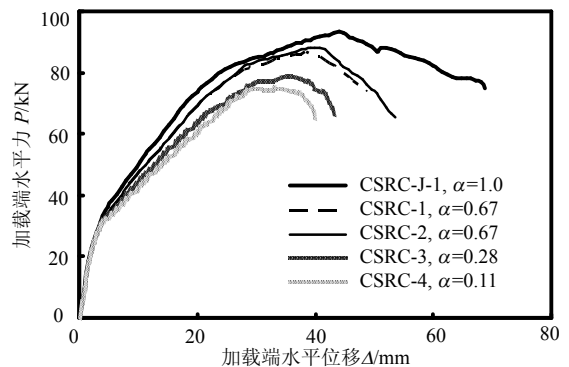


图 16 不同锚固面积的 CSRC 节点骨架曲线  
Fig.16 Skeleton curves of CSRC joints with different anchor bar area

由图 16 可见，随核心型钢锚固面积的增加，试件强度、刚度和极限变形能力逐渐增加。试件

CSRC-1 和试件 CSRC-2 的对比可见, 锚固钢筋的强度对试件的强度和变形能力影响不显著。

在实际工程中, 为避免核心型钢的截断对试件强度和延性的削弱, 锚固钢筋直径不宜过小。但锚固钢筋直径过大, 又会影响梁纵筋在节点区的穿越, 增加施工难度, 应综合考虑两方面的因素确定最终的设计方案。

### 3.3.2 混凝土强度的影响

图 17 是混凝土强度对 CSRC 节点试件单调加载骨架曲线的影响。

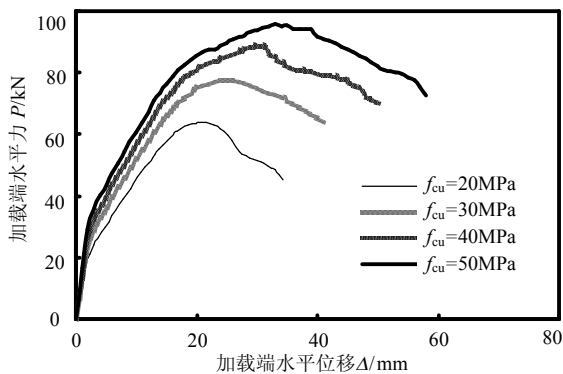


图 17 不同混凝土强度的 CSRC 节点骨架曲线  
Fig.17 Skeleton curves of CSRC joints with different concrete strength

由图 17 可见, 随混凝土强度的增加, 试件强度和初始刚度不断增加。

### 3.3.3 强节点系数的影响

图 18 为不同强节点系数的 CSRC 节点试件的单调加载骨架曲线对比。强节点系数 $\eta$ 定义为节点设计抗剪强度与梁端达到屈服状态时对应的节点核心区剪力的比值, 随着 $\eta$ 的不断减小, 试件破坏形态由梁端的弯曲破坏逐渐过渡为节点核心区的剪切破坏。

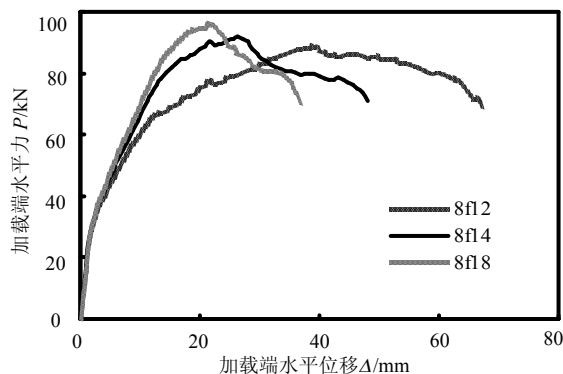


图 18 不同强节点系数的 CSRC 节点骨架曲线  
Fig.18 Skeleton curves of CSRC joints with different strength ratio of joint to beam

计算试件的节点核心区构造相同, 即节点抗剪强度不变, 仅通过改变梁纵筋的配筋率来改变试件的强节点系数。由图 18 可见, 随强节点系数的减小, 试件的强度增加, 但变形能力降低。有限元计算结果也显示, 强节点系数较小的试件, 节点核心区的裂缝发展较充分, 说明试件破坏形态的改变。

## 4 结论

(1) 采用大型通用非线性有限元软件 ADINA 对 CSRC 节点试件进行了单调加载工况下的数值分析。计算  $P-\Delta$  曲线与试验骨架曲线吻合较好, 从而验证了模型中采用的单元类型、材料本构及破坏准则的可行性和合理性, 为后续工作提供参考依据。

(2) 有限元分析结果与试验结果仍存在一定的误差, 主要有三个方面: 一是由于节点核心区混凝土剪切破坏后计算很快不收敛, 导致计算结果的下降段较短; 二是软件本身材料模型本构的局限性; 三是试验边界条件与有限元模型不是完全相符。

(3) 参数分析表明: 核心型钢在节点区截断后对试件的强度和变形能力有一定削弱, 核心型钢截断后的连接锚固面积增加, 试件性能逐渐改善。锚固钢筋的强度对试件性能影响不明显。混凝土强度增加, 试件强度和刚度增加。强节点系数增加, 试件由脆性的节点剪切破坏形态转变成延性的梁端弯曲破坏状态, 试件强度减低, 变形能力增大。

### 参考文献:

- [1] 郭子雄, 刘阳, 黄秋来. 高轴压比核心型钢混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(增2): 167-171.  
Guo Zixiong, Liu Yang, Huang Qiulai. Experimental study on seismic behavior of core steel reinforced concrete columns [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(S.2): 167-171. (in Chinese)
- [2] Junichi Sakai, Chiaki Matsui, Kouichi Minami. Earthquake resistant properties of core steel composite [C]. Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engrg. Sydney, Paper ID: 1280, 2000.
- [3] 刘阳, 郭子雄, 张志伟. 核心型钢混凝土柱的轴压比限值试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(3): 82-86.  
Liu Yang, Guo Zixiong, Zhang Zhiwei. Limit value of axial compression ratio for CSRC columns [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(3): 82-86. (in Chinese)

(参考文献[4]-[12]转第 112 页)

- [9] Aviles J, Sanchez-Sesma F. Piles as barriers for elastic waves [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1983, 119(9): 1133—1146.
- [10] Aviles J, Sanchez-Sesma F. Foundation isolation from vibrations using piles and barriers [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1988, 114(11): 1854—1870.
- [11] Kattis S E, Polyzos D, Beskos D E. Vibration isolation by a row of piles using a 3-D frequency domain BEM [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999b, 46(5): 713—728.
- [12] Tsai P H, Feng Z Y, Jen T L. Three-dimensional analysis of the screening effectiveness of hollow pile barriers for foundation-induced vertical vibration [J]. *Computers and Geotechnics*, 2008, 35(3): 489—499.
- [13] Cai Yuanqiang, Ding Guangya, Xu Changjie. Screening of plane S waves by an array of rigid piles in poroelastic soil [J]. *Journal of Zhejiang University (Science A)*, 2008, 9(5): 589—599.
- [14] 徐平, 夏唐代, 周新民. 单排空心管桩屏障对平面 SV 波的隔离效果研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(1): 131—136.
- Xu Ping, Xia Tangdai, Zhou Xinmin. Study on the effect of barrier of a row of hollow pipe piles for the isolation of incident plane SV wave [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(1): 131—136. (in Chinese)
- [15] 徐平, 夏唐代, 吴明. 刚性空心管桩屏障对 P 波和 SH 波的隔离效果研究[J]. *工程力学*, 2008, 25(5): 210—217.
- Xu Ping, Xia Tangdai, Wu Ming. Study on the effect of barrier of a row of rigid hollow pipe piles for the isolation of P and SH waves [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(5): 210—217. (in Chinese)
- [16] Watson G N. A treatise on the theory of bessel functions [M]. London, N.W., England: Cambridge University Press, 1966.
- [17] Abramowitz M, Stegun I A. Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables [M]. New York: Dover Publications, Inc., 1970.

(上接第 105 页)

- [4] Richard Liew J Y, Teo T H, Shanmugam N E. Composite joints subjected to reversal of loading-Part 1: experimental study [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2004, 60: 221—246.
- [5] Kitano A, Goto Y, Joh O. Experimental study on shear resistance of SRC column and steel beams frame constructed by simplified method [C]. *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, Paper No. 05-06-0125, 2008.
- [6] 郭子雄, 庄云, 黄群贤, 刘阳. SRC 柱-RC 梁组合件抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2009, 30(2): 39—46.
- Guo Zixiong, Zhuang Yun, Huang Qunxian, Liu Yang. Experimental study on seismic behaviors of SRC column-RC beam hybrid subassemblies [J]. *Journal of Building Structures*, 2009, 30(2): 39—46. (in Chinese)
- [7] 宗周红, 葛继平, 杨强跃. 反复荷载作用下方钢管混凝土柱与钢梁连接节点非线性有限元分析[J]. *建筑结构学报*, 2006, 27(2): 75—81.
- Zong Zhouhong, Ge Jiping, Yang Qiangyue. Nonlinear finite element analysis of the concrete filled square steel tubular column to steel beam connections under low-cycle reversed loading [J]. *Journal of Building Structures*, 2006, 27(2): 75—81. (in Chinese)
- [8] 聂建国, 秦凯, 肖岩. 方钢管混凝土柱节点的试验研究及非线性有限元分析[J]. *工程力学*, 2006, 23(11): 99—115.
- Nie Jianguo, Qin Kai, Xiao Yan. Experimental investigation and nonlinear finite element analysis on the behavior of concrete-filled square steel tubular column connections [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(11): 99—115. (in Chinese)
- [9] 申红侠, 顾强. 钢梁-钢筋混凝土柱梁柱中节点非线性有限元模拟[J]. *工程力学*, 2009, 26(1): 37—42, 48.
- Shen Hongxia, Gu Qiang. Nonlinear finite element modeling of interior RCS beam-column connections [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(1): 37—42, 48. (in Chinese)
- [10] 刘阳, 郭子雄, 黄群贤. 不同构造形式的 CSRC 节点变形性能试验研究[J]. *工程力学*, 2010, 27(10): 173—181.
- Liu Yang, Guo Zixiong, Huang Qunxian. Experimental study of deformation performance of CSRC joints with different seismic details [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(10): 173—181. (in Chinese)
- [11] 江见鲸. 钢筋混凝土结构非线性有限元分析[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1998.
- Jiang Jianjing. Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete structures [M]. Xi'an: Shaanxi Press of Science and Technology, 1998. (in Chinese)
- [12] ADINA theory and modeling guide: ARD02-7 [DB/OL]. ADINA R & D Inc. USA, 2002.