

DOI:10.11918/202401009

# 基于随机森林算法的型钢混凝土梁柱纤维单元参数优化

陈熹俊<sup>1</sup>, 韩小雷<sup>1,2</sup>, 张垒<sup>1</sup>, 吴智辉<sup>1</sup>, 季静<sup>1,2</sup>

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广州 510641; 2. 亚热带建筑与城市科学全国重点实验室(华南理工大学), 广州 510641)

**摘要:** 为提高型钢混凝土(steel reinforced concrete, SRC)梁柱构件的弹塑性分析精度, 提出基于随机森林算法的SRC梁柱纤维单元参数预测模型(PMFEP-SRC), 对SRC梁柱纤维单元的滞回曲线拟合效果进行优化。基于收集的153根SRC梁柱试件试验数据, 以极限承载力比值 $R_F$ 和耗能能力比值 $R_E$ 为目标参数, 承载力调整系数 $C_F$ 和刚度调整系数 $C_S$ 为调整参数, 爬山算法作为寻优手段, 实现纤维单元最优调整参数的求解。通过随机森林算法, 以SRC梁柱试件的试验控制参数作为特征参数, 纤维单元最优调整参数(求解的承载力调整系数 $C_F$ 与刚度调整系数 $C_S$ )作为标签, 训练并建立PMFEP-SRC。设计并完成一批不同剪跨比的SRC柱低周往复加载试验, 通过试验数据进一步验证了PMFEP-SRC的准确性与可靠性。结果表明: PMFEP-SRC能够较好地拟合不同破坏形态SRC梁柱试件的滞回曲线, 对SRC试件的极限承载力和耗能面积的拟合精度远高于未经参数优化的纤维单元。

**关键词:** 型钢混凝土梁柱; 纤维单元; 低周往复加载试验; 弹塑性分析; 随机森林算法

中图分类号: TU392.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)05-0127-13

## Parameter optimization of steel reinforced concrete beam-column fiber elements based on random forest algorithm

CHEN Xijun<sup>1</sup>, HAN Xiaolei<sup>1,2</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>, WU Zhihui<sup>1</sup>, JI Jing<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. State Key Laboratory of Subtropical Building and Urban Science(South China University of Technology), Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of elastic-plastic analysis for SRC (steel reinforced concrete) beam-column members, the prediction model for fiber element parameters of SRC members (PMFEP-SRC) based on random forest algorithm is proposed to optimize the hysteresis curve fitting of SRC beam-column fiber elements. Based on 153 collected SRC beam-column specimens, with the peak load capacity ratio  $R_F$  and energy dissipation capacity ratio  $R_E$  are taken as target parameters, and the load capacity adjustment factor  $C_F$  and stiffness adjustment factor  $C_S$  are taken as adjustment parameters, the hill climbing algorithm is employed to determine the optimal parameters of the fiber element. PMFEP-SRC was trained and established by the random forest algorithm with the test control parameters of SRC beam-column specimens as the characteristic parameters and the optimal adjustment parameters of the fiber element (the solved load capacity adjustment factor  $C_F$  and stiffness adjustment factor  $C_S$ ) as the labels. Finally, a batch of SRC columns with different shear-to-span ratios were designed and completed for low-cyclic loading tests, and the accuracy and reliability of PMFEP-SRC was further validated using the test data. The results show that PMFEP-SRC can effectively fit the hysteresis curves of SRC beam-column specimens with different failure modes, and the fitting accuracy of peak load capacity and energy dissipation of SRC specimens is significantly higher than that of the fiber elements without parameter optimization.

**Keywords:** steel reinforced concrete (SRC) beam-column; fiber element; low-cyclic loading tests; elastic-plastic analysis; random forest algorithm

基于性能的抗震设计方法离不开准确的构件性能水准指标限值和结构弹塑性分析<sup>[1]</sup>。目前, DBJ/T 15-151—2019《建筑工程混凝土结构抗震性能设

计规程》已建立了较为完善的RC构件和SRC构件的性能水准指标限值, 并且已经在实际工程中大量应用<sup>[2]</sup>。在此基础上, 结构弹塑性分析的准确性就

收稿日期: 2024-01-03; 录用日期: 2024-02-05; 网络首发日期: 2024-05-15

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20240513.1418.002>

基金项目: 国家自然科学基金(52178483, 52378515)

作者简介: 陈熹俊(1997—), 男, 博士研究生; 韩小雷(1964—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 韩小雷, xlan@scut.edu.cn

尤为关键。

在弹塑性分析中,构件是结构的基础分析单元,构件单元的选择直接影响弹塑性分析结果的精确性。由于计算效率高,纤维单元在梁柱构件的弹塑性分析中得到了广泛应用。然而,梁柱纤维单元模型基于平截面假定,仅适用于受弯为主的普通 RC 构件,对于剪切破坏的 RC 构件以及 SRC 构件,常常无法取得良好的模拟效果。在进行弹塑性分析时,纤维单元的材料本构模型定义对数值模拟结果影响显著,而基于单轴材料试验的常用钢筋本构模型,难以准确模拟如剪切效应、黏结滑移等因材料间相互作用引起的复杂滞回特性。

许多学者对纤维单元模拟剪切效应和黏结滑移效应的方式进行了改进。针对剪切效应,Stramandinoli 等<sup>[3]</sup>基于 Timoshenko 梁理论和修正压力场理论,提出了可考虑弯剪耦合的纤维模型;Ferreira 等<sup>[4]</sup>提出了可模拟纤维截面在正应力和剪应力共同作用下的二维纤维梁单元;Li 等<sup>[5]</sup>通过增强修正斜压场对混凝土本构进行修正,提出了基于刚度法,可考虑构件轴力、弯矩、剪力复合作用的纤维单元;Feng 等<sup>[6]</sup>采用了基于断裂能的多维软化损伤塑性模型的混凝土本构,并基于刚度法纤维单元提出了可考虑弯剪效应的数值模型。针对黏结滑移效应,Braga 等<sup>[7]</sup>假设钢筋锚固端存在线性的应力-应变场,并对纵筋本构模型进行修正,提出了可在纤维单元中考虑黏结滑移效应的钢筋本构模型;Pan 等<sup>[8]</sup>在常规钢筋本构模型中引入考虑锚固段黏

结滑移效应的钢筋应变,提出了可考虑锚固段滑移的钢筋本构模型。

综上,以往针对纤维单元的改进主要通过增加非线性剪切弹簧、添加考虑黏结的滑移单元、采用多维材料本构等手段。这些方法虽然可一定程度上提高纤维单元的模拟精度,但其参数的确定较为复杂,且单元计算效率降低,实用性不高。通过适当调整材料本构关系以间接考虑诸如钢材强化、屈曲和黏结滑移等因素对梁柱单元行为的影响,不失为一种可行的方法,而建立构件参数与材料本构调整参数之间的复杂非线性关系,可使用拟合能力强大的机器学习算法<sup>[9]</sup>。

基于收集的 153 根 SRC 梁柱试件,建立 SRC 梁柱试验数据库,并采用随机森林算法建立了 SRC 梁柱纤维单元参数预测模型(prediction model for fiber element parameters of SRC members,简称 PMFEP-SRC),该模型通过对纤维单元的材料本构参数进行调整以提高构件的模拟精度。最后,设计了一批 SRC 柱的低周往复加载试验进一步验证了 PMFEP-SRC 的准确性。

## 1 SRC 梁柱试验数据库

SRC 梁柱的低周往复加载试验数据是对其纤维单元参数进行优化的基础。因此,从公开发表论文中收集了 153 根 SRC 梁柱试件的试验数据,其中,133 根为低周往复加载试验数据。SRC 梁柱试验数据库的文献来源和主要参数的分布范围如表 1 所示。

表 1 SRC 梁柱数据库的主要参数

Tab. 1 Main parameters of SRC beam and column database

| 来源<br>文献 | 各破坏形态<br>试件数量 | 截面尺寸/<br>mm × mm      | $\lambda$   | $n_{\text{test}}$ | $f_{\text{pc}}/\text{MPa}$ | $\rho_{\text{As}_1}/\%$ | $\rho_{\text{steel}}/\%$ | $\rho_{\text{v}_s}/\%$ |
|----------|---------------|-----------------------|-------------|-------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|
| [10]     | 23            | 160 × 220             | 1.10 ~ 2.75 | 0 ~ 0.36          | 52.2 ~ 67.9                | 0.643                   | 6.11                     | 0.821 ~ 1.650          |
| [11]     | 17            | 180 × 240             | 1.52 ~ 3.55 | 0.135 ~ 0.406     | 38.2 ~ 41.5                | 0.713                   | 4.98                     | 1.070 ~ 2.140          |
| [12]     | 12            | 150 × 210             | 3.55        | 0.082 ~ 0.246     | 75.5                       | 0.499                   | 4.53 ~ 6.82              | 0.808 ~ 1.340          |
| [13]     | 1             | 450 × 450             | 3.55        | 0.072 5           | 45                         | 0.377                   | 7.01                     | 0.849                  |
| [14]     | 27            | 200 × 200             | 2.22 ~ 3.33 | 0.227 ~ 0.431     | 105                        | 0.785                   | 3.57 ~ 7.14              | 0.864 ~ 2.650          |
| [15]     | 5             | 150 × 210             | 3.32        | 0                 | 70.5                       | 0.499                   | 4.53 ~ 6.82              | 0.808 ~ 1.340          |
| [16]     | 16            | 160 × 240             | 1.32 ~ 3.27 | 0.21 ~ 0.36       | 55.8 ~ 93.9                | 0.409                   | 4.71 ~ 5.60              | 1.180 ~ 1.580          |
| [17]     | 39            | 200 × 200             | 1.67 ~ 2.78 | 0.30 ~ 0.52       | 51.6 ~ 55.2                | 0.770                   | 3.57 ~ 6.37              | 0.807 ~ 2.200          |
| [18]     | 7             | 500 × 500             | 4.17        | 0.361 ~ 0.525     | 42.4 ~ 64.0                | 0.342                   | 0 ~ 7.08                 | 1.380                  |
| [19]     | 6             | 300 × 300             | 2.95        | 0.135 ~ 0.432     | 20.7                       | 0.377                   | 4.53                     | 0.798 ~ 1.930          |
| 合计       | 153           | 150 × 210 ~ 500 × 500 | 1.10 ~ 4.17 | 0 ~ 0.525         | 20.7 ~ 105.0               | 0.342 ~ 0.785           | 0 ~ 7.14                 | 0.798 ~ 2.650          |

注: $\lambda$ 为剪跨比, $n_{\text{test}}$ 为试验轴压力系数, $f_{\text{pc}}$ 为混凝土轴心抗压强度的实测平均值, $\rho_{\text{As}_1}$ 为单侧钢筋配筋率, $\rho_{\text{steel}}$ 为型钢总配筋率, $\rho_{\text{v}_s}$ 为箍筋体积配筋率。

数据库中主要参数的计算公式如下:

$$\lambda = \frac{M}{Vh_0} = \frac{Vl}{Vh_0} = \frac{l}{h_0} \quad (1)$$

$$n_{\text{test}} = \frac{N_1}{f_{c-1}A_c + f_{ys-1}A_{\text{steel}}} \quad (2)$$

$$\rho_{As-1} = \frac{A_{As-1}}{A} \quad (3)$$

$$\rho_{\text{steel}} = \frac{A_{\text{steel}}}{A} \quad (4)$$

$$\rho_{v-s} = \frac{n_1 A_{S1} l_1 + n_2 A_{S2} l_2}{A_{\text{cor}} s_{\text{str}}} \quad (5)$$

式中: $M$ 、 $V$ 分别为控制截面所承受的弯矩值与剪力值; $h_0$ 为截面有效高度; $l$ 为等效悬臂长度; $N_1$ 为试验施加轴压力; $f_{c-1}$ 为混凝土轴心抗压强度实测值; $A_c$ 为混凝土截面面积; $f_{ys-1}$ 为型钢屈服强度实测值; $A_{\text{steel}}$ 为型钢截面面积; $A_{As-1}$ 为单侧受拉钢筋面积; $A$ 为试件截面面积; $n_1$ 、 $n_2$ 分别为截面宽度、长度方向的箍筋肢数; $A_{S1}$ 、 $A_{S2}$ 分别为截面宽度、长度方向的箍筋横截面积; $l_1$ 、 $l_2$ 分别为截面宽度、长度方向的箍筋长度; $s_{\text{str}}$ 为箍筋间距; $A_{\text{cor}}$ 为核心区混凝土的面积,核心区设为箍筋中心线包围区域。

## 2 基于 OpenSees 分析模型的建立

### 2.1 材料本构基础

为建立一个具有工程适用性的 SRC 梁柱纤维单元参数预测模型,在 OpenSees 中选用分析模型时应兼顾计算效率、计算的收敛稳定性、计算结果的准确性。因此,在建立 OpenSees 分析模型时,选用分布塑性铰模型和基于刚度法的纤维单元,将构件细分为两端塑性铰段与中间区段,塑性铰区段单元选择 Gauss-Radau 积分方法,中间区段单元选择 Gauss-Legendre 积分方法。构件截面根据材料性质的不同划分为保护层混凝土、核心区混凝土、钢筋、型钢 4 个部分。混凝土本构关系选用可考虑混凝土受拉作用的 Concrete02 模型;钢材本构关系选用可考虑钢筋受压屈曲效应、重复加载的强度退化效应与疲劳效应的 ReinforcingSteel 模型;核心区混凝土按薛岩<sup>[20]</sup>方法计算。

### 2.2 调整参数

在 SRC 梁柱弹塑性分析模型中,截面共有保护层混凝土、核心区混凝土、钢筋、型钢 4 种纤维类型,各纤维单元参数众多,且各参数有独特的作用,对构件的滞回特性都会产生影响。如混凝土极限强度与钢筋屈服强度都会影响构件的极限承载力,钢材初始刚度与钢材滞回规则都会影响构件的耗能面积,各参数对分析结果的影响存在复杂的耦合关系。因此,针对单个参数进行单独调整的方法效率较低且难以实现。为实现 SRC 梁柱纤维单元的高效、高精度拟合,提出承载力调整系数  $C_F$  和刚度调整系数

$C_S$ ,将求解纤维单元中多个最优参数的复杂问题简化为求解两个最优调整参数的问题。

#### 2.2.1 承载力调整系数 $C_F$

在实际情况下, SRC 梁柱构件存在剪切效应、黏结滑移效应等复杂作用影响构件的极限承载力。为考虑各种复杂作用对极限承载力的影响,提出了取值范围为  $(0, +\infty)$  的承载力调整系数  $C_F$  对构件承载力进行调整。

承载力调整系数  $C_F$  是调整后的材料极限强度与调整前的材料极限强度的比值,其作用是通过调整 SRC 构件所有材料本构关系的强度进而调整构件的极限承载力。为在调整材料本构关系强度的同时不影响本构关系的刚度,对所有材料本构关系中的应力、应变乘以  $C_F$ ,即以原点  $O$  为基点将材料的应力-应变关系等比例放大或缩小  $C_F$  倍,如式(6)、(7)所示:

$$\sigma_m = C_F \times \sigma_0 \quad (6)$$

$$\varepsilon_m = C_F \times \varepsilon_0 \quad (7)$$

式中: $\sigma_m$ 为调整后的应力, $\sigma_0$ 为调整前的应力, $\varepsilon_m$ 为调整后的应变, $\varepsilon_0$ 为调整前的应变。

为说明承载力调整系数  $C_F$  对弹塑性分析的影响,以文献[17]中的试件 SRC3 为例,分别将  $C_F$  取为 1.0、1.5、2.0 进行弹塑性分析,并绘制其滞回曲线,如图 1(a)所示。可以看出,随着承载力调整系数  $C_F$  增大,所有材料本构关系中的强度均等比例增加,构件骨架曲线等比例放大,构件极限承载力等比例增加,构件的刚度和耗能面积变化相对较小。总体上,承载力调整系数  $C_F$  能够以近似线性的关系对构件的极限承载力进行调整,对构件的刚度和耗能面积的影响较小。

#### 2.2.2 刚度调整系数 $C_S$

对于小剪跨比的 SRC 梁柱构件,其内部变形以剪切变形为主,截面的应变分布不满足平截面假定。因此,使用纤维单元拟合小剪跨比 SRC 梁柱并不合理,拟合结果与试验结果有较大误差。通过对大量剪切破坏的 SRC 梁柱试件进行弹塑性分析发现,放大材料本构关系中的应变,对材料刚度进行折减,可使纤维单元的滞回曲线表现出小剪跨比 SRC 梁柱构件的滞回特性。为提高纤维单元对小剪跨比 SRC 梁柱构件的拟合精度,采用取值范围为  $(0, 1]$  的刚度调整系数  $C_S$  对构件刚度进行调整。

刚度调整系数  $C_S$  是调整前的材料应变与调整后的材料应变的比值,其原理是通过放大 SRC 构件全部材料本构关系中的应变实现减小构件刚度的目的。对所有材料取用相同的刚度调整系数,对所有材料本构关系的应变乘以  $1/C_S$ ,同时保持对应的应

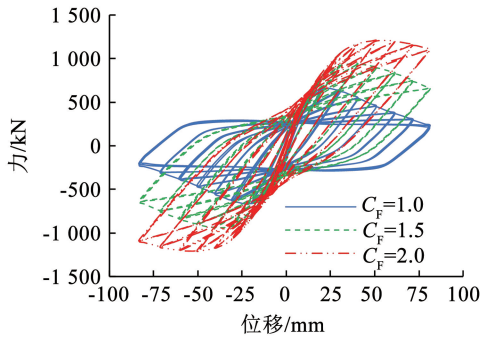
力不变,即将材料本构的应力-应变关系沿应变方向(横坐标方向)拉伸  $1/C_s$  倍,如式(8)、(9)所示:

$$\sigma_m = \sigma_o \quad (8)$$

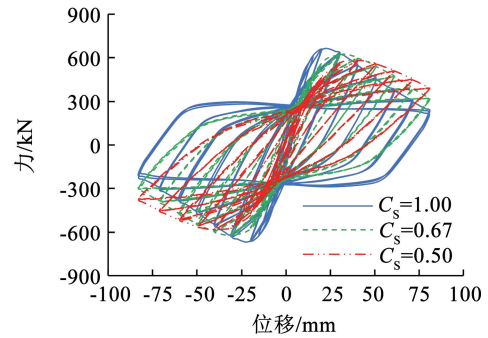
$$\varepsilon_m = \frac{\varepsilon_o}{C_s} \quad (9)$$

式中: $\sigma_m$ 为调整后的应力, $\sigma_o$ 为调整前的应力, $\varepsilon_m$ 为调整后的应变, $\varepsilon_o$ 为调整前的应变。

为说明刚度调整系数  $C_s$  对弹塑性分析的影响,



(a)  $C_F$  对构件滞回曲线的影响



(b)  $C_S$  对构件滞回曲线的影响

图 1 承载力调整系数  $C_F$ 、刚度调整系数  $C_S$  对滞回曲线的影响

Fig. 1 Effect of load capacity adjustment factor  $C_F$  and stiffness adjustment factor  $C_S$  on hysteresis curves

### 3 纤维单元最优调整参数的求解

#### 3.1 目标参数

目标参数的作用是量化数值拟合滞回曲线与试验滞回曲线之间的相似度。SRC 梁柱纤维单元最优调整参数的要求是使数值拟合滞回曲线的极限承载力和耗能能力应该与试验滞回曲线基本一致,故提出了极限承载力比值  $R_F$  和耗能能力比值  $R_E$  两个目标参数,以量化拟合的极限承载力和耗能能力与试验结果的相似度。

##### 3.1.1 极限承载力比值 $R_F$

极限承载力是构件在整个加载过程中所承受的最大侧向力,分为正向和负向极限承载力。极限承载力比值  $R_F$  取为数值拟合正负向极限承载力与试验数据比值的平均值,即

$$R_F = \frac{R_{F\_pos} + R_{F\_neg}}{2} = \frac{1}{2} \left( \frac{F_{S\_pos}}{F_{L\_pos}} + \frac{F_{S\_neg}}{F_{L\_neg}} \right) \quad (10)$$

式中: $R_{F\_pos}$ 、 $R_{F\_neg}$  分别为数值拟合的正向、负向极限承载力与试验数据的比值, $F_{S\_pos}$ 、 $F_{S\_neg}$  分别为数值拟合的正向、负向极限承载力, $F_{L\_pos}$ 、 $F_{L\_neg}$  分别为试验数据的正向、负向极限承载力。

##### 3.1.2 耗能能力比值 $R_E$

耗能能力是衡量 SRC 梁柱抗震性能的重要指标,构件的耗能能力为滞回曲线包围的面积之和,滞回曲线形状越饱满,构件耗能能力越强。耗能能力比值  $R_E$  为数值拟合的累计耗能与试验数据的比值,即

以文献[17]中试件 SRC3 为例,分别将  $C_s$  取为 0.5、0.67、1.0 进行弹塑性分析,并绘制其滞回曲线,如图 1(b) 所示。可以看出,随着刚度调整系数  $C_s$  减小,材料本构关系中的应变等比例拉伸,构件刚度等比例减小,耗能面积减小。总体上,刚度调整系数  $C_s$  能够以近似线性的关系对构件的刚度和耗能面积进行调整,而对构件极限承载力的影响较小。

$$R_E = \frac{E_{sum\_s}}{E_{sum\_t}} \quad (11)$$

式中: $R_E$  为耗能能力比值, $E_{sum\_s}$  为数值拟合的累计耗能面积, $E_{sum\_t}$  为试验的累计耗能面积。

#### 3.2 最优调整参数的求解

纤维单元最优调整参数的求解关键是找到能够逐步逼近求解目标的迭代方法,即找到调整参数  $C_F$ 、 $C_S$  与目标参数  $R_F$ 、 $R_E$  的关系。本文通过爬山算法进行调整参数的遍历与迭代,求解满足目标的最优调整参数。

##### 3.2.1 求解目标的设置

纤维单元最优调整参数的求解目标就是寻找令极限承载力比值  $R_F = 1$ 、耗能能力比值  $R_E = 1$  的承载力调整系数  $C_F$  和刚度调整系数  $C_S$ 。为提高求解效率,在求解时,设置 2% 的误差容许度,即当  $R_F \in [0.98, 1.02]$  且  $R_E \in [0.98, 1.02]$  时便认为模型具有足够精度,可以将此时的调整参数当作纤维单元的最优调整参数。

##### 3.2.2 迭代过程的设置

由 2.2 节可知,承载力调整系数  $C_F$  主要控制极限承载力,对刚度和耗能面积影响较小;而刚度调整系数  $C_S$  主要控制刚度和耗能面积,对极限承载力影响较小;承载力调整系数  $C_F$  与极限承载力比值  $R_F$ 、刚度调整系数  $C_S$  与耗能能力比值  $R_E$  分别存在独立的正相关近线性关系。故纤维单元最优调整参数的求解相当于两个独立的近线性关系的求解。

由于不存在局部最优问题,采用爬山算法进行最优值的求解,使承载力调整系数  $C_F$  朝  $|R_F - 1| = 0$  的方向迭代,刚度调整系数  $C_S$  朝  $|R_E - 1| = 0$  的方向迭代,直到满足求解目标,如图 2(a) 所示。如果爬山算法的步长设置过大,可能导致求解过程的不收敛,如图 2(b) 所示。为避免算法不收敛,对爬山算法的步长进行了细化,迭代步长设置见式(12)、(13):

$$C_{F_{i+1}} = C_{F_i} \times \left(0.7 + 0.3 \times \frac{1}{R_F}\right) \quad (12)$$

$$C_{S_{i+1}} = C_{S_i} \times \left(0.7 + 0.3 \times \frac{1}{R_E}\right) \quad (13)$$

式中: $C_{F_{i+1}}$  为下一步迭代的承载力调整系数, $C_{F_i}$  为原始的承载力调整系数, $R_F$  为极限承载力比值, $C_{S_{i+1}}$  为下一步迭代的刚度调整系数, $C_{S_i}$  为原始的刚度调整系数, $R_E$  为耗能能力比值。

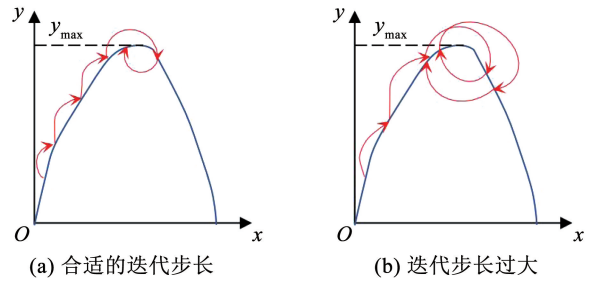


图 2 爬山算法示意

Fig. 2 Schematic diagram of hill climbing algorithm

### 3.2.3 求解结果

求解获得 133 根 SRC 梁柱试件的纤维单元最优调整参数,根据构件的破坏形态对最优调整参数进行统计,结果如表 2 所示。

表 2 纤维单元最优调整参数的分布

Tab. 2 Distribution of optimal parameters of fiber elements

| 破坏形态 | 各破坏形态试件数量 | 承载力调整系数 $C_F$ |      |      | 刚度调整系数 $C_S$ |      |      |
|------|-----------|---------------|------|------|--------------|------|------|
|      |           | 最大值           | 最小值  | 平均值  | 最大值          | 最小值  | 平均值  |
| 弯曲破坏 | 51        | 1.45          | 0.79 | 1.12 | 1.00         | 0.24 | 0.73 |
| 弯剪破坏 | 19        | 1.20          | 0.87 | 1.04 | 1.00         | 0.32 | 0.75 |
| 剪切黏结 | 22        | 1.40          | 0.83 | 1.10 | 1.00         | 0.22 | 0.61 |
| 剪切斜压 | 41        | 1.28          | 0.77 | 1.09 | 1.00         | 0.15 | 0.45 |
| 合计   | 133       | 1.45          | 0.77 | 1.10 | 1.00         | 0.15 | 0.63 |

总体上,承载力调整系数  $C_F$  取值范围为  $[0.77, 1.45]$ ,均值为 1.09,极限承载力调整范围不大,说明纤维单元能较好地拟合 SRC 梁柱构件的极限承载力。刚度调整系数  $C_S$  取值范围为  $[0.15, 1.00]$ ,均值为 0.63,说明纤维单元普遍高估了 SRC 梁柱构件的刚度,需要对刚度进行折减才能更准确地模拟 SRC 梁柱构件的力学性能。此外,剪切破坏 SRC 梁柱的刚度调整系数  $C_S$  要小于弯曲破坏构件,这是因为普通纤维单元难以模拟如剪切效应、黏结滑移等因材料间相互作用引起的复杂滞回特性,而这些作用在剪切破坏构件中更为显著。

### 3.3 拟合效果的评估

为说明 SRC 梁柱纤维单元最优调整参数的拟合效果,分别用最优调整参数纤维单元和两种常用的纤维单元(Steel01 钢材模型的纤维单元,简称 Steel01 纤维单元;Steel02 钢材模型的纤维单元,简称 Steel02 纤维单元)对本文数据库的所有试件进行弹性分析,并将 3 种模型的分析结果进行对比。

#### 3.3.1 误差指标

以平均绝对误差( $E_{MA}$ )作为误差指标评价 3 种纤维单元所拟合的极限承载力和耗能能力与试验结

果的误差,即

$$E_{MA} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |V_i - 100\%| \quad (14)$$

式中: $m$  为样本数量,即 SRC 梁柱试件数量; $V_i$  为第  $i$  根 SRC 梁柱试件极限承载力(或耗能面积)与试验数据极限承载力(或耗能面积)的比值。

#### 3.3.2 结果统计

剪跨比是 SRC 梁柱试件破坏形态的主要影响因素,为体现不同破坏形态的 SRC 梁柱试件的拟合情况,以剪跨比为横坐标,数值拟合结果与试验结果的比值为纵坐标,分别绘制 3 种纤维单元极限承载力和耗能面积的拟合结果分布,如图 3 所示。图中黑色水平虚线为 100%,代表拟合结果与试验结果完全一致。

由图 3(a) 可知,Steel01 纤维单元、Steel02 纤维单元和最优调整参数纤维单元对试件极限承载力都有较好的拟合效果,其中,最优调整参数纤维单元拟合效果最好, $E_{MA}$  仅为 1.1%;由图 3(b) 可知,Steel01 纤维单元和 Steel02 纤维单元对试件耗能能力拟合效果较差, $E_{MA}$  分别达 55.2% 和 40.3%,而最优调整参数纤维单元拟合效果较好, $E_{MA}$  仅为 3.7%。

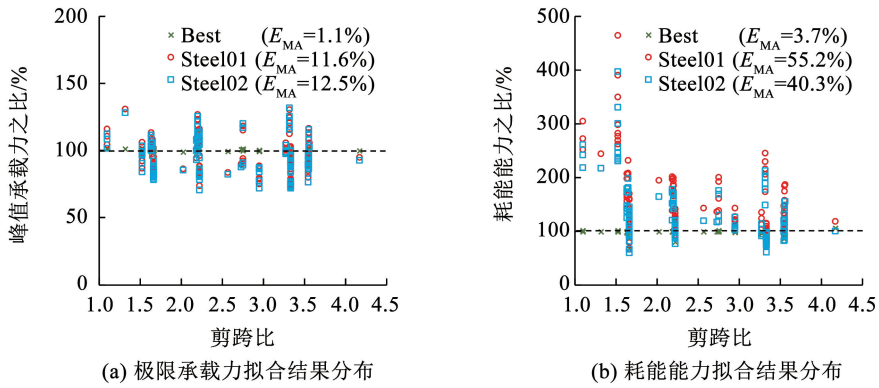


图 3 3 种纤维单元拟合结果分布

Fig. 3 Distribution of fitting results of 3 types of fiber elements

根据构件的破坏形态对 3 种纤维单元的误差指标进行整理,如表 3 所示。可以看出,最优调整参数纤维单元的极限承载力误差为 1.1%,耗能面积误差为 3.7%,拟合结果与试验数据基本一致。而 Steel01 纤维单元和 Steel02 纤维单元的极限承载力误差分别为 11.6% 与 12.5%,耗能面积误差分别为

55.2% 与 40.3%,拟合结果与试验数据有较大的差异。总体而言,最优调整参数纤维单元能够较好地描述各种破坏形态 SRC 试件的滞回特性,而 Steel01 纤维单元和 Steel02 纤维单元勉强能够拟合极限承载力,但严重高估耗能能力,对于剪切破坏的 SRC 试件这种情况更为严重。

表 3 3 种纤维单元的误差统计

Tab. 3 Statistical analysis of calculation errors of 3 types of fiber elements

| 破坏形态 | 各破坏形态试件数量 | 极限承载力误差/% |         |         | 耗能面积误差/% |         |         |
|------|-----------|-----------|---------|---------|----------|---------|---------|
|      |           | Best      | Steel01 | Steel02 | Best     | Steel01 | Steel02 |
| 弯曲破坏 | 51        | 1.1       | 13.5    | 14.9    | 4.5      | 35.3    | 25.8    |
| 弯剪破坏 | 19        | 1.3       | 8.0     | 8.2     | 3.2      | 31.6    | 18.1    |
| 剪切黏结 | 22        | 1.3       | 12.7    | 13.7    | 2.8      | 47.8    | 33.6    |
| 剪切斜压 | 41        | 0.9       | 10.4    | 11.0    | 3.2      | 94.9    | 72.2    |
| 平均   | —         | 1.1       | 11.6    | 12.5    | 3.7      | 55.2    | 40.3    |

注:Best 代表最优调整参数的纤维单元,Steel01 代表 Steel01 纤维单元,Steel02 代表 Steel02 纤维单元。

### 4 基于随机森林算法的预测模型

随机森林算法能够根据样本数据自动改进自身算法,学习样本数据的内在规律,进而能够对新的数据做出准确有效的预测与判断,适用于多变量的非线性回归。以 SRC 梁柱试件的试验控制参数作为特征数据,以纤维单元最优调整参数(求解的承载力调整系数  $C_F$  与刚度调整系数  $C_S$ ) 作为标签数据,用于训练并建立 SRC 梁柱纤维单元最优调整参数的预测模型(PMFEP-SRC),寻找 SRC 梁柱试件的试验控制参数与纤维单元最优调整参数之间的数值映射关系。

#### 4.1 输入特征参数

为降低输入的特征参数数量,对 SRC 梁柱的试验控制参数进行转换,将其转化为具有代表性的输入特征参数,共制定以下 6 类特征参数:1) 几何尺寸信息,包括截面面积  $A_{sec}$ 、截面宽高比  $R_{WH}$  和剪跨

比  $\lambda$ ; 2) 材料信息,包括混凝土轴心抗压强度实测值  $f_{c1}$ 、钢筋屈服强度实测值  $f_{y1}$ 、型钢屈服强度实测值  $f_{ys1}$ ; 3) 型钢信息,包括型钢与截面的  $z$  轴惯性矩比值  $R_{Iz}$ 、型钢与截面的  $y$  轴惯性矩比值  $R_{Iy}$ ; 4) 钢筋信息,为单侧钢筋配筋率  $\rho_{As1}$ ; 5) 箍筋信息,为配箍特征值  $\lambda_v$ ; 6) 轴力信息,为试验轴压力系数  $n_1$ 。因此,本文选用的输入特征参数共 11 个。

#### 4.2 预测模型 PMFEP-SRC 的设计与训练

确定特征参数后,以求解的纤维单元最优调整参数作为标签参数,通过现有的 Python 模块库 Scikit-learn 进行随机森林模型的建立与训练,建立 PMFEP-SRC。

##### 4.2.1 数据的划分

数据库共有 133 根 SRC 梁柱试件的低周往复加载试验数据能够用于 PMFEP-SRC 的建立。为检验 PMFEP-SRC 的可靠性和预测结果的准确性,将 133 根 SRC 梁柱试件的试验数据随机划分为训练集

(80%)与测试集(20%)。为使测试集的数据样本更具有代表性,根据SRC梁柱试件不同破坏形态的试件数量,采用分层随机抽样的方式按比例随机抽取测试集的试件。

### 4.2.2 随机森林模型的建立与训练

采用 Scikit-learn 模块库进行随机森林模型的建立与训练,设定的随机森林模型规模为 6 000 棵决策树,采用均方误差 ( $E_{MS}$ ) 作为特征选择的标准。随机森林模型的建立与训练如图 4 所示。

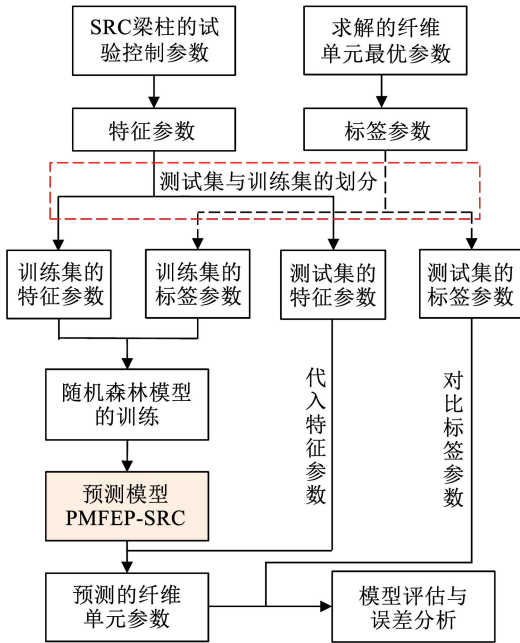


图4 PMFEP-SRC的建立与验证

Fig. 4 Establishment and validation of PMFEP-SRC

### 4.3 预测效果的评估

在建立 PMFEP-SRC 后,将测试集的特征参数

代入 PMFEP-SRC 获得预测结果,并与测试集的标签参数进行对比,以检验预测结果的准确性。

#### 4.3.1 预测结果

基于 PMFEP-SRC 的预测结果,以标签数据(求解的承载力调整系数  $C_F$  与刚度调整系数  $C_S$ )为横坐标,以预测结果(预测的承载力调整系数  $C_F$  与刚度调整系数  $C_S$ )为纵坐标,绘制测试集的预测结果对比图,如图 5 所示。可以看出,承载力调整系数  $C_F$  的数据点与刚度调整系数  $C_S$  的数据点均基本处于黑色对角线附近,均具有良好的预测精度。

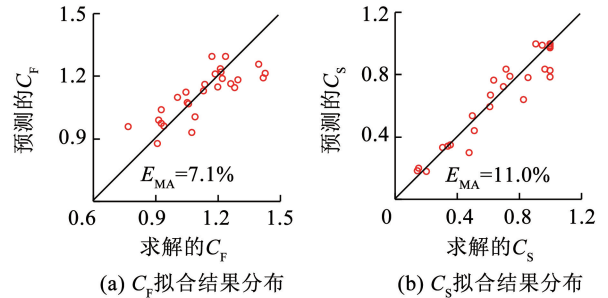


图5 承载力调整系数 $C_F$ 、刚度调整系数 $C_S$ 的预测结果

Fig. 5 Prediction results of load capacity adjustment factor  $C_F$  and stiffness adjustment factor  $C_S$

为验证该预测方法对不同破坏形态的 SRC 梁柱试件的合理性,分别绘制测试集内不同破坏形态试件的 3 种纤维单元拟合滞回曲线与试验滞回曲线的对比图,如图 6 ~ 9 所示。由图 6 ~ 9 可知,PMFEP-SRC 对所有破坏形态的 SRC 梁柱试件均有较好的拟合效果,具有较高的拟合精度;Steel01 纤维单元和 Steel02 纤维单元容易高估 SRC 试件的耗能能力,并且只能拟合弯曲破坏试件的滞回特性,无法拟合剪切破坏试件的滞回特性。

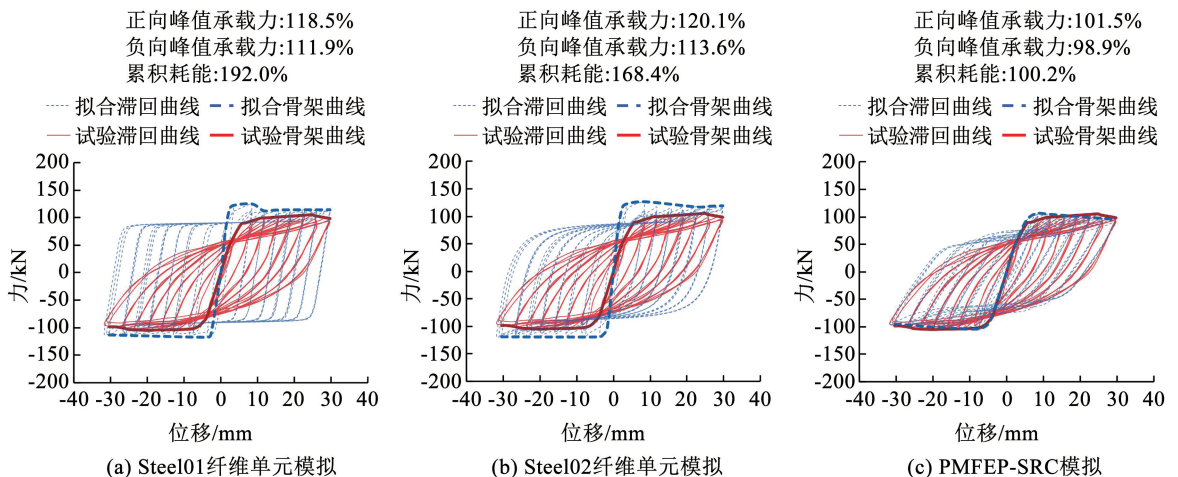


图6 3种单元对弯曲破坏试件的拟合结果(试件 1-SRC-07-1)

Fig. 6 Fitting results of flexure failure specimens of 3 types of elements (specimen 1-SRC-07-1)

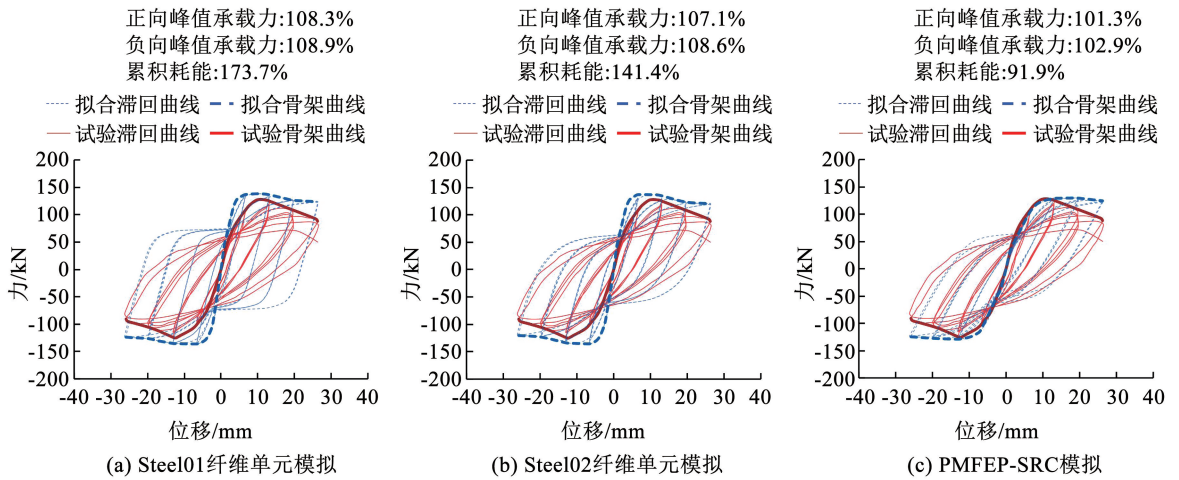


图 7 3 种单元对弯剪破坏试件的拟合结果 (试件 3-SRC-7)

Fig. 7 Fitting results of flexure-shear failure specimens of 3 types of elements (specimen 3-SRC-7)

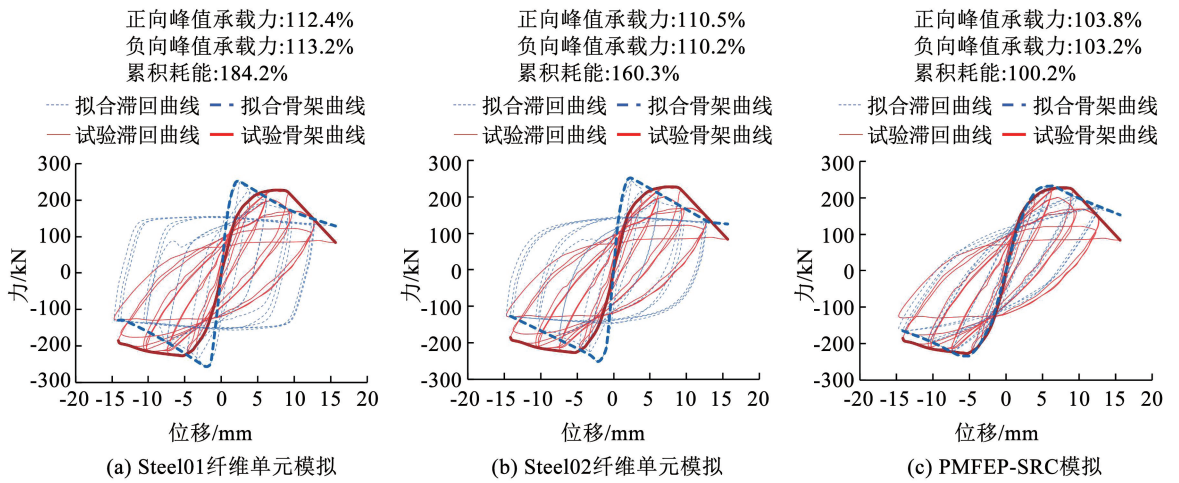


图 8 3 种单元对剪切黏结破坏试件的拟合结果 (试件 1-SRC-17)

Fig. 8 Fitting results of shear-bond failure specimens of 3 types of elements (specimen 1-SRC-17)

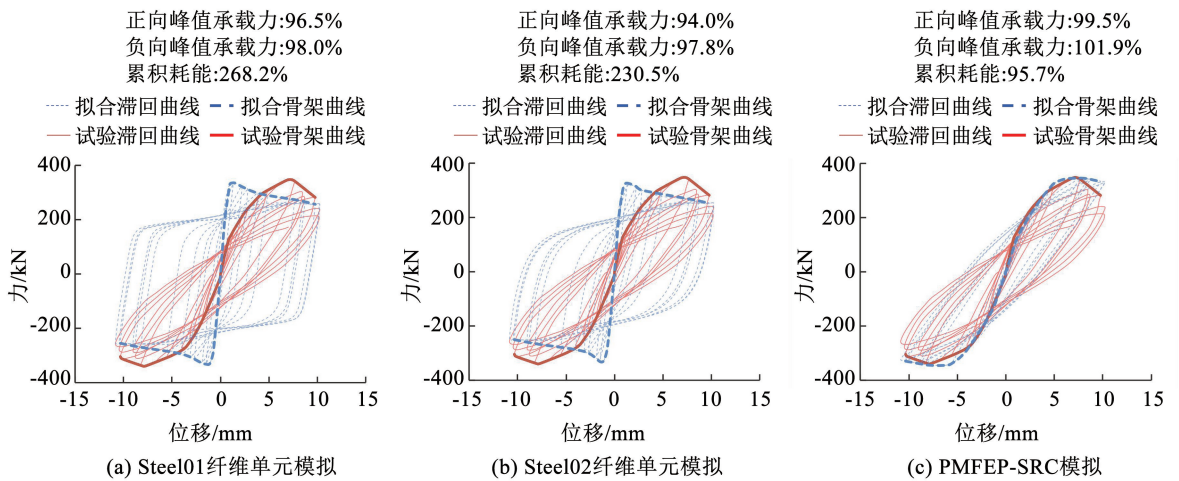


图 9 3 种单元对拟合剪切斜压破坏试件的拟合结果 (试件 2-SRRC2)

Fig. 9 Fitting results of diagonal shear failure specimens of 3 types of elements (specimen 2-SRRC2)

4.3.2 结果统计

为量化 PMFEP-SRC 的预测效果,将测试集内

PMFEP-SRC 的弹塑性分析结果与 Steel01 纤维单元和 Steel02 纤维单元进行对比,如表 4 所示。可以看

出, PMFEP-SRC 的极限承载力平均误差为 7.2%, 耗能面积平均误差为 11.5%, 拟合精度较高。而 Steel01 纤维单元和 Steel02 纤维单元的极限承载力平均误差分别为 13.6% 与 16.8%, 耗能面积平均误

差分别为 42.1% 与 32.4%, 拟合结果与试验数据有较大的差异, 并且不能拟合剪切斜压破坏试件的耗能面积(平均误差分别为 72.6% 和 58.0%)。

表 4 3 种单元的计算误差统计

Tab. 4 Statistical analysis of calculation errors of 3 types of elements

| 破坏形态 | 各破坏形态试件数量 | 极限承载力平均误差/% |         |         | 耗能面积平均误差/% |         |         |
|------|-----------|-------------|---------|---------|------------|---------|---------|
|      |           | PMFEP-SRC   | Steel01 | Steel02 | PMFEP-SRC  | Steel01 | Steel02 |
| 弯曲破坏 | 10        | 7.3         | 17.1    | 20.0    | 9.5        | 25.1    | 21.9    |
| 弯剪破坏 | 4         | 8.4         | 5.9     | 6.3     | 9.2        | 35.9    | 20.9    |
| 剪切黏结 | 5         | 5.3         | 13.2    | 15.6    | 10.3       | 32.4    | 21.4    |
| 剪切斜压 | 8         | 7.6         | 13.3    | 16.9    | 15.9       | 72.6    | 58.0    |
| 平均   | —         | 7.2         | 13.6    | 16.8    | 11.5       | 42.1    | 32.4    |

## 5 试验验证

为进一步验证 PMFEP-SRC 的可靠性, 完成了一批 SRC 梁柱低周往复加载试验并通过试验数据进行检验。

### 5.1 试验概况

制作 27 个悬臂式 SRC 柱试件并对其进行低周

往复加载试验。为充分考虑剪跨比、配钢率、轴压力对 SRC 柱试件滞回特性、极限承载力和耗能能力的影响, 并验证本文提出的 PMFEP-SRC 的合理性, 设计了  $\lambda = 3, 2.25, 1.5$  3 种剪跨比, 4%、6%、8% 3 种配钢率的试件, 对于相同剪跨比和配钢率的试件设计了 3 种不同的试验轴压力, 试件的配筋及尺寸如图 10 所示, 具体参数如表 5 所示。

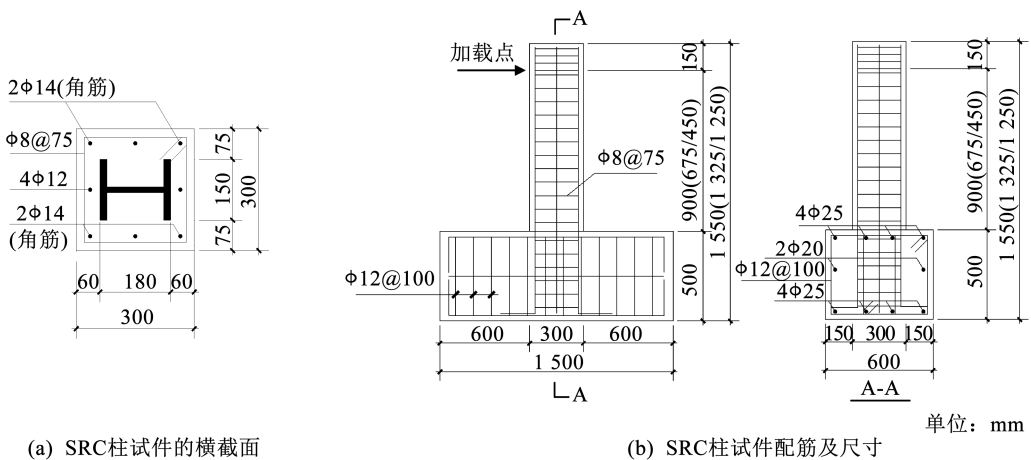


图 10 SRC 柱试件的构造示意

Fig. 10 Schematic construction of SRC column specimens

### 5.2 拟合结果与试验结果的对比较证

#### 5.2.1 预测结果

为对预测结果有更直观的认识, 将 SRC 柱试件 PMFEP-SRC 的拟合滞回曲线与试验滞回曲线进行对比, 部分结果如图 11 所示。可以看出, PMFEP-

SRC 能够较好地拟合 SRC 柱的滞回特性, 骨架曲线上升段的刚度与试验数据基本一致, 且其耗能面积基本一致, 这说明 PMFEP-SRC 对构件的极限承载力和耗能能力具有较高的拟合精度。

表 5 SRC 柱试件的主要参数

Tab. 5 Main parameters of SRC column specimens

| 试件序号 | 试件名称         | 纵筋配置                      | 箍筋配置        | 配钢率/% | 型钢厚度/mm | $n_{\text{test}}$ | 轴压力/kN | 破坏形态 |
|------|--------------|---------------------------|-------------|-------|---------|-------------------|--------|------|
| 1    | SRC-1.5-4-1  | 4 $\Phi$ 14 + 4 $\Phi$ 12 | $\Phi$ 8@75 | 4     | 8       | 0.24              | 1 340  | S    |
| 2    | SRC-1.5-6-1  | 4 $\Phi$ 14 + 4 $\Phi$ 12 | $\Phi$ 8@75 | 6     | 14      | 0.21              | 1 340  | S    |
| 3    | SRC-1.5-8-1  | 4 $\Phi$ 14 + 4 $\Phi$ 12 | $\Phi$ 8@75 | 8     | 18      | 0.18              | 1 340  | S    |
| 4    | SRC-1.5-4-2  | 4 $\Phi$ 14 + 4 $\Phi$ 12 | $\Phi$ 8@75 | 4     | 8       | 0.32              | 1 749  | S    |
| 5    | SRC-1.5-6-2  | 4 $\Phi$ 14 + 4 $\Phi$ 12 | $\Phi$ 8@75 | 6     | 14      | 0.34              | 2 182  | S    |
| 6    | SRC-1.5-8-3  | 4 $\Phi$ 14 + 4 $\Phi$ 12 | $\Phi$ 8@75 | 8     | 18      | 0.27              | 2 019  | S    |
| 7    | SRC-1.5-4-3  | 4 $\Phi$ 14 + 4 $\Phi$ 12 | $\Phi$ 8@75 | 4     | 8       | 0.41              | 2 249  | S    |
| 8    | SRC-1.5-6-3  | 4 $\Phi$ 14 + 4 $\Phi$ 12 | $\Phi$ 8@75 | 6     | 14      | 0.43              | 2 744  | S    |
| 9    | SRC-1.5-8-2  | 4 $\Phi$ 14 + 4 $\Phi$ 12 | $\Phi$ 8@75 | 8     | 18      | 0.37              | 2 718  | S    |
| 10   | SRC-2.25-4-1 | 4 $\Phi$ 14 + 4 $\Phi$ 12 | $\Phi$ 8@75 | 4     | 8       | 0.24              | 1 220  | FS   |
| 11   | SRC-2.25-6-1 | 4 $\Phi$ 14 + 4 $\Phi$ 12 | $\Phi$ 8@75 | 6     | 14      | 0.20              | 1 220  | FS   |
| 12   | SRC-2.25-8-1 | 4 $\Phi$ 14 + 4 $\Phi$ 12 | $\Phi$ 8@75 | 8     | 18      | 0.18              | 1 220  | FS   |
| 13   | SRC-2.25-4-2 | 4 $\Phi$ 14 + 4 $\Phi$ 12 | $\Phi$ 8@75 | 4     | 8       | 0.33              | 1 661  | FS   |
| 14   | SRC-2.25-6-2 | 4 $\Phi$ 14 + 4 $\Phi$ 12 | $\Phi$ 8@75 | 6     | 14      | 0.35              | 2 096  | FS   |
| 15   | SRC-2.25-8-2 | 4 $\Phi$ 14 + 4 $\Phi$ 12 | $\Phi$ 8@75 | 8     | 18      | 0.28              | 1 956  | FS   |
| 16   | SRC-2.25-4-3 | 4 $\Phi$ 14 + 4 $\Phi$ 12 | $\Phi$ 8@75 | 4     | 8       | 0.42              | 2 135  | FS   |
| 17   | SRC-2.25-6-3 | 4 $\Phi$ 14 + 4 $\Phi$ 12 | $\Phi$ 8@75 | 6     | 14      | 0.44              | 2 635  | FS   |
| 18   | SRC-2.25-8-3 | 4 $\Phi$ 14 + 4 $\Phi$ 12 | $\Phi$ 8@75 | 8     | 18      | 0.38              | 2 633  | FS   |
| 19   | SRC-3.0-4-1  | 4 $\Phi$ 14 + 4 $\Phi$ 12 | $\Phi$ 8@75 | 4     | 8       | 0.24              | 1 287  | F    |
| 20   | SRC-3.0-6-1  | 4 $\Phi$ 14 + 4 $\Phi$ 12 | $\Phi$ 8@75 | 6     | 14      | 0.20              | 1 287  | F    |
| 21   | SRC-3.0-8-1  | 4 $\Phi$ 14 + 4 $\Phi$ 12 | $\Phi$ 8@75 | 8     | 18      | 0.18              | 1 287  | F    |
| 22   | SRC-3.0-4-2  | 4 $\Phi$ 14 + 4 $\Phi$ 12 | $\Phi$ 8@75 | 4     | 8       | 0.31              | 1 707  | F    |
| 23   | SRC-3.0-6-2  | 4 $\Phi$ 14 + 4 $\Phi$ 12 | $\Phi$ 8@75 | 6     | 14      | 0.34              | 2 141  | F    |
| 24   | SRC-3.0-8-2  | 4 $\Phi$ 14 + 4 $\Phi$ 12 | $\Phi$ 8@75 | 8     | 18      | 0.27              | 1 989  | F    |
| 25   | SRC-3.0-4-3  | 4 $\Phi$ 14 + 4 $\Phi$ 12 | $\Phi$ 8@75 | 4     | 8       | 0.40              | 2 195  | F    |
| 26   | SRC-3.0-6-3  | 4 $\Phi$ 14 + 4 $\Phi$ 12 | $\Phi$ 8@75 | 6     | 14      | 0.43              | 2 692  | F    |
| 27   | SRC-3.0-8-3  | 4 $\Phi$ 14 + 4 $\Phi$ 12 | $\Phi$ 8@75 | 8     | 18      | 0.37              | 2 677  | F    |

注:1. 试件编号为“SRC-剪跨比-配钢量率-轴压力等级”,如“SRC-1.5-4-1”,其中,“1.5”表示试件剪跨比为1.5,“4”表示配钢率为4%。“S”、“FS”、“F”分别代表剪切破坏、弯剪破坏、弯曲破坏,“1”表示相同配钢率下的试验轴压力系数等级为第一级。2. 试验采用C35商品混凝土,混凝土立方体抗压强度平均值 $f_{\text{cu,m}} = 44.83$  MPa。3.  $\Phi$ 8箍筋采用HPB300,屈服强度 $f_y = 340$  MPa,极限强度 $f_u = 533$  MPa。4.  $\Phi$ 12纵筋采用HRB400,屈服强度 $f_y = 405$  MPa,极限强度 $f_u = 579$  MPa; $\Phi$ 14纵筋采用HRB400,屈服强度 $f_y = 427$  MPa,极限强度 $f_u = 608$  MPa。5. 厚度8 mm型钢采用Q345B,屈服强度 $f_y = 421$  MPa,极限强度 $f_u = 540$  MPa;厚度14 mm型钢采用Q345B,屈服强度 $f_y = 430$  MPa,极限强度 $f_u = 570$  MPa;厚度18 mm型钢采用Q345B,屈服强度 $f_y = 503$  MPa,极限强度 $f_u = 617$  MPa。

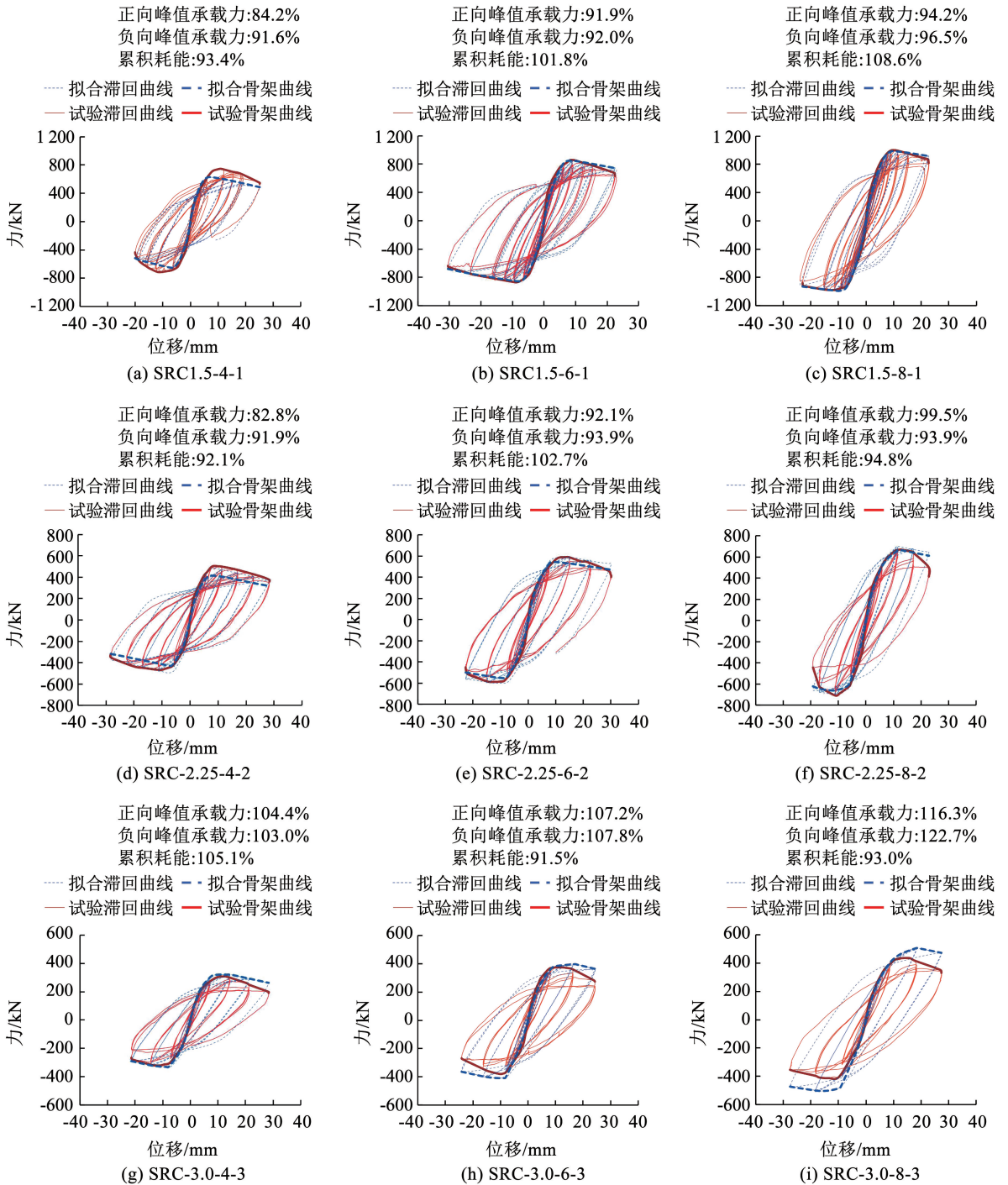


图 11 部分试件 PMFEP-SRC 的滞回曲线对比

Fig. 11 Comparison of hysteresis curves of partial specimens using PMFEP-SRC

### 5.2.2 结果统计

以试件编号为横坐标,数值拟合结果与试验结果的比值为纵坐标,分别绘制 3 种纤维单元的拟合结果分布,如图 12 所示。图中水平虚线为 100% 水平线,代表拟合结果与试验数据完全一致。

由图 12(a)可知,Steel01 纤维单元和 Steel02 纤维单元拟合效果大部分都处于 100% 线下方,低估

了试件的极限承载力,而 PMFEP-SRC 能够较好地模拟试件的极限承载力。由图 12(b)可知,Steel01 纤维单元和 Steel02 纤维单元的耗能拟合结果比较离散且均处于 100% 线上方,拟合的耗能面积远大于试验的耗能面积,而 PMFEP-SRC 的耗能面积基本处于 100% 线附近,具有较好的拟合精度。

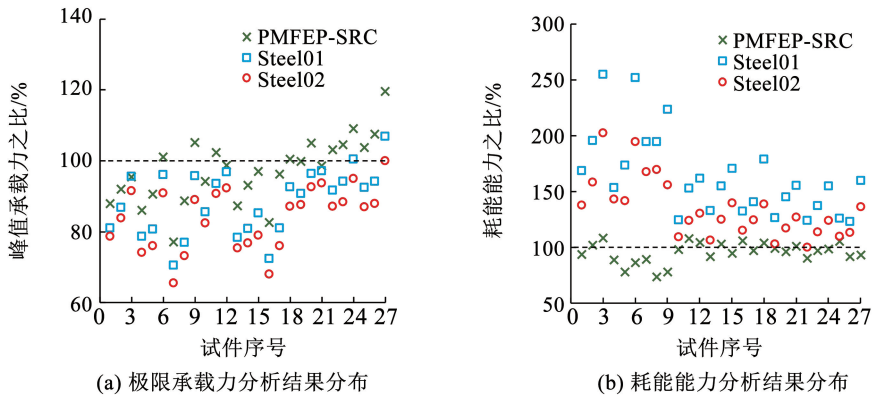


图 12 3 种纤维单元的拟合结果分布

Fig. 12 Distribution of fitting results of 3 types of fiber elements

将 3 种纤维单元的拟合结果进行统计,结果如表 6 所示。3 种纤维单元均能较好地预测 SRC 柱试件的极限承载力,其中,PMFEP-SRC 的误差在 3% 以内,Steel01 纤维单元的误差约为 12%,而 Steel02 纤维单元的误差为 16%。在耗能能力方面,只有 PMFEP-SRC 能够较好地预测 SRC 柱试件的耗能能

力,误差为 4.71%。Steel01 纤维单元与 Steel02 纤维单元都高估了 SRC 柱试件的耗能能力,误差分别为 63.19% 和 34.25%。总体而言,PMFEP-SRC 在拟合  $\lambda = 1.5$  (试件序号 1~9)、 $\lambda = 2.25$  (试件序号 10~18)、 $\lambda = 3$  (试件序号 19~27) 3 种不同剪跨比试件时,比 Steel01、Steel02 纤维单元都有更高的精确性。

表 6 3 种纤维单元的计算结果统计

Tab. 6 Statistical analysis of calculation results of 3 types of fiber elements

| 纤维单元类型    | 极限承载力       |       |          | 耗能面积        |      |          |
|-----------|-------------|-------|----------|-------------|------|----------|
|           | 与试验结果之比的平均值 | 误差    | $E_{MA}$ | 与试验结果之比的平均值 | 误差   | $E_{MA}$ |
| PMFEP-SRC | 97.2        | -2.8  | 7.3      | 95.3        | -4.7 | 7.7      |
| Steel01   | 88.6        | -11.4 | 12.0     | 163.2       | 63.2 | 63.2     |
| Steel02   | 84.0        | -16.0 | 16.0     | 134.3       | 34.3 | 34.3     |

## 6 结 论

基于 133 根 SRC 梁柱的低周往复加载试验数据建立了数据库,提出了纤维单元最优调整参数的求解方法,并基于随机森林算法,建立并训练了 SRC 梁柱纤维单元参数预测模型 (PMFEP-SRC),并通过试验数据验证了 PMFEP-SRC 的准确性与可靠性。主要结论如下:

1) 通过承载力调整系数  $C_F$  和刚度调整系数  $C_S$  对纤维单元的本构参数进行调整,可以准确模拟 SRC 梁柱构件的滞回特性。最优的强度承载力系数  $C_F$  和刚度调整系数  $C_S$  的分布区间分别为  $[0.77, 1.45]$  和  $[0.15, 1.00]$ , 均值分别为 1.10 和 0.63。相比刚度调整系数  $C_S$ , 承载力调整系数  $C_F$  的分布区间不大,说明普通纤维单元基本能拟合 SRC 梁柱构件的极限承载力。但普通纤维单元高估了 SRC 梁柱构件的刚度,需要对刚度进行折减才能更准确地模拟 SRC 梁柱构件的力学性能。

2) 建立了纤维单元最优调整参数求解的爬山算法,利用考虑承载力调整系数  $C_F$  和刚度调整系数

$C_S$  的 PMFEP-SRC 对试件的滞回曲线进行模拟,极限承载力模拟值与试验值的  $E_{MA}$  为 1.1%, 耗能能力模拟值与试验值的  $E_{MA}$  为 3.7%, 拟合精度相比常用的 Steel01、Steel02 纤维单元有 10.5% ~ 51.5% 的提升。

3) 基于随机森林算法建立的 SRC 梁柱纤维单元参数预测模型 (PMFEP-SRC) 可以准确预测构件材料本构的调整系数,从而提高构件的模拟的精度。对本文试验结果来说,相比常用的 Steel01、Steel02 纤维单元,PMFEP-SRC 的极限承载力拟合精度提升了 8.6%、13.2%, 耗能面积拟合精度提升了 67.9%、39.0%, 拟合的准确性提升明显。

## 参 考 文 献

[1] 韩小雷, 黄狄昉, 季静, 等. 《建筑工程混凝土结构抗震性能设计规程》(DBJ/T 15-151—2019) 基本思路及其工程应用[J]. 建筑结构, 2019, 49(17): 70  
 HAN Xiaolei, HUANG Difang, JI Jing, et al. Basic ideas and engineering application of specification for performance-based seismic design of reinforced concrete building structure (DBJ/T 15-151—2019) [J]. Building Structure, 2019, 49(17): 70. DOI: 10.

- 19701/j. jzjg. 2019. 17. 014
- [2] 广东省住房和城乡建设厅. 建筑工程混凝土结构抗震性能设计规程; DBJ/T 15-151—2019[S]. 广州:华南理工大学, 2019
- [3] STRAMANDINOLI R S B, LA ROVERE H L. FE model for nonlinear analysis of reinforced concrete beams considering shear deformation[J]. *Engineering Structures*, 2012(35): 244. DOI:10.1016/j. engstruct. 2011. 11. 019
- [4] FERREIRA D, BAIRAN J, MARI A. Numerical simulation of shear-strengthened RC beams [J]. *Engineering Structures*, 2013 (46): 359. DOI:10.1016/j. engstruct. 2012. 06. 050
- [5] LI Zhongxian, GAO Ying, ZHAO QiuHong. A 3D flexure-shear fiber element for modeling the seismic behavior of reinforced concrete columns[J]. *Engineering Structures*, 2016(117): 372. DOI:10.1016/j. engstruct. 2016. 02. 054
- [6] FENG Decheng, WU Gang, SUN Zeyang, et al. A flexure-shear Timoshenko fiber beam element based on softened damage-plasticity model[J]. *Engineering Structures*, 2017 (140): 483. DOI:10.1016/j. engstruct. 2017. 02. 066
- [7] BRAGA F, GIGLIOTTI R, LATERZA M, et al. Modified steel bar model incorporating bond-slip for seismic assessment of concrete structures[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2012, 138(11): 1342. DOI:10.1061/(asce)st.1943-541x.0000587
- [8] PAN Wenhao, TAO Muxuan, NIE Jianguo. Fiber beam-column element model considering reinforcement anchorage slip in the footing [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2017(15): 991. DOI: 10.1007/s10518-016-9987-3
- [9] 林翰彬. 基于机器学习的RC柱钢筋纤维本构模型研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022  
LIN Hanbin. Research on RC column reinforcement fiber constitutive model based on machine-learning [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022. DOI: 10.27151/d.cnki.gghnu.2022.001270
- [10] 李俊华. 低周反复荷载下型钢高强混凝土柱受力性能研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005  
LI Junhua. Study on the performance of steel reinforced high-strength concrete columns under low cyclic reversed loading [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2005. DOI:10.7666/d.y842032
- [11] 马辉. 型钢再生混凝土柱抗震性能及设计计算方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013  
MA Hui. Research on seismic performance and design calculation methods of steel reinforced recycled concrete columns [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013. DOI: 10.7666/d.D375586
- [12] 王斌. 型钢高强高性能混凝土构件及其框架结构的地震损伤研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010  
WANG Bin. Research on seismic damage of steel reinforced high strength and high performance concrete members and frame structures [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010. DOI: 10.7666/d.d193402
- [13] 袁书强, 陈适才, 田岳, 等. 扭转比对SRC柱抗震性能影响的试验研究与分析[J]. *工程力学*, 2018, 35(3): 167  
YUAN Shuqiang, CHEN Shicai, TIAN Yue, et al. Experimental study and analysis of torsion-bending ratio effect on aseismic performance of SRC columns [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(3): 167. DOI: 10.6052/j. issn. 1000-4750.2016.11.0908
- [14] 朱伟庆. 型钢超高强混凝土柱受力性能的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2014  
ZHU Weiqing. Behavior of steel reinforced high strength concrete columns [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014
- [15] 于飞. 型钢高强高性能混凝土框架梁地震损伤研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010  
YU Fei. Research on seismic damage of steel reinforce high strength and high performance concrete frame beams [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010. DOI: 10.7666/d.d193404
- [16] 张亮. 型钢高强高性能混凝土柱的受力性能及设计计算理论研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011  
ZHANG Liang. Research on mechanical behaviors and design theory of steel reinforced high strength and high performance concrete columns [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011. DOI: 10.7666/d.d192107
- [17] 贾金青. 钢管高强混凝土短柱及高强混凝土短柱力学性能的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2000  
JIA Jinqing. The research of srhc short columns and high-strength concrete short columns on mechanics performance [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2000
- [18] 张石昂. 高轴压比钢管高强混凝土角柱抗震性能试验研究 [D]. 北京: 清华大学, 2013  
ZHANG ShiAng. Seismic behavior of steel reinforced high strength concrete corner columns under high axial compressive force [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013
- [19] 张志伟. SRC柱变形性能及恢复力特性试验研究 [D]. 泉州: 华侨大学, 2007  
ZHANG Zhiwei. Experiment study on deformation performance and hysteretic characteristic of SRC columns [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2007. DOI: 10.7666/d.d036947
- [20] 薛岩. 钢筋混凝土柱箍筋约束性能及延性研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015  
XUE Yan. Behavior and ductility of reinforced concrete columns confined with stirrups [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015. DOI: 10.7666/d.D714585

(编辑 刘 彤)