

# Experimental Research on Seismic Damage Model of Full-Web Steel Reinforced Concrete Frame Columns

Chengxiang Xu<sup>1,2</sup>, Hang Pan<sup>1</sup>, Chong Wan<sup>1</sup>, Tiequan Ni<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou Hubei

<sup>2</sup>School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Email: cx\_xu@sina.com

Received: Oct. 28<sup>th</sup>, 2016; accepted: Nov. 15<sup>th</sup>, 2016; published: Nov. 18<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

In order to quantitatively describe the damage process of full-web Steel Reinforced Concrete (SRC) frame columns under earthquake, 4 models of full-web SRC frame columns were designed and manufactured, and the destructive test under low cyclic loading was carried out. Based on the shortcomings of the existing seismic damage models, seismic damage characteristics of full-web SRC frame columns are considered, and a seismic damage model is proposed, which takes unloading stiffness degradation corresponding to maximum deformation and the cumulative hysteretic energy dissipation as damage parameters. The seismic damage model proposed in this paper provides a theoretical reference for seismic design, dynamic reliability analysis and seismic damage assessment of full-web SRC frame columns.

## Keywords

Full-Web Steel Reinforced Concrete (SRC) Frame Columns, Seismic Damage Model, Stiffness Degradation, Accumulated Hysteretic Energy

---

# 实腹式型钢混凝土框架柱地震损伤模型试验研究

许成祥<sup>1,2</sup>, 潘航<sup>1</sup>, 万冲<sup>1</sup>, 倪铁权<sup>1</sup>

<sup>1</sup>长江大学城市建设学院, 湖北 荆州

<sup>2</sup>武汉科技大学城市建设学院, 湖北 武汉

Email: cx\_xu@sina.com

收稿日期: 2016年10月28日; 录用日期: 2016年11月15日; 发布日期: 2016年11月18日

## 摘要

为连续定量地描述实腹式型钢混凝土框架柱在地震作用下的损伤过程, 设计并制作了4根实腹式型钢混凝土框架柱模型, 对其进行了低周往复荷载破坏试验。基于已有地震损伤模型存在的不足, 结合实腹式型钢混凝土框架柱地震损伤特性, 提出了以最大变形处刚度退化和累积滞回耗能为参数的地震损伤模型。该地震损伤模型对实腹式型钢混凝土框架柱抗震设计、动力可靠性分析和震害评估提供理论参考。

## 关键词

实腹式型钢混凝土框架柱, 地震损伤模型, 刚度退化, 累积滞回耗能

## 1. 引言

《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)允许结构或者构件遭受强烈地震作用出现不同程度的损伤, 可根据其损伤程度进行加固或者修复。如果损伤控制要求过严, 针对性的加固或修复将付出沉重的经济代价, 因此, 建立一个理论上合理, 实际上能客观反映结构或构件震后受损程度的损伤模型, 便于准确评估结构或构件在地震作用后的损伤情况, 日益受到人们的关注[1]。自上世纪70年代以来, 许多学者对建筑结构地震损伤进行了广泛的研究, 提出了大量的地震损伤计算模型。各模型之间虽然选取的损伤指标各有不同, 表达形式也差异较大, 但是总结起来可以归纳为两类: 非累积损伤模型和累积损伤模型[2]。

目前地震损伤模型的研究大多是针对钢筋混凝土构件, 关于型钢混凝土构件的损伤国内外研究资料甚少。李翌新[3]综合考虑了大变形幅值以及荷载循环所引起的损伤, 提出了一种适用于劲性钢筋混凝土构件的累积损伤模型; 白国良[4]考虑变形幅值和循环加载效应影响, 建立了型钢钢筋混凝土框架柱的累积损伤模型; 郑山锁[5]以最大变形处卸载刚度的退化和累积的残余塑性变形为破坏参数, 建立了型钢高强高性能混凝土柱的地震损伤模型; 郭子雄[6]考虑型钢配钢率、剪跨比和配筋率影响, 建立了SRC柱修正的Park-Ang损伤模型。

本文基于4根实腹式型钢混凝土框架柱的拟静力试验研究, 分析其地震损伤特性, 提出了以最大变形处刚度的退化和累积滞回耗能为破坏参数的地震损伤模型。该模型基于最大变形处刚度退化和累积滞回耗能非线性组合, 对低周往复荷载作用下实腹式型钢混凝土框架柱的损伤演化过程做出了较客观的评价。

## 2. 试验概况

### 2.1. 试件设计与加载制度

基于现行设计规范或规程, 设计并制作了4根实腹式型钢混凝土框架柱模型。框架柱截面尺寸为200 mm × 270 mm, 纵筋采用HRB400, 箍筋采用HPB300, 内置Q235B级型钢选用I16。试件设计参数见表1, 试件几何尺寸与配钢设计如图1。实测混凝土立方体平均抗压强度为38.8 N/mm<sup>2</sup>, 钢材力学性能实测值如表2。

**Table 1.** Design parameters of specimens

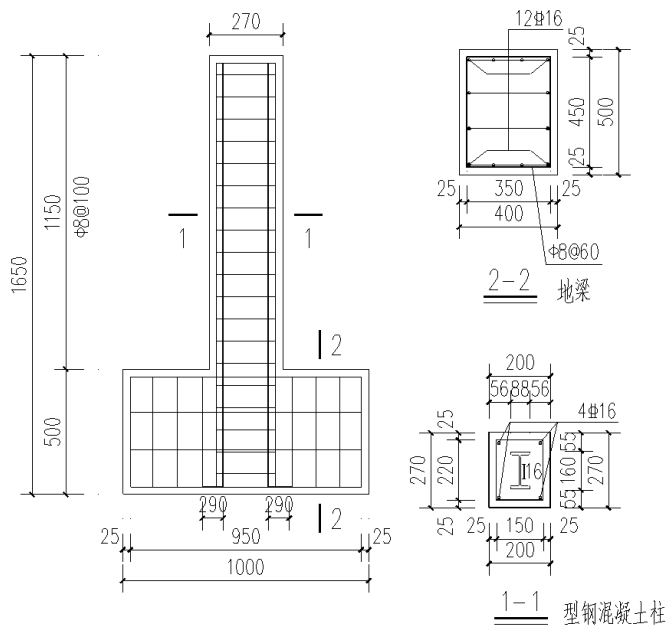
**表 1.** 试件设计参数

试件编号	轴压比	剪跨比	配筋率(%)	配箍率(%)	配钢率(%)	混凝土强度等级
SRCC-1	0.20	3.33	1.6	0.68	4.84	C40
SRCC-2	0.32	3.33	1.6	0.68	4.84	C40
SRCC-3	0.40	3.33	1.6	0.68	4.84	C40
SRCC-4	0.60	3.33	1.6	0.68	4.84	C40

**Table 2.** Material properties of steel

**表 2.** 钢材力学性能实测值

钢材	屈服强度 $f_y$ (MPa)	极限强度 $f_u$ (MPa)	弹性模量 $E_s$ (MPa)
型钢	264.5	405.8	$2.01 \times 10^5$
纵向钢筋	375.7	515.6	$2.05 \times 10^5$
箍筋	312.4	443.1	$2.10 \times 10^5$



**Figure 1.** Schematic diagram and steel distribution of specimens

**图 1.** 试件几何尺寸与配钢设计

试件地梁采用高强螺栓与地面刚性锚固。试验时，柱顶通过液压千斤顶施加竖向荷载至定值，水平荷载由电液伺服作动器按照位移控制方式在柱端施加。加载初期，侧移率 $(\Delta/L) \times 100\%$  ( $\Delta$ 为柱顶端加载处水平位移， $L$ 为柱有效高度)为 0.25%、0.5%、0.75%和 1.0%，每级位移循环一次。当超过 1.0%以后，每级位移峰值按侧移率 1.0%逐级施加，每级位移循环 3 次，直至柱顶水平荷载降至极限荷载 85%以下为破坏标准。试验加载现场如图 2。

## 2.2. 荷载 - 位移滞回曲线

通过实测的柱顶荷载和水平位移可得各构件的荷载 - 位移滞回曲线如图 3。由图 3 可以看出，在加载初期，滞回曲线的轨迹近似为一条直线，每次卸载后几乎无残余变形，构件刚度基本保持不变，处于



Figure 2. Loading device and test sit  
图 2. 试验加载装置及现场

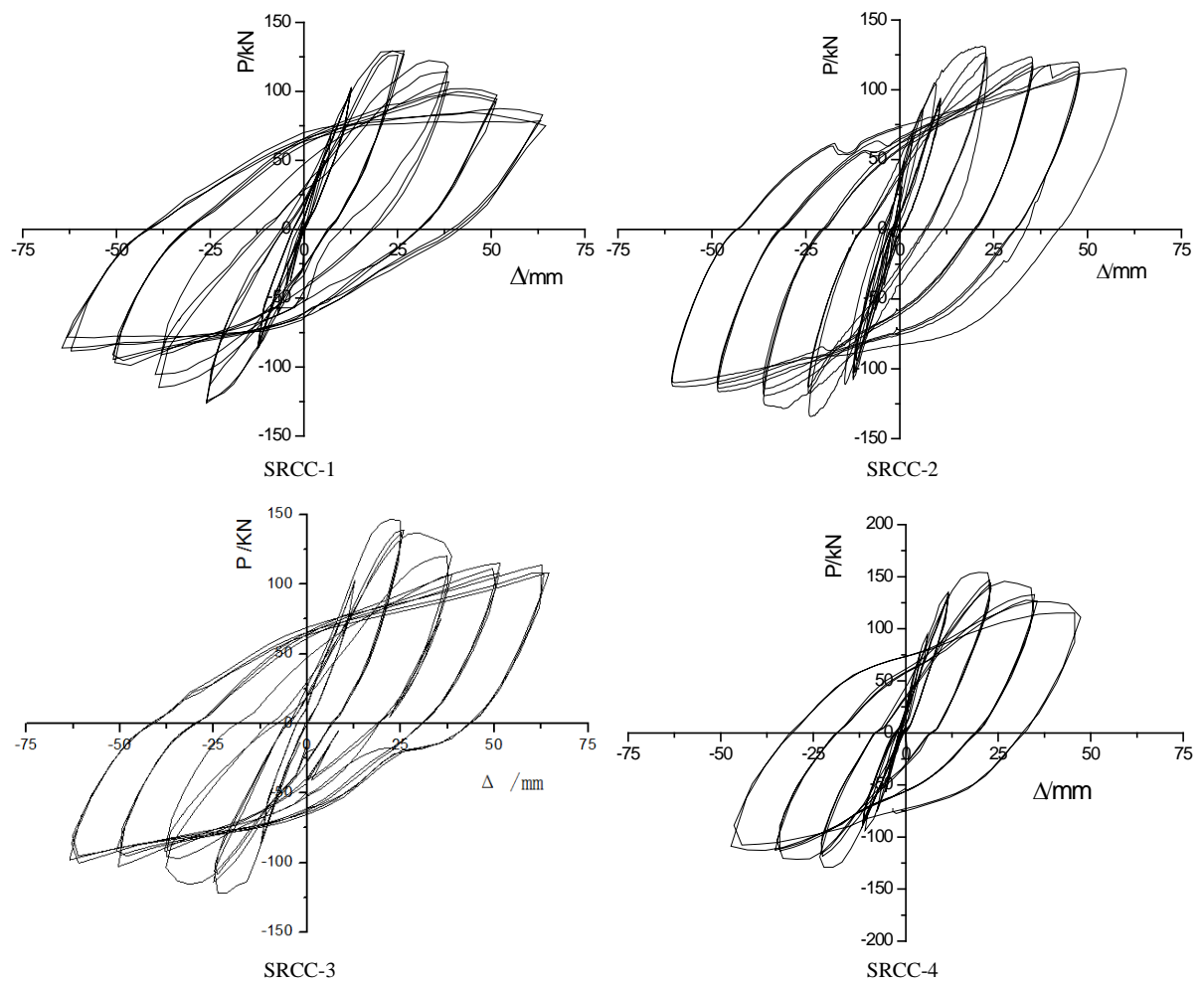


Figure 3. Hysteretic loops of specimens  
图 3. 荷载 - 位移滞回曲线

弹性工作阶段；随着荷载增加，滞回曲线逐渐偏离直线呈梭形，每一级循环加载过程中曲线斜率随位移增加逐渐减小，刚度退化现象越来越明显。随着滞回曲线由梭形逐渐变得饱满，每一级循环加载下累积滞回耗能也逐渐变大。卸载时残余变形增加，正向加载和反向加载曲线变得不对称，表明构件进入弹塑性工作阶段。当水平荷载接近极限荷载时，刚度退化的速率加快，承载能力明显下降，此时的滞回曲线兼有梭形和倒 S 形特点。

### 3. 地震损伤模型

#### 3.1. 损伤变量

大量的低周往复荷载试验表明，构件的损伤发展过程与其强度、刚度退化规律基本一致[7]。在加载过程中，随着荷载的增加，混凝土内部微裂缝逐渐发展导致混凝土开裂、剥落，纵向钢筋和型钢屈服，型钢和混凝土之间出现粘结滑移，使框架柱刚度不断退化。从图 3 可以看出：在同一位移幅值下，随着损伤的发展累积，试件刚度不断退化；当水平位移幅值逐渐增大时，试件刚度退化越来越明显。由此可见，刚度退化伴随型钢混凝土框架柱在低周往复荷载作用下的整个受力过程，并随着位移幅值的不断增大，刚度退化现象越来越严重，在一定程度上反映了低周往复荷载作用下型钢混凝土框架柱的损伤变化。

根据 Takeda 提出的滞回模型[8]，试件强度衰减与其滞回耗能有关。从图 3 可以看出：当位移幅值为屈服位移时，滞回耗能较小，滞回形状不明显；当位移幅值达到 2 倍的屈服位移之后，滞回环的形状开始发生改变，逐渐变得饱满。由此可以考虑通过试件能量耗散来反映试件强度衰减。

#### 3.2. 模型的建立

目前在地震工程界普遍接受由 Park-Ang [9]提出，基于大量钢筋混凝土框架梁、柱试验结果，建立的规格化最大位移和规格化滞回耗能线性组合双参数地震破坏模型，如式(1)：

$$D = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta}{F_y \delta_u} \int dE \quad (1)$$

式中， $\delta_m$  为构件在实际荷载作用下的最大变形， $\delta_u$  为构件在单调荷载作用下的最大变形， $F_y$  为构件的屈服强度， $dE$  为滞回耗能增量， $\beta$  为非负参数。

该模型物理意义明确，计算简单，对钢筋混凝土结构损伤具有十分重要的指导意义。但是该模型仍存在一些不足：(1) 非负参数  $\beta$  计算公式根据试验数据结果拟合得出，离散型较大，难以确定；(2) 将变形与能量进行线性组合，即认为最大变形和累积滞回耗能对损伤贡献为线性关系，没有考虑两者之间相互影响，虽然形式简单，但缺乏理论依据。

试验研究表明[10]，在低周反复荷载作用下，构件极限抵御能力(最大变形和极限耗能)随循环次数的增加而不断降低，同时随着极限抵御能力下降，构件能够经历循环次数亦不断降低。而现有损伤模型均无法很好地表达这种关系。因此，结合上述对损伤变量分析，在参考已有损伤模型的基础上，本文提出了以最大变形处刚度退化和累积滞回耗能为损伤指标的非线性组合双参数地震损伤模型，其表达式如下：

$$D = A \left( 1 - \frac{K_i}{K_0} \right)^\alpha + B \left( \frac{\sum E_i}{F_y \delta_y} \right)^\beta \quad (2)$$

式中， $A$ 、 $B$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  为组合系数， $K_0$  为试件初始刚度， $K_i$  为最大变形处试件第  $i$  周半循环割线刚度， $E_i$  为第  $i$  周半循环滞回耗能， $\sum E_i$  为循环加载过程中的累积滞回耗能， $\delta_y$  为试件屈服位移， $F_y$  为试件屈服强度。刚度退化和能量耗散的定义分别见图 4 和图 5。

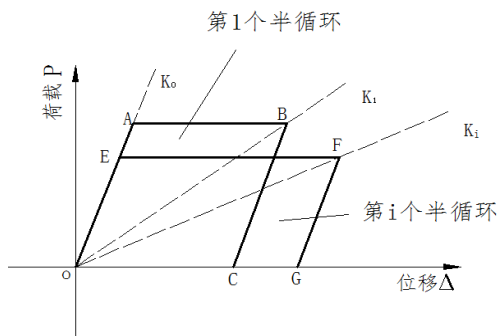


Figure 4. Definition of stiffness degradation

图 4. 刚度退化定义

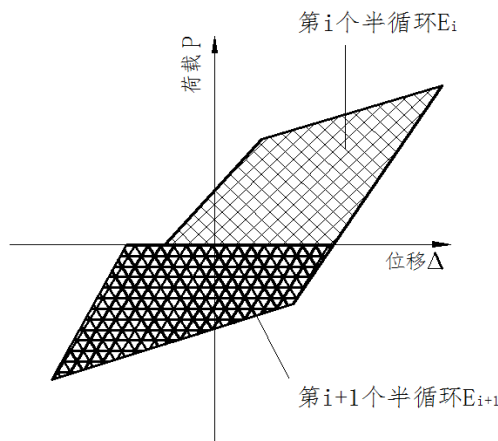


Figure 5. Definition of energy dissipation

图 5. 能量耗散定义

### 3.3. 损伤量化分析

为了实现试件损伤的定量化评估，需要将试验现象和损伤状况以具体数值来表达。通过试验获得构件损伤过程中的应变、荷载、位移等实时监控信息，分析型钢混凝土框架柱在低周往复荷载作用下损伤演化过程，对已有的钢筋混凝土构件的损伤评判准则进行修正。现对型钢混凝土框架柱的损伤进行定量划分，具体划分见表 3。

### 3.4. 模型参数的确定

按照表 3 确定的构件各特征点损伤量化值及相应的损伤指标值，对本文提出的损伤模型进行非线性多元回归分析，得到式(2)相关参数值： $A = 1.03$ ， $B = 0.12$ ， $\alpha = 1.56$ ， $\beta = 0.17$ 。于是，适用于实腹式型钢混凝土框架柱的地震损伤模型可以定量表示为：

$$D = 1.03 \left( 1 - \frac{K_i}{K_0} \right)^{1.56} + 0.12 \left( \frac{\sum E_i}{F_y \delta_y} \right)^{0.17} \quad (3)$$

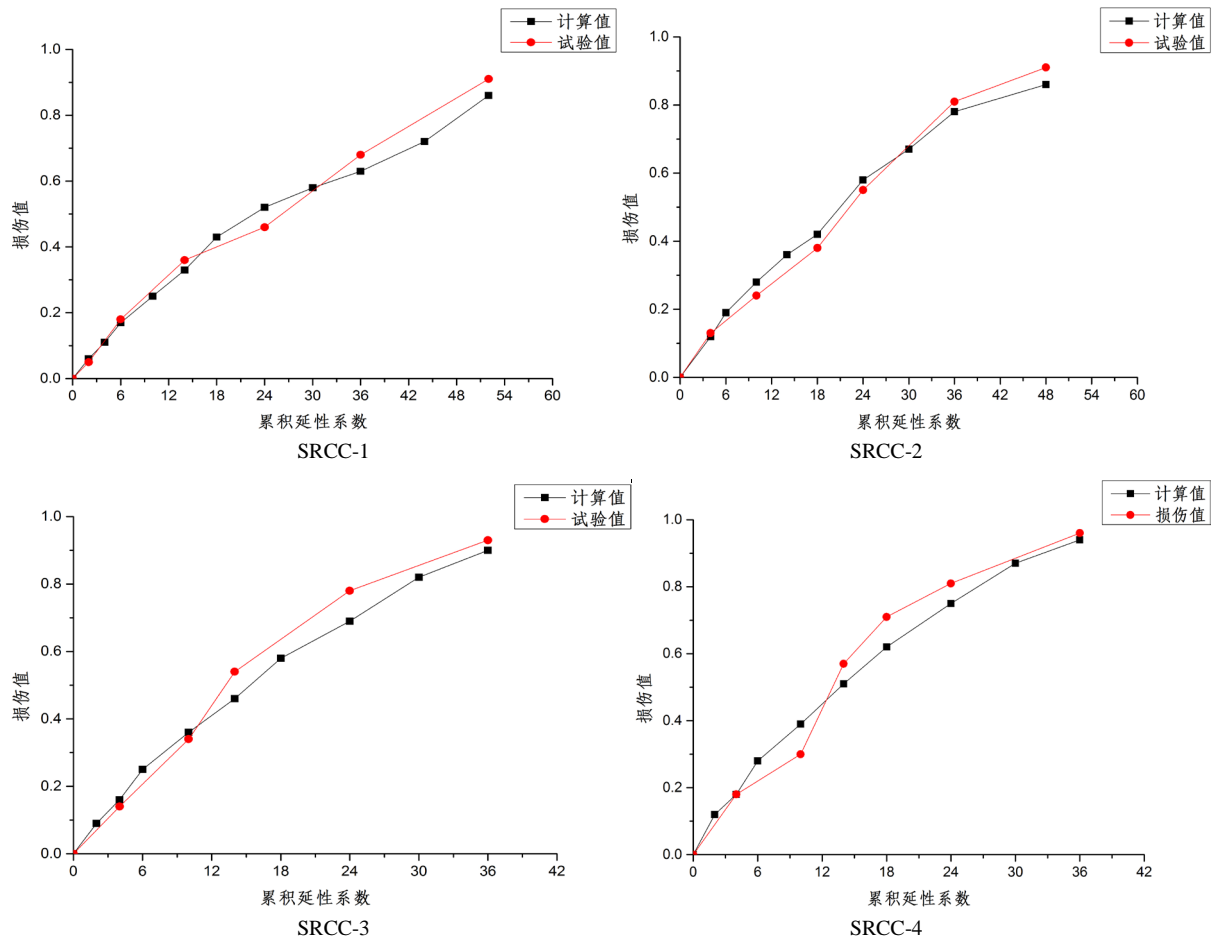
## 4. 损伤模型对比分析

图 6 为本文损伤模型获得各试件累积损伤曲线与试验损伤曲线的比较，图中横坐标为累积延性系数，可表示为  $\sum_{i=1}^n \frac{|\delta_i|}{\delta_y}$ ，其中  $n$  为施加于试件上的荷载半循环的数量； $\delta_i$  为第  $i$  个荷载半循环的最大位移；



**Table 3.** Criterion of damage quantization  
**表 3.** 损伤量化评判准则

损伤程度	损伤值	损伤状况	试验现象
基本完好	0	未损伤	柱变形较小，混凝土未开裂。
轻度破坏	0~0.3	轻度损伤	柱脚处混凝土开裂，出现水平裂缝。
中度破坏	0~0.7	可修复	柱角混凝土形成交叉斜裂缝，型钢腹板部分屈服。
重度破坏	0.7~0.9	不可修复	型钢外围混凝土斜裂缝交叉贯通，混凝土保护层剥落，型钢腹板和箍筋大部分屈服。
倒塌	0.9~1.0	完全失效	承载力急剧降低，刚度严重退化。



**Figure 6.** Comparison of damage model calculation with experiment  
**图 6.** 损伤模型计算值与试验结果对比

$\delta_y$  为构件的屈服位移。由图 6 可以看出，本文提出的损伤模型基本能反应实腹式型钢混凝土柱在低周往复荷载作用下的损伤变化，且与试验结果吻合较好。

试验改变了轴压比，由本文损伤模型计算所得的损伤累积变化曲线如图 7。从图 7 可以看出，相同累积延性系数时，轴压比大的试件损伤明显高于轴压比小的试件。整个加载过程中，轴压比小的试件损伤发展过程相对平缓，延性较好。加载前期，轴压比的影响不明显；加载后期轴压比大的试件损伤发展加快，延性较差，不利于结构抗震。

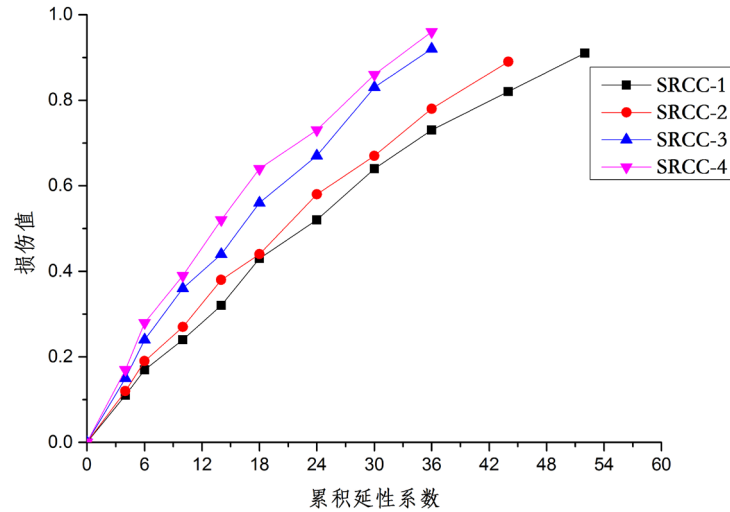


Figure 7. Influence of axial compression ratio on damage of specimens  
图 7. 轴压比对框架柱损伤的影响

## 5. 结论

(1) 基于已有地震损伤模型的分析比较,并考虑实腹式型钢混凝土框架柱在低周往复荷载作用下的损伤规律,建立了以最大变形处刚度的退化和累积滞回耗能为破坏参数的地震损伤模型,该模型与试验结果吻合较好,能较好地反映出实腹式型钢混凝土框架柱的损伤发展进程。

(2) 影响实腹式型钢混凝土框架柱损伤性能的因素有很多,但由于试验条件的限制,本文仅研究轴压比的影响,其他影响还有待进一步研究。结果表明,轴压比大的试件会产生更大的损伤,并且加载后期损伤发展较快,延性较差,不利于工程结构抗震。

## 基金项目

国家自然科学基金资助项目(51478048)、湖北省自然科学基金(创新群体)资助项目(2015CFA029)。

## 参考文献 (References)

- [1] 沈祖炎,董宝,曹文衡. 结构损伤累积分析的研究现状和存在的问题[J]. 同济大学学报, 1997, 25(2): 135-140.
- [2] 赵杰林. 混凝土结构地震损伤的研究现状及发展趋向[J]. 四川建筑科学研究, 2007, 33(6): 138-142.
- [3] 李翌新,赵世春. 钢筋混凝土及劲性钢筋混凝土构件的累积损伤模型[J]. 西南交通大学学报, 1994, 29(4): 412-417.
- [4] 白国良,赵鸿铁. 反复加载时型钢钢筋混凝土框架柱的损伤过程[J]. 西安建筑科技大学学报, 1998, 30(3): 213-216, 232.
- [5] 郑山锁,国贤发,于飞,等. 适用于型钢高强高性能混凝土柱的地震损伤模型[J]. 工业建筑, 2010, 40(8): 69-73.
- [6] 刘阳,郭子雄,黄群贤. 型钢混凝土柱的损伤模型试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(9): 203-207.
- [7] 李俊华,薛建阳,等. 低周反复荷载下型钢高强混凝土柱受力性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(7): 11-18.
- [8] Takeda, T., Sozen, M.A. and Nielsen, N.N. (1970) Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquake. *Journal of Structural Division*, **96**, 2557-2573.
- [9] Park, Y.J. and Ang, A.H.S. (1985) Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete. *ASCE, Journal of Structural Engineering*, **111**, 722-739.
- [10] 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]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.



**期刊投稿者将享受如下服务：**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)