

文章编号: 1000-4750(2012)02-0149-10

# 半刚接钢框架内填 RC 墙结构简化分析模型

孙国华<sup>1,2</sup>, 顾 强<sup>2</sup>, 何若全<sup>1,2</sup>, 方有珍<sup>2</sup>, 申 林<sup>3</sup>

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124; 2. 江苏省结构工程重点实验室(苏州科技学院), 江苏, 苏州 215011;

3. 中国建筑标准设计研究院, 北京 100044)

**摘 要:** 该文提出了一种用于分析半刚接钢框架内填 RC 墙结构(简称 PSRCW)滞回性能的简化分析模型(即斜向板带模型), 基于混凝土应力-应变关系给出了斜向板带的轴力-位移关系曲线, 采用 Pivot 塑性滞回模型模拟斜向板带的力学行为。采用有限元方法分析了板带恢复力模型、板带数量及倾角对 PSRCW 结构斜向板带模型的影响, 结果表明 Pivot 塑性滞回模型可较好地模拟斜向板带的滞回性能, 可采用 7 条以上板带及 40°~50°之间板带倾角描述 PSRCW 结构的整体性能。应用该简化模型对有关试件进行了滞回性能模拟, 并与试验结果比较, 两者吻合良好。

**关键词:** 半刚接钢框架; 内填墙; 滞回性能; 有限元法; 板带模型

**中图分类号:** TU398.2 **文献标志码:** A

## SIMPLIFIED FE MODEL OF PARTIALLY-RESTRAINED STEEL FRAME WITH RC INFILL WALLS

SUN Guo-hua<sup>1,2</sup>, GU Qiang<sup>2</sup>, HE Ruo-quan<sup>1,2</sup>, FANG You-zhen<sup>2</sup>, SHEN Lin<sup>3</sup>

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Structure Engineering (University of Science and Technology of Suzhou), Suzhou, Jiangsu 215011, China;

3. Institute of Building Standard Design and Research, Beijing 100044, China)

**Abstract:** A simple inclined strip model for analyzing the hysteretic behavior of partially-restrained steel frame with reinforced concrete walls (PSRCW) is presented. The axial force vs displacement of inclined strip is derived according to the constitutive relationship of concrete, and the hysteretic rules of inclined strips is determined through multi-linear plastic pivot of non-linear link element. The main parameters of PSRCW are analyzed, including mechanical model, quantity and inclined angles of strips. The results demonstrate that multi-linear plastic pivot can be used to simulate the hysteretic behavior of inclined strip, and more than seven strips and an inclined strip angle of 40-50 degree are suggested. The comparison between the results of calculation and those of corresponding tests shows good agreement.

**Key words:** partially-restrained steel frame; infill wall; hysteretic behavior; FEM; strip model

半刚接钢框架内填钢筋混凝土剪力墙结构(简称 PSRCW)是一种混合结构体系,由半刚接钢框架、RC 内填墙、抗剪连接件组成,具有抗侧移刚度大,

水平承载力高的优点<sup>[1-3]</sup>。水平荷载作用下 PSRCW 结构的内填墙处于二维应力状态,当内填墙的主拉应力超过混凝土抗拉强度时将沿主压应力方向产

收稿日期: 2010-05-17; 修改日期: 2010-08-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(50378058)

通讯作者: 孙国华(1978—), 男, 内蒙古人, 讲师, 博士, 主要从事钢结构与组合结构的研究(E-mail: sgh@mail.usts.edu.cn).

作者简介: 顾 强(1953—), 男, 辽宁人, 教授, 博士, 博导, 主要从事钢结构研究(E-mail: guqiang383@163.com);

何若全(1949—), 男, 广东人, 教授, 硕士, 博导, 主要从事钢结构研究(E-mail: rqhe@mail.usts.edu.cn);

方有珍(1972—), 男, 安徽人, 副教授, 博士, 硕导, 主要从事钢结构与组合结构的研究(E-mail: fyz72@yahoo.com.cn);

申 林(1973—), 男, 河南人, 高工, 博士, 主要从事钢结构研究(E-mail: shenl@cadg.cn).

生剪切斜裂缝，内填墙被分割为一系列仅有钢筋相连的斜向板带，水平力通过斜向板带以压力的形式传递。当水平荷载反向时，先前斜裂缝闭合，主拉、主压应力方向转换，此时沿原裂缝垂直方向出现反向斜裂缝，内填墙以新的斜压板带传递水平荷载。

目前，对混凝土单轴应力状态的本构理论研究比较成熟，对于剪力影响不大的混凝土杆系结构，非线性有限元模拟可获得比较满意的结果。但对深梁、剪力墙等剪力影响较大的结构，剪切本构理论相对不够成熟，有限元模拟结果误差较大。关于剪切问题的相关研究主要形成了以下几种理论，Hsu 所提出的薄膜元软化桁架理论<sup>[4-6]</sup>，其中包括转角软化桁架模型和固定角软化桁架模型。Vecchio 提出了斜压场模型<sup>[7]</sup>。Vecchio 和 Collins<sup>[8]</sup>在试验研究的基础上考虑了混凝土受压软化和受拉强化效应，提出了修正斜压场理论。Darwin 和 Pecknold<sup>[9]</sup>在“等效单轴应变”基础上建立了混凝土正交异型模型。尽管广大学者对此问题进行了深入研究，建立了相应的理论，但关于混凝土剪切本构问题仍未得到根本性解决。采用微观有限元模型对混凝土剪力墙结构进行分析时会导致一系列问题，例如滞回性能模拟较差，抗剪承载力过高，单元数量过多、材料、几何、接触等多重非线性导致收敛性差，计算耗费大量机时等，因此有必要开展半刚接钢框架内填 RC 墙结构简化分析模型的研究，用于描述 PSRCW 结构的整体行为。

本文在已有试验的基础上<sup>[10-11]</sup>，借鉴钢板剪力墙的拉杆模型<sup>[12-13]</sup>以及日本建筑学会《钢筋混凝土建筑保证延性型抗震设计指南》中混凝土梁受剪承载力计算公式所采用的桁架模型思路，建立了简化分析模型(即斜向板带模型)，并对影响斜向板带模型滞回性能的因素进行分析，最后进行了试验验证。

### 1 PSRCW 结构斜向板带模型

PSRCW 结构的斜向板带几何模型见图 1，图 1 中利用板带宽度变化来反映板带发挥作用的程度。正向加载时，45°的板带承担压力，135°的板带承担拉力，靠近 A 柱侧的斜向板带发挥作用大，传递的水平力多，远离 A 柱侧的斜向板带发挥的作用不断降低，传递的水平力在逐渐减小，反之亦然。由于混凝土抗拉强度仅为抗压强度的 1/10 左右，正向加载时，45°板带起主要作用，传递绝大部分水平力，135°板带发挥作用非常小。

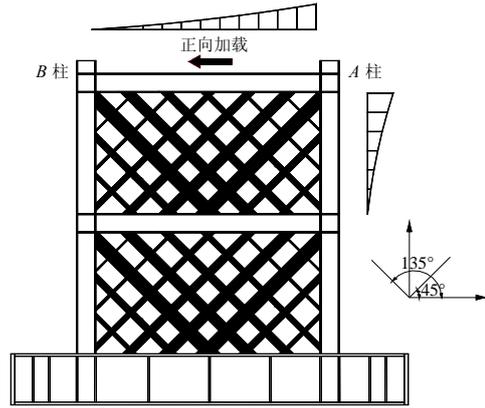


图 1 PSRCW 斜向板带模型

Fig.1 The inclined strip model of PSRCW

#### 1.1 基本假定

- 1) 斜向板带两端铰接于周边钢框架。
- 2) 从加载角部至远端斜向板带传递的水平力呈曲线衰减，曲线形状与内填墙混凝土强度相关。
- 3) 根据混凝土的单向应力-应变关系曲线给出斜向板带的轴力-位移关系。
- 4) 忽略内填墙分布钢筋的销栓作用。
- 5) 忽略界面抗剪连接件剪切滑移的影响。

#### 1.2 斜向板带几何模型

为了简化分析，忽略梁、柱截面高度影响。图 2 给出正向加载时 45°斜向板带划分的几何示意。

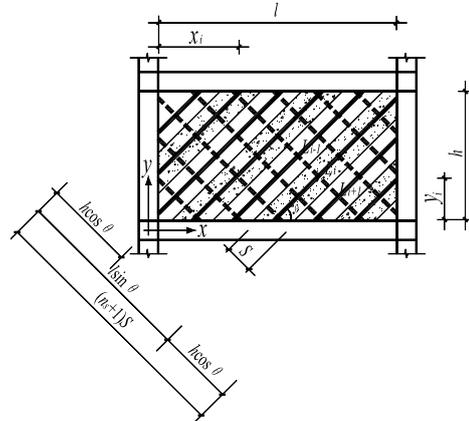


图 2 斜向板带模型

Fig.2 Sketch of the strip model

图 2 中： $h$  为内填墙高度； $l$  为内填墙宽度； $S$  为板带宽度； $L_i$  为第  $i$  条板带的长度； $\theta$  为板带倾角； $n_s$  为板带数量。

由图 2 可知：

$$(n_s + 1) \cdot S = l \cdot \sin \theta + h \cdot \cos \theta \tag{1}$$

与梁、柱相连的板带几何长度为：

$$L_{i-柱} = \frac{x_i}{\cos \theta} \text{ 或 } \frac{y_i}{\sin \theta} \tag{2}$$

式中： $x_i$  为与上部钢梁-柱相连的第  $i$  条斜压板带的

水平坐标； $y_i$ 为与下部钢梁-柱相连的第*i*条斜压板带的竖向坐标。坐标系见图2。

与梁、梁相连的板带几何长度为：

$$L_{i-梁} = \frac{h}{\sin \theta} \quad (3)$$

135°斜向板带的几何尺寸和坐标可参考45°斜向板带的确定方法。

### 1.3 斜向板带恢复力模型

#### 1.3.1 混凝土的应力-应变关系

混凝土采用二次式的受压应力-应变关系曲线<sup>[5]</sup>，见式(4)~式(8)。

受压区：

上升段：

$$\sigma = f'_c \left[ 2 \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) - \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right], \quad \varepsilon / \varepsilon_0 \leq 1 \quad (4)$$

下降段：

$$\sigma = f'_c \left[ 1 - \left( \frac{\varepsilon / \varepsilon_0 - 1}{3} \right)^2 \right], \quad \varepsilon / \varepsilon_0 > 1 \quad (5)$$

水平段：

$$\sigma = 0.2 f'_c, \quad \varepsilon \geq 3.68 \varepsilon_0 \quad (6)$$

受拉区：

上升段：

$$\sigma = E_c \varepsilon, \quad \varepsilon \leq \varepsilon_{cr} \quad (7)$$

水平段：

$$\sigma = f_t, \quad \varepsilon > \varepsilon_{cr} \quad (8)$$

式中： $f'_c$ 为混凝土棱柱体抗压强度； $\varepsilon_0$ 为最大压应力处的峰值压应变，通常取0.002； $\sigma$ 、 $\varepsilon$ 分别为混凝土应力及应变； $f_t$ 为混凝土抗拉强度； $E_c$ 为混凝土弹性模量； $\varepsilon_{cr}$ 为混凝土的开裂应变。

#### 1.3.2 斜向板带的轴力-位移关系

根据混凝土本构模型建立了斜向板带的轴力-位移关系曲线。其中：

$$\sigma_i = \frac{N_i}{A_i} = \frac{N_i}{\eta_i \cdot S \cdot t_w} \quad (9)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta_i}{L_i} \quad (10)$$

式中： $\sigma_i$ 、 $N_i$ 分别为第*i*斜向板带的应力、轴力； $A_i$ 为第*i*个斜向板带的有效截面面积； $\eta_i$ 为第*i*个斜向板带有效宽度系数； $t_w$ 为斜向板带的厚度； $\varepsilon_i$ 为第*i*斜向板带的应变； $\Delta_i$ 为第*i*斜向板带的伸长量； $L_i$ 为第*i*斜向板带的几何长度。

将式(9)、式(10)代入式(4)~式(8)可得到内填墙

第*i*个斜向板带受压时轴力-位移关系公式为：

上升段：

$$N_i = f'_c \cdot \eta_i \cdot S \cdot t_w \left[ 2 \left( \frac{\Delta_i}{L_i \cdot \varepsilon_0} \right) - \left( \frac{\Delta_i}{L_i \cdot \varepsilon_0} \right)^2 \right], \quad \frac{\Delta_i}{L_i} \leq \varepsilon_0 \quad (11)$$

下降段：

$$N_i = f'_c \cdot \eta_i \cdot S \cdot t_w \left[ 1 - \left( \frac{\Delta_i / (L_i \cdot \varepsilon_0) - 1}{3} \right)^2 \right], \quad \frac{\Delta_i}{L_i} > \varepsilon_0 \quad (12)$$

水平段：

$$N_i = 0.2 f'_c \cdot \eta_i \cdot S \cdot t_w, \quad \frac{\Delta_i}{L_i} \geq 3.68 \varepsilon_0 \quad (13)$$

第*i*斜向板带受拉时轴力-位移关系为：

$$N_i = \frac{E_c \cdot \eta_i \cdot S \cdot t_w \cdot \Delta_i}{L_i}, \quad \frac{\Delta_i}{L_i} \leq \varepsilon_{cr} \quad (14)$$

$$N_i = f_{tk} \cdot \eta_i \cdot S \cdot t_w, \quad \frac{\Delta_i}{L_i} > \varepsilon_{cr} \quad (15)$$

#### 1.3.3 斜向板带有效宽度系数

从某种意义上讲，斜向板带模型就是一种桁架模型，并以桁架的受力模式传递水平剪力。这意味着如果直接采用混凝土抗压强度作为力学性能指标，将会显著高估剪力墙的抗剪承载力。为此，本文引入了一个经验性的有效宽度系数，其本质同日本建筑学会采用的有效宽度系数相同。这个参数综合考虑了板带位置及拉应力的影响。本文采用了曲线形式的斜向板带内力关系，并根据板带的坐标给出了数学表达式。

与上部钢梁-柱相连的斜向板带有效宽度系数 $\eta_i$ 的计算公式：

$$\eta_i = \left( \frac{x_i}{l} \right)^n \quad (16)$$

式中： $n$ 为曲线形状系数，与混凝土强度有关； $l$ 为内填墙宽度；其它参数同前。

与下部钢梁-柱相连的斜压板带有效宽度系数计算公式：

$$\eta_i = \left( \frac{y_i}{h} \right)^n \quad (17)$$

式中， $h$ 为内填墙高度。其它参数同前。

文献[14]基于试验研究给出了曲线形状系数 $n$ 计算公式：

$$n = 1 - \frac{(28 - f_{cu})}{28} \quad (18)$$

式中,  $f_{cu}/(\text{N}/\text{mm}^2)$ 为混凝土标准立方体抗压强度。

试验研究<sup>[14]</sup>发现混凝土强度对 PSRCW 结构承载力有一定影响, 这表明有效宽度系数  $\eta$  与混凝土强度相关。从式(18)可以看出混凝土强度越高, 曲线影响系数  $n$  越大, 这意味着混凝土内填墙中部斜向板带的参与程度在不断降低。理论上, 随着混凝土强度增加, 弹性模量增大, 内填墙刚度增大, 导致混凝土内填墙角部应力集中愈加明显。曲线形状系数  $n$  可反映这一客观现象。

### 1.4 循环荷载作用下斜向板带的恢复力模型

目前关于混凝土宏观恢复力模型主要有 Pivot 滞回模型<sup>[15]</sup>与 Takeda 塑性模型<sup>[16]</sup>。Pivot 模型是由 Robert K 等人于 1998 年提出, 在 Takeda 塑性模型基础上通过一个附加参数考虑混凝土刚度退化, 可以在宏观层次上更好地反映混凝土构件、结构在循环荷载或动力荷载作用下的整体行为。本文采用 SAP2000 中 NLink 单元提供的 Pivot 滞回塑性模型来模拟内填墙斜向板带的宏观性能。

Pivot 塑性滞回模型是通过枢纽点(Pivot 点)及比例系数描述构件的滞回关系。图 3 中,  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 、 $PP_2$ 、 $PP_4$  为 Pivot 点, 当混凝土构件的正向及负向加载曲线对称时,  $P_1$ 、 $P_2$  两点重合,  $P_3$ 、 $P_4$  两点重合;  $\alpha_1$  为对应于正荷载卸载至 0 路径上的枢纽点系数;  $\alpha_2$  为对应于负荷载卸载至 0 路径上的枢纽点系数;  $\beta_1$  为对应于反向加载从 0 到正荷载路径上的枢纽点系数;  $\beta_2$  为对应于反向加载从 0 到负荷载路径上的枢纽点系数。

为了描述构件经过塑性变形后弹性斜率的退化, Pivot 模型引入了  $\eta$  系数。

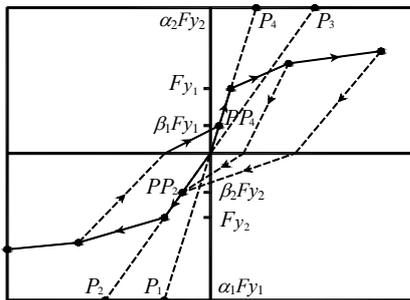


图 3 多段线性 Pivot 塑性模型(轴向变形)

Fig.3 Multi-linear pivot plasticity property type for axial deformation

### 1.5 钢框架

考虑到本文主要描述 PSRCW 结构钢框架的整体性能, 采用 SAP2000 程序的弹塑性铰模型考虑材料非线性行为。框架柱采用考虑轴力与弯矩耦合

作用的 P-M3 铰模拟, 框架梁采用弯曲铰 M3 模拟。塑性铰力学性能根据 FEMA-356 的相关准则确定<sup>[17]</sup>。

图 4 给出了塑性铰的力-位移关系曲线, 塑性铰根据初始弹性模量(刚度)卸载, 并采用随动强化模型考虑循环加载下钢材的包辛格效应。

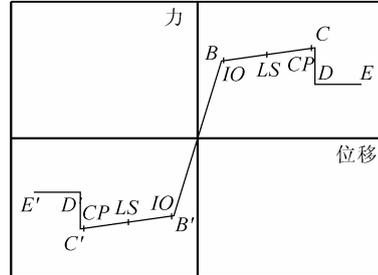


图 4 典型塑性铰的力-位移关系曲线

Fig.4 The A-B-C-D-E curve for force vs displacement

### 1.6 半刚性连接

为了精确模拟 PSRCW 结构的受力性能, 通过在宏观模型中引入半刚性节点的  $M-\theta$  曲线用于模拟半刚接的受力特性。本文采用 Chen W F 等建议的三参数幂函数曲线<sup>[18]</sup>来描述梁柱四角钢连接的  $M-\theta$  骨架曲线:

$$M = \frac{R_{in}\theta}{[1 + (\theta/\theta_0)^n]^{1/n}} \quad (19)$$

式中:  $M$  为节点弯矩;  $\theta$  为节点转角;  $R_{in}$  为节点的初始转动刚度;  $\theta_0$  为节点参考转角;  $n$  为曲线形状系数。

采用多段线性随动强化塑性模型用于模拟四角钢连接在循环荷载作用下的滞回性能, 并考虑了钢材的包辛格效应, 如图 5 所示。

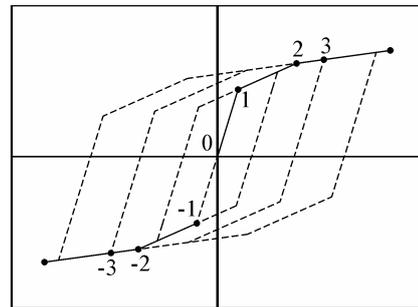


图 5 多段线性随动强化塑性模型

Fig.5 Multi-linear kinematic plasticity property type

### 1.7 斜向板带模型的实现过程

下面简要归纳 PSRCW 结构斜向板带模型的实现过程:

1) 根据式(1)~式(3)建立 PSRCW 结构的几何模型(斜向板带的数量、宽度、长度及坐标), 确定板

带的有效宽度系数  $\eta$ 。

2) 按照式(9)~式(18)确定斜向板带的恢复力模型, 确定板带 Pivot 枢纽点滞回准则。

3) 按照式(19)确定半刚性连接的恢复力模型, 确定半刚性连接的随动强化塑性滞回准则。

4) 确定钢框架的框架柱的 P-M3 铰、框架梁 M3 铰的随动强化塑性滞回准则。

5) 引入边界条件, 施加荷载, 获得 PSRCW 结构的滞回性能曲线。

## 2 PSRCW 结构有限元模型

### 2.1 实际结构

本文以文献[10]的 PSRCW-1 作为基准试件, 几何尺寸及构造见图 6。

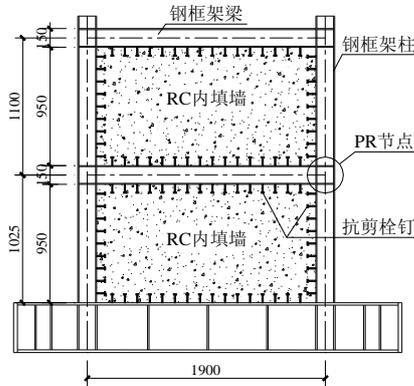


图 6 试件详图

Fig.6 Layout of the specimen

### 2.2 材料性能

有限元模型中钢材与混凝土材料性能均按试验结果选取。框架柱翼缘和腹板钢材的平均屈服强度  $f_y=306.12\text{N/mm}^2$ , 弹性模量  $E_s=1.94\times 10^5\text{N/mm}^2$ ; 框架梁翼缘和腹板钢材的平均屈服强度  $f_y=303.33\text{N/mm}^2$ , 弹性模量  $E_s=1.91\times 10^5\text{N/mm}^2$ ; 梁柱四角钢连接的顶底角钢钢材的平均屈服强度为  $f_y=310\text{N/mm}^2$ , 弹性模量  $E_s=2.04\times 10^5\text{N/mm}^2$ ; 腹板双角钢钢材的平均屈服强度为  $f_y=278.89\text{N/mm}^2$ , 弹性模量  $E_s=2.04\times 10^5\text{N/mm}^2$ ; 混凝土棱柱体平均抗压强度  $f_{ck}=19.3\text{N/mm}^2$ , 抗拉强度  $f_{tk}=1.93\text{N/mm}^2$ , 弹性模量  $E_c=29370\text{N/mm}^2$ 。

### 2.3 计算模型

采用 SAP2000 程序建立了 PSRCW 结构平面的有限元模型。采用 P-M3 铰模拟框架柱的材料非线性, M3 弯曲铰模拟框架梁物理非线性。采用 Nlink 单元的 Pivot 塑性滞回模型模拟斜向板带的滞回性能, 并根据式(11)~式(18)计算出每条斜向板带的轴

力-位移关系。采用 Nlink 单元的随动强化塑性模型模拟半刚性连接的滞回性能。梁柱四角钢连接根据实际几何尺寸和钢材实测材性确定的  $M-\theta$  关系为:

$$M = \frac{7374.1 \cdot \theta}{\left[ 1 + \left( \frac{\theta}{0.002514} \right)^{0.8} \right]^{1.25}} \quad (20)$$

为实现试件 PSRCW-1 在试验过程中的底部固定连接条件, 对有限元模型底部所有单元自由度进行了约束。试验中, 水平荷载通过顶部加载梁施加于试件的上翼缘, 为了简化直接将水平荷载施加于有限元模型中的顶梁。加载制度与试验基本相同, 但每级荷载循环 2 次。简化的有限元模型如图 7 所示。

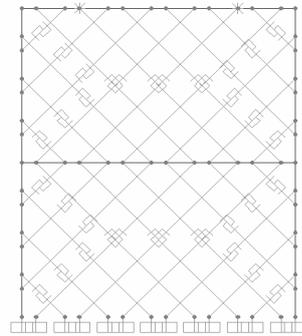


图 7 PSRCW 结构斜向板带模型(SAP2000)

Fig.7 The inclined strip model of PSRCW of SAP2000

## 3 PSRCW 结构斜向板带模型的影响参数分析

影响 PSRCW 结构简化斜向板带模型的主要参数有: 板带恢复力模型、钢框架的半刚接节点、斜向板带的倾角及数量等。以下对 PSRCW 结构简化模型的主要影响参数进行了分析。

### 3.1 斜向板带的滞回性能

结合 2.3 节建立的 PSRCW 结构的有限元模型, 首先对斜向板带在循环荷载作用下的受力性能进行了分析。本节提取有限元模型中一个混凝土板带的轴力-位移滞回关系曲线(图 8)。其中, 斜向板带宽度 167mm, 厚度 80mm, 长度 1555mm。

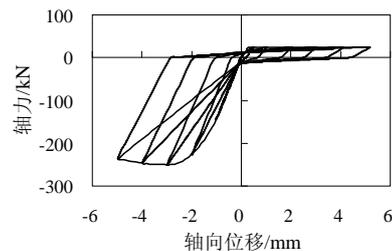


图 8 混凝土斜向板带滞回曲线

Fig.8 Hysteretic curve of concrete inclined strip

由图 8 可知，第 1 循环基本遵循构件单元的骨架曲线，同级荷载下第 2 循环的加载曲线将指向上级荷载的卸载点，这种加卸载关系可以反映混凝土构件由于循环加载导致的刚度损伤。从曲线受压区还可看出，卸载曲线的刚度较前一级荷载略有衰减，反映出本级荷载构件自身损伤导致其刚度的降低。混凝土构件由拉转压过程中所具有独特的裂面效应在 Pivot 塑性滞回模型中通过指向定点的方式给予反映。本文模型中混凝土构件的受拉性能采用恒定的抗拉承载力描述，这与混凝土自身材料性能不符，但主要基于以下两方面考虑：第一，考虑到内填墙分布钢筋的有益作用，通过斜向板带恒定的抗拉能力给与部分考虑；第二，考虑到下降段存在尖点，易导致数值计算不收敛。

### 3.2 斜向板带的数量

斜向板带数量对 PSRCW 结构整体性能模拟结果有一定的影响，为了量化影响程度，本文以板带数量作为参数进行了细致分析。分别建立了板带数量  $N=5$ 、 $N=7$ 、 $N=9$ 、 $N=11$ 、 $N=13$  共计 5 个模型，就整体反应与试件 PSRCW-1 的试验结果进行了对比分析。

#### 1) 骨架曲线

图 9 给出有限元模拟的不同板带数量模型的水平荷载-位移关系曲线。

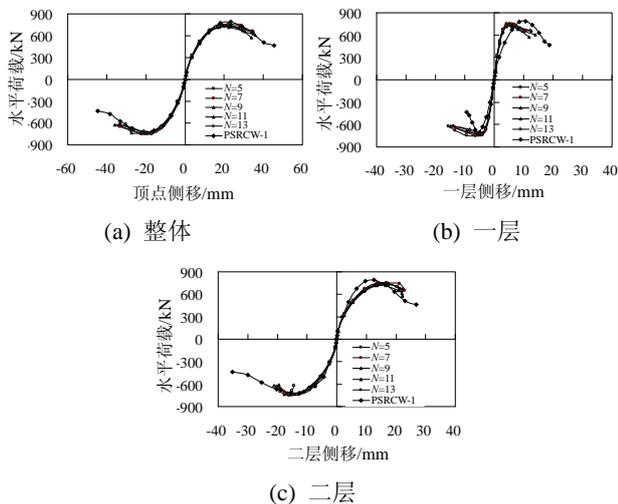


图 9 不同板带数量 PSRCW 荷载位移骨架曲线  
Fig.9 Load-displacement curves of PSRCW with different strips

从图 9 中可以看出，板带数量对 PSRCW 结构的承载力及抗侧移刚度影响轻微。

#### 2) 滞回性能

图 10 给出了 PSRCW 结构采用不同板带数量模

型有限元模拟的滞回曲线。

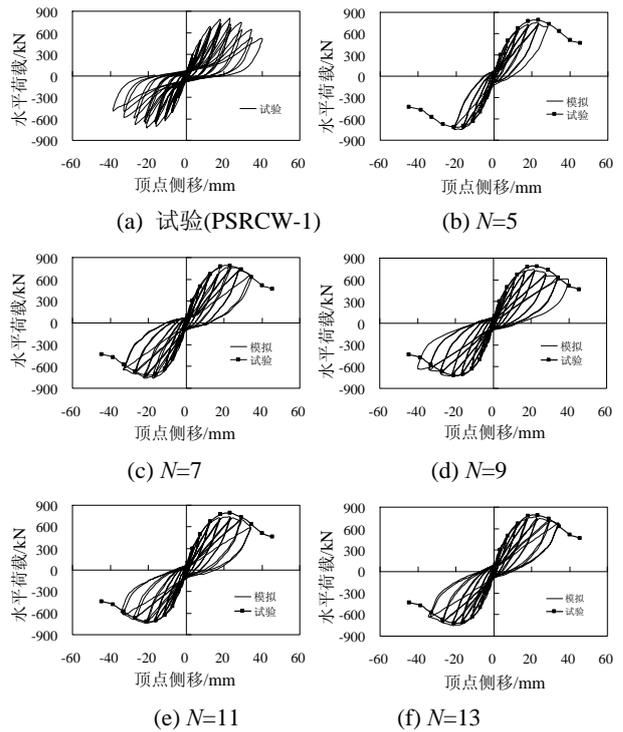


图 10 不同板带数量 PSRCW 简化模型滞回曲线对比  
Fig.10 Hysteretic curves of PSRCW with different strips

图 10(b)描述板带数量为 5 的 PSRCW 结构分析结果，该模型达到峰值荷载后，由于板带数量少导致钢框架受力过于集中，框架柱出现塑性铰，对内填墙板带约束能力丧失，承载力急剧下降，结构过早破坏。这与试验结果及试验现象存在较大程度不符。

图 10(c)~图 10(f)模型的板带数量逐渐增多，内力集中现象得到改善，钢框架受力趋于均匀。有限元模拟至结构进入下降段后，分析结果同试验仍基本一致。板带数量在 7 个以上即可对本文 PSRCW 试件的整体性能做出较为合理的评价。

#### 3) 侧移刚度

考虑到试验结果存在一定的不对称性，为了使结构整体及楼层刚度退化分析更合理，本文采用具有平均意义的“点对点”刚度进行描述。由于试验及有限元分析结果中一层变形均较小，本文仅对采用不同板带数量 PSRCW 结构的整体及二层刚度进行分析。

从图 11 可以看出简化的斜向板带模型所模拟的抗侧刚度及刚度退化趋势同试验数据相比具有较好的一致性。板带数量的改变对 PSRCW 结构的初始整体抗侧刚度和楼层抗侧刚度影响轻微。二层最大层间抗侧刚度为  $N=7$  时的 231.8kN/mm，二层

最小层间抗侧刚度为  $N=11$  时的  $213.04\text{kN/mm}$ ，两者相对误差仅为  $8.8\%$ 。

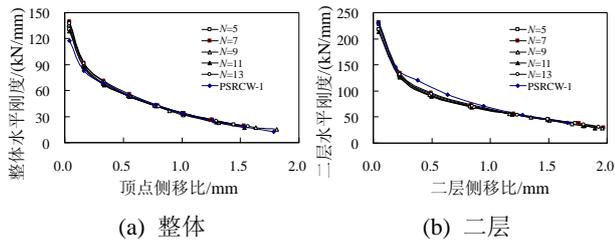


图 11 不同板带数量 PSRCW 抗侧刚度退化曲线

Fig.11 Stiffness degradation curves of PSRCW with different strips

### 3.3 斜向板带的倾角

为了研究板带倾角对 PSRCW 结构整体性能的影响程度，本节分析了倾角  $\theta=\pm 35^\circ$ 、 $\theta=\pm 40^\circ$ 、 $\theta=\pm 45^\circ$ 、 $\theta=\pm 50^\circ$ 、 $\theta=\pm 55^\circ$  这 5 个模型，并将模拟结果同试验结果进行了对比分析。

#### 1) 骨架曲线

图 12 给出了有限元模拟的不同板带倾角模型的水平荷载-位移骨架曲线。

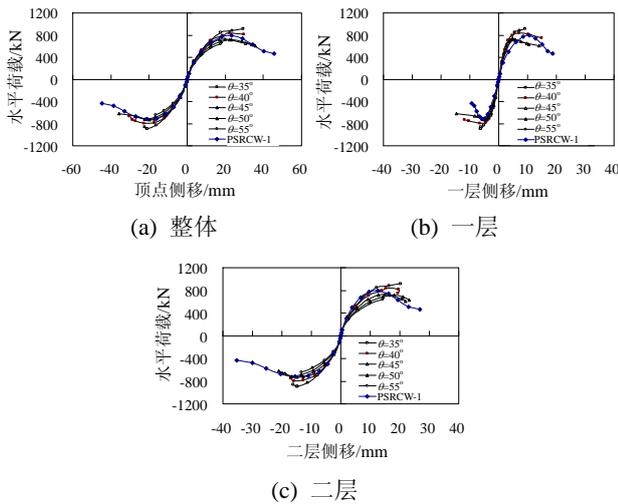


图 12 不同板带倾角 PSRCW 荷载位移骨架曲线

Fig.12 Load-displacement curves of PSRCW with different inclined angles of strips

从图 12 可以看出板带倾角对 PSRCW 结构承载力有显著影响。随着倾角的减小，有限元分析得到的结构最大水平承载力呈增大趋势。倾角较小时，板带的水平分力增大，竖向分力减小，模型的最大水平承载力过大，同时也会导致二层下部钢框架柱形成塑性铰，与试验结果不符。倾角较大时，斜压板带的水平分力较小，而竖向分力过大，导致了模型最大水平承载力过小，同时一层柱根部由于轴向压力增大而过早进入塑性，这些均与试验结果不符。内填墙斜压板带倾角采用  $\pm 45^\circ$  时，模拟结果同

试验较为一致。

#### 2) 滞回性能

图 13 给出了 PSRCW 结构采用不同板带倾角模型有限元模拟的结构整体滞回曲线。

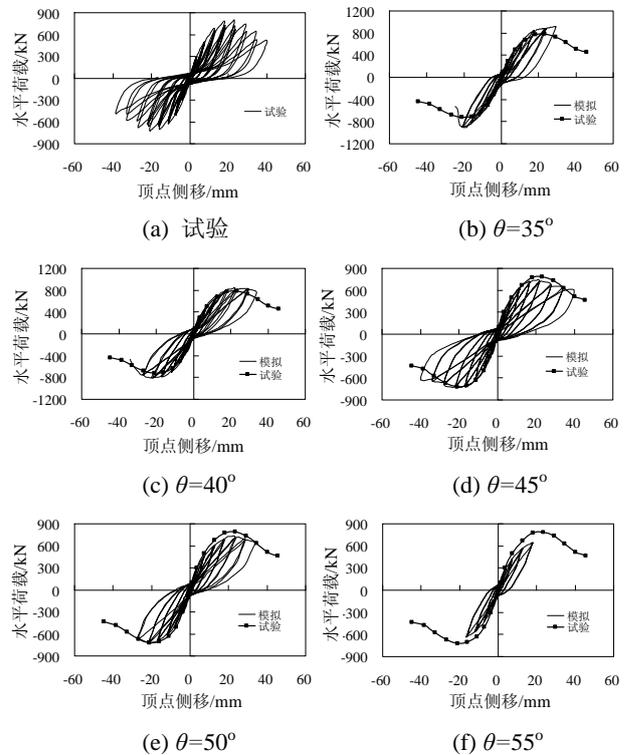


图 13 不同板带倾角 PSRCW 简化模型滞回曲线对比

Fig.13 Hysteretic curves of PSRCW with different inclined angles of strips

由图 13 可以看出板带倾角对 PSRCW 结构的滞回曲线形状影响不大，但对 PSRCW 结构的承载力影响显著。板带倾角  $\theta=45^\circ$  模拟结果同试验吻合最好。板带倾角过小和板带倾角过大均导致钢框架受力过大，提早进入屈服，并在柱端形成塑性铰，导致钢框架对内填墙板带的约束降低，结构承载力严重退化，这些结果均与试验不一致。

#### 3) 抗侧刚度

图 14 给出了采用不同板带倾角 PSRCW 结构的整体及二层刚度退化曲线。

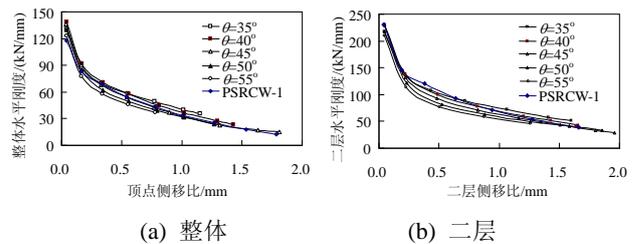


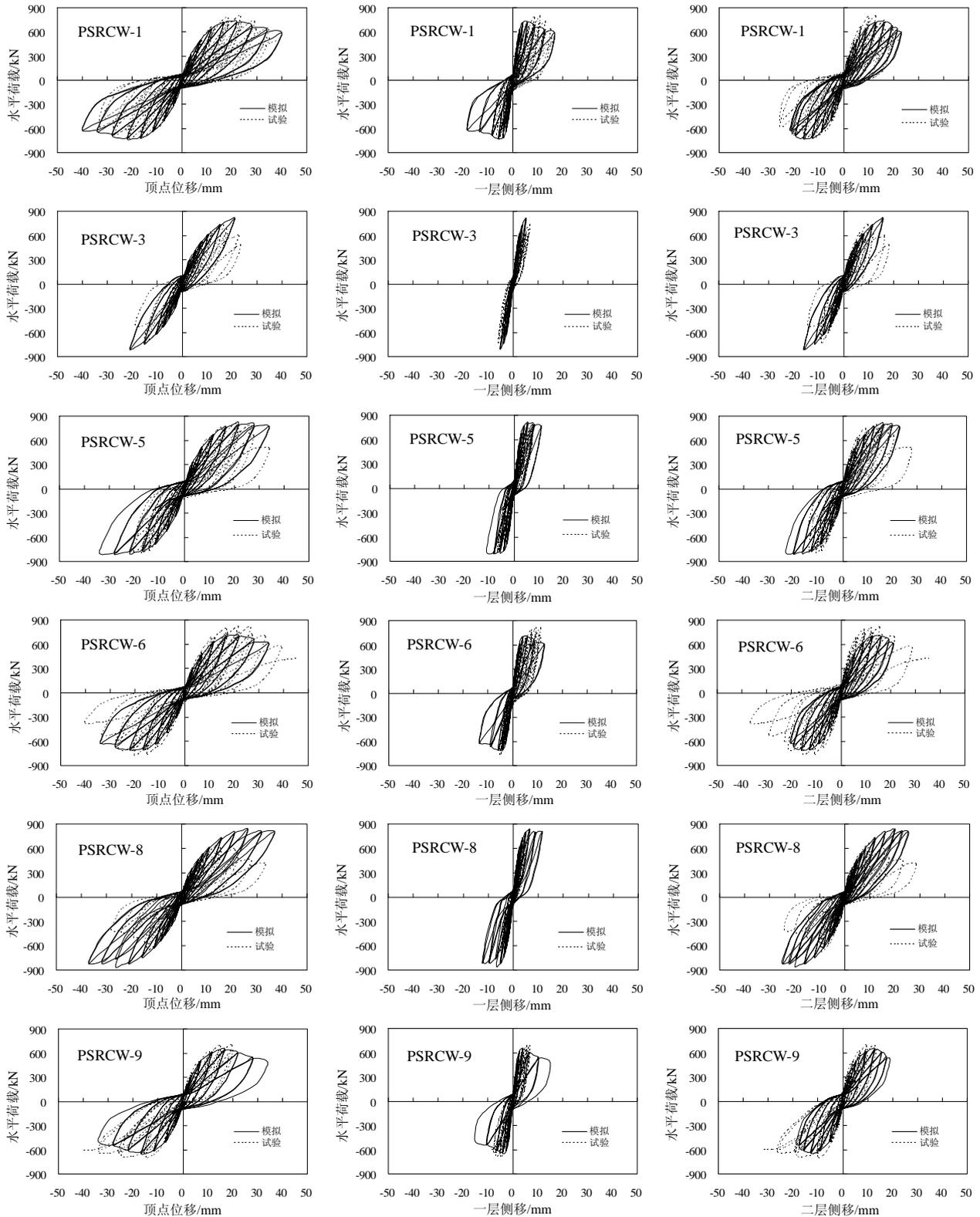
图 14 不同板带倾角 PSRCW 抗侧刚度退化曲线

Fig.14 Stiffness degradation curves of PSRCW with different inclined angles of strips

从图 14 可看出板带倾角对 PSRCW 结构的抗侧刚度及刚度退化影响较大。倾角  $45^\circ$  左右模型的初始刚度与试验结果存在较大偏差, 在顶点位移比达到 0.33% 后, 其抗侧刚度的退化规律同试验吻合最好。倾角  $30^\circ$  及  $55^\circ$  板带模型的后后期刚度同试验结果误差偏大。

#### 4 简化分析模型的验证

为了进一步证明本文提出的 PSRCW 结构简化分析模型的合理性, 对文献[14]中产生理想破坏的 7 个试件采用斜向板带模型进行了模拟, 混凝土及钢材材性均取实测值<sup>[14]</sup>, 结果如图 15 所示。



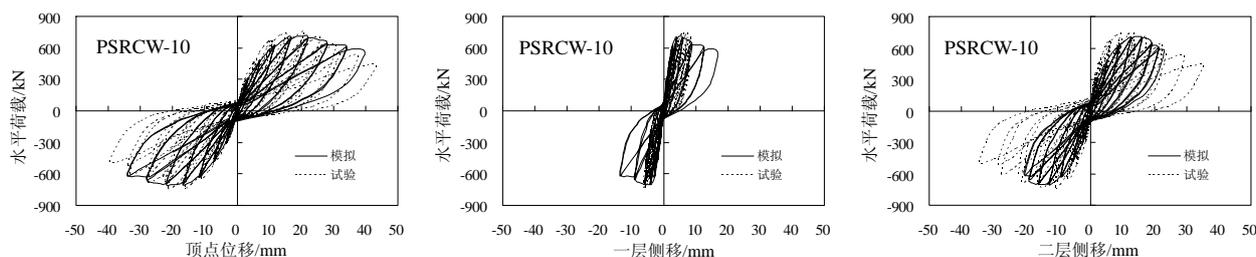


图 15 PSRCW 系列试件荷载位移滞回曲线比较

Fig.15 Comparison of hysteretic curves of PSRCW

从图 15 可知:

1) 试验实测曲线存在一定的非对称,这主要是由于两个加载方向结构的损伤存在差异,以及正向(推)加载时侧向支撑装置的摩擦力大于负向(拉)加载所致。有限元模型中结构两个方向损伤程度基本相同,分析得到的滞回曲线具有良好的对称性。

2) 由于有限元模型底部约束同试验试件底部约束条件相同,所以模拟得到的结构二层变形大于一层变形,同试验结果一致。但模拟的一层变形仍略小于试验实测的一层层间变形。

3) 加载初期试验滞回曲线的反“S”型不明显,有限元模拟结果同试验结果符合较好。加载后期试验滞回曲线出现明显的反“S”型,有限元模型采用的 Pivot 塑性滞回模型仅通过指向定点的方式部分反映混凝土的裂面效应,未能较好地反映出试件滞回曲线的反“S”型,有限元模拟曲线同试验结果误差不断增大,但承载力退化趋势基本一致。

4) 试件 PSRCW-3、PSRCW-8 顶层与钢梁相连栓钉发生疲劳断裂前,有限元模拟得到的滞回曲线同试验结果较为接近。栓钉断裂后,试验滞回曲线承载力急剧下降,后期延性较差,而本文有限元模型中斜向板带同钢框架周边铰接,不能模拟 PSRCW 结构的抗剪连接件,抗剪栓钉断裂后有限元模拟结果同试验实测结果差异较大。有限元模拟结果进一步反映出如果试件未发生栓钉的疲劳断裂,内填墙将继续充分发挥其作用,水平承载力仍可继续增大,内填墙的整体变形能力将得到最大程度发挥。PSRCW 结构属于组合结构,两者之间的组合作用由抗剪连接件提供,提高 PSRCW 结构的承载能力,最大程度发挥结构整体的变形能力,关键是发挥内填墙的作用。

有限元分析得到的试件滞回曲线体现了剪切结构所特有的捏缩效应,这说明采用 Pivot 塑性滞回模型可以较好地反映此类结构的整体反应。

## 5 结论

(1) 可以采用 Pivot 塑性滞回模型模拟 PSRCW 结构有限元模型中斜向板带的受力性能。

(2) 斜向板带数量对 PSRCW 结构的整体性能有一定影响,建议斜向板带的划分数量至少为 7 个。当内填墙的高宽比小于本文试件 0.54 时,最少板带数量应适当增加。

(3) 斜向板带的倾角对 PSRCW 结构的整体性能有显著影响,建议斜压板带倾角取为  $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$  之间可较好地描述内填墙的性能,符合内填墙板受剪机理。

(4) 基于对 PSRCW 试件的有限元模拟同试验结果的对比分析表明本文提出的简化斜向板带模型可以较好地反映 PSRCW 结构的整体性能。

## 参考文献:

- [1] Tong X D, Hajjar J F, Schultz A E, Shield C K. Cyclic behavior of steel frame structures with composite reinforced concrete infill walls and partially-restrained connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(1): 531-552.
- [2] 彭晓彤, 顾强, 林晨. 半刚性节点钢框架内填钢筋混凝土剪力墙结构试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(1): 64-69.  
Peng Xiaotong, Gu Qiang, Lin Chen. Experimental study on steel frame-reinforced concrete infill wall structures with semi-rigid joints [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(1): 64-69. (in Chinese)
- [3] 方有珍, 顾强, 申林. 半刚接钢框架(柱弱轴)-内填剪力墙结构滞回性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(2): 41-62.  
Fang Youzhen, Gu Qiang, Shen Lin. Hysteretic behavior of semi-rigid composite steel frame with reinforced concrete infill wall in column weak axis [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(2): 41-62. (in Chinese)
- [4] Mansour M Y, Hsu T T C. Behavior of reinforced concrete elements under cyclic shear. II: theoretical model [J]. Journal of Structural Engineering, 2005,

- 131(1): 54—65.
- [5] Mo Y L, Zhong Jianxia, Hsu T T C. Seismic simulation of RC wall-type structures [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(11): 3167—3175.
- [6] Jeng C H, Hsu T T C. A softened membrane model for torsion in reinforced concrete members [J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(9): 1944—1954.
- [7] Montoya E, Vecchio F J, Sheikh S A. Compression field modeling of confined concrete: constitutive models [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2006, 18(4): 510—517.
- [8] Bentz E C, Vecchio F J, Collins M P. Simplified modified compression field theory for calculating shear strength of reinforced concrete elements [J]. *ACI Structural Journal*, 2006, 103(4): 614—624.
- [9] Darwin D, Pecknold D A. Nonlinear biaxial stress-strain law for concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1977, 103: 229—241.
- [10] 孙国华, 顾强, 方有珍, 申林. 半刚接钢框架内填 RC 墙结构滞回性能试验—整体性能分析[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(1): 35—46.  
Sun Guohua, Gu Qiang, Fang Youzhen, Shen Lin. Experimental study of partially-restrained steel frame with RC infill walls: global performance analysis [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(1): 35—46. (in Chinese)
- [11] 孙国华, 何若全, 郁银泉, 方有珍. 半刚接钢框架内填 RC 墙结构滞回性能试验—局部性能分析[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(1): 47—55.  
Sun Guohua, He Ruoquan, Yu Yinquan, Fang Youzhen. Experimental study of partially-restrained steel frame with RC infill walls: local performance analysis [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(1): 47—55. (in Chinese)
- [12] Sabouri-Ghomi S, Ventura C E, Kharrazi M H K. Shear analysis and design of ductile steel plate walls [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131(6): 878—889.
- [13] Bing Qu, Bruneau M, Lin C H, Tsai K C. Testing of full-scale two-story steel plate shear wall with reduced beam section connections and composite floors [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(3): 364—373.
- [14] 孙国华. 半刚接钢框架内填 RC 墙结构滞回性能研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2010.  
Sun Guohua. Hysteretic behavior of partially-restrained steel frame with RC infill wall structural system [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [15] Dowell R K, Seible F, Wilson E L. Pivot hysteresis model for reinforced concrete members [J]. *ACI Structural Journal*, 1998, 95(5): 607—617.
- [16] Takeda T, Sozen M A, Nielsen N N. Reinforced concrete response to simulated earthquakes [J]. *Journal of the Structural Division*, 1970, 96(12): 2557—2573.
- [17] Federal Emergency Management Agency. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings [R]. Report No. FEMA 356, Federal Emergency Management Agency, Washington, 2000.
- [18] Kishi N, Chen W F. Moment rotation relations of semi-rigid connections with angles [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1990, 116(7): 1813—1834.