

文章编号:1001-4888(2017)04-0525-10

## 基于变形和累积耗能的型钢再生 混凝土柱地震损伤模型研究\*

马辉<sup>1</sup>, 郭婷婷<sup>1</sup>, 薛建阳<sup>2</sup>, 刘云贺<sup>1</sup>, 董静<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 西安 710048; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055)

**摘要:**为研究型钢再生混凝土柱地震损伤性能,本文依据 17 个试件低周反复荷载试验研究结果,将型钢再生混凝土柱划分为正常使用、暂时使用、修复后使用、生命安全和防止倒塌五个状态水平;以层间位移角作为该柱抗震性能控制指标,对试验数据进行数理统计分析,确定型钢再生混凝土柱不同性能水平下量化指标取值;结合型钢再生混凝土柱受力特征,对修正的 Park-Ang 损伤模型进行改进,确定构件单调荷载下极限变形计算方法;采用多变量回归方法得到耗能因子的计算式,并分析设计参数对型钢再生混凝土柱耗能能力的影响规律,最终建立型钢再生混凝土柱基于变形和累积耗能的抗震损伤模型,结果表明:型钢再生混凝土柱在破坏状态时的损伤指标计算平均值为 0.986,接近 1.0,离散性较小;故该损伤模型用于评价型钢再生混凝土柱的地震损伤性能是可行的;在此基础上,建立了型钢再生混凝土柱不同状态水平与损伤指数的对应关系,并确定了相应的损伤指数取值。上述结论可为型钢再生混凝土柱的抗震性能设计和地震损伤评估提供参考。

**关键词:**型钢再生混凝土柱;抗震性能;性能水平;地震损伤模型;损伤指数

**中图分类号:** TU398      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.7520/1001-4888-16-103

### 0 引言

型钢再生混凝土结构兼有型钢混凝土结构承载力高、抗震性能好的优点和再生混凝土绿色环保的特点,是一种新型抗震、绿色生态环保的组合结构<sup>[1]</sup>。部分学者对该新型组合结构,尤其对型钢再生混凝土柱受力性能展开了较为深入的研究,结果表明<sup>[1-3]</sup>:与钢筋再生混凝土柱相比,型钢再生混凝土柱具有较高的承载力及变形能力,表现出较好的抗震性能,通过合理设计的型钢再生混凝土柱可应用到实际工程中。然而,目前对于型钢再生混凝土结构,特别是型钢再生混凝土柱的地震损伤特征及损伤模型研究尚未见报道,因此有必要对该方面展开相关研究。事实上,结构或结构构件在地震反复作用下将出现损伤累积,使得其力学性能不断降低,对结构后续服役的力学性能和剩余寿命无疑将产生重要影响,因此研究地震损伤对于结构或结构构件的抗震性能设计、震后损伤破坏评估及工程抗震加固具有十分重要的意义<sup>[4]</sup>。

此外,再生混凝土材料损伤研究表明<sup>[5,6]</sup>,与普通混凝土材料相比,再生混凝土初始损伤较大,这种

\* 收稿日期:2016-06-02;修回日期:2016-07-11

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51408485, 51178384),中国博士后科学基金资助项目(2015M572584),住房和城乡建设部科学技术计划项目(2015-K2-011),陕西省高校科协青年人才托举计划资助项目(20150114),陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2016JQ5024),西安市建设科技计划项目(SJW2014025),西安理工大学科学研究计划项目(2016CX028)

**通讯作者:**马辉(1985-),男,副教授,博士,硕士,主要从事钢与混凝土组合结构及再生混凝土结构研究。Email: mahuiwell@163.com

初始损伤主要包括原始混凝土长时间服役产生的损伤、废弃混凝土破碎加工成再生粗骨料时造成的内部损伤以及再生粗骨料与新砂浆界面的损伤。由于初始损伤的存在,使得再生混凝土材料损伤与普通混凝土情况存在较大不同。再生混凝土材料性能会影响型钢再生混凝土柱地震损伤性能,因此采用现有损伤模型来描述型钢再生混凝土柱地震损伤特征是不适合的,故有必要提出符合型钢再生混凝土柱受力特征的地震损伤模型。

鉴于此,本文旨在低周反复荷载试验研究的基础上,对型钢再生混凝土柱地震损伤性能进行研究,划分了该柱抗震性能水平,并给出了其不同性能水平的量化指标。结合型钢再生混凝土柱地震损伤特征,对修正 Park-Ang 模型进行改进,建立了符合型钢再生混凝土柱受力特征的地震损伤模型,依据 17 个型钢再生混凝土柱试验数据,采用多变量线性回归方法,得到了地震损伤模型中耗能因子的计算表达式。在此基础上,建立了型钢再生混凝土柱性能水平与地震损伤指数的对应关系。研究结论可为型钢再生混凝土柱抗震性能化设计提供参考。

## 1 型钢再生混凝土柱低周反复荷载试验概述

### 1.1 试件设计

试验共设计制作了 17 个缩尺比例为 1:2.5 的型钢再生混凝土柱试件,设计参数详见表 1,主要包括再生粗骨料取代率、轴压比、剪跨比以及体积配箍率。型钢再生混凝土柱截面尺寸为 240mm×180mm,型钢采用热轧成型 I14 工字钢,材质为 Q235,含钢量为 4.98%;纵筋采用 4 $\phi$ 14 的 HRB335 级钢筋,纵筋配筋率为 1.423%;箍筋采用 $\phi$ 8 的 HRB335 级钢筋。试件具体尺寸及配筋图如图 1 所示。再生混凝土强度等级为 C40,试件所采用的再生粗骨料来源于废弃混凝土,再生粗骨料物理性能指标均满足《混凝土用再生粗骨料》(GB/T25177-2010)规范要求。天然骨料采用人工碎石,细骨料采用级配良好的中粗河砂,试验采用 42.5R 级普通硅酸盐水泥,浇筑用水采用普通自来水,浇筑再生混凝土时掺入适量的奈系高效减水剂。

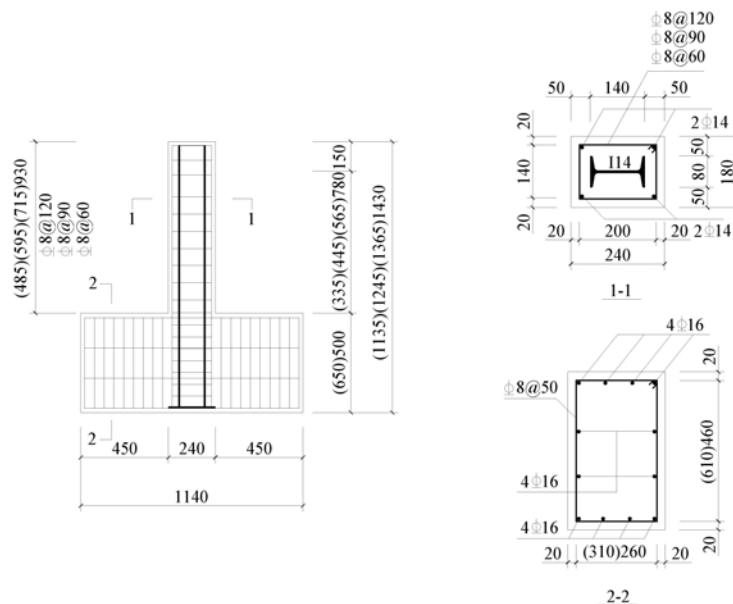


图 1 试件几何尺寸及配筋图

Fig. 1 Geometric dimensions and reinforcement of specimens

试验加载装置如图 2 所示,首先在试件柱顶通过油压千斤顶施加竖向荷载至设计值,然后在试件水平加载截面处施加水平低周反复荷载。水平荷载加载过程分为荷载控制和位移控制两个阶段,试件屈服以前采用荷载控制,每级荷载循环一次,当试件屈服后,按等幅位移增量控制,以屈服时水平位移的倍数逐级增加,每一级位移下循环三次,直到试件水平荷载下降到极限荷载的 85% 左右时,认为试件丧失承载力,试验结束。

## 1.2 试验主要结果

在低周反复荷载作用下,型钢再生混凝土柱主要发生三种破坏形态:剪切斜压破坏、弯剪破坏及弯曲破坏,试件典型破坏形态如图3所示,各试件破坏类型汇总见表1。部分试件滞回曲线如图4所示,表2为型钢再生混凝土柱水平荷载特征点。主要试验结果概述如下:再生粗骨料取代率对试件水平承载力影响较小,试件延性及耗能能力随取代率增加而降低;试件刚度退化和强度衰减速率随取代率增加而加快。剪跨比大小增加,试件位移延性系数增大,耗能能力增强,刚度退化和强度衰减较为缓慢,抗震性能增强,但试件的承载力降低。随着轴压比增加,试件延性及耗能能力降低幅度明显,且其刚度退化和强度衰减加快。随着体积配箍率增加,型钢再生混凝土柱耗能能力增强,延性系数增大,且强度衰减和刚度退化减缓,因此增大体积配箍率能改善该构件的抗震性能,详见文献[2,3]。总体上看,经合理设计的型钢再生混凝土仍具有较高的承载力和抗震性能较好的优点,可应用于实际工程中。



图2 型钢再生混凝土柱低周反复荷载试验  
Fig. 2 Cyclic loading tests of steel reinforced recycled concrete(SRRC) columns

表1 型钢再生混凝土柱设计参数汇总  
Tab. 1 Design parameters of SRRC columns

试件编号	柱高 $H(\text{mm})$	$r$	$\lambda$	$n$	$\rho_{sv}$	破坏形态
SRRC1	335	0	1.40	0.6	1.36%	剪切斜压破坏
SRRC2	335	30%	1.40	0.6	1.36%	剪切斜压破坏
SRRC3	335	70%	1.40	0.6	1.36%	剪切斜压破坏
SRRC4	335	100%	1.40	0.6	1.36%	剪切斜压破坏
SRRC5	335	100%	1.40	0.3	1.36%	剪切斜压破坏
SRRC6	335	100%	1.40	0.9	1.36%	剪切斜压破坏
SRRC7	335	100%	1.40	0.6	1.02%	剪切斜压破坏
SRRC8	335	100%	1.40	0.6	2.04%	剪切斜压破坏
SRRC9	445	100%	1.85	0.6	1.36%	弯剪破坏
SRRC10	565	100%	2.35	0.6	1.36%	弯曲破坏
SRRC11	780	0	3.25	0.6	1.36%	弯曲破坏
SRRC12	780	70%	3.25	0.6	1.36%	弯曲破坏
SRRC13	780	100%	3.25	0.6	1.36%	弯曲破坏
SRRC14	780	100%	3.25	0.3	1.36%	弯曲破坏
SRRC15	780	100%	3.25	0.9	1.36%	弯曲破坏
SRRC16	780	100%	3.25	0.6	1.02%	弯曲破坏
SRRC17	780	100%	3.25	0.6	2.04%	弯曲破坏

注:  $r$  为再生粗骨料取代率;  $\lambda$  为剪跨比;  $\rho_{sv}$  为体积配箍率;  $n$  为轴压比,  $n = N / (f_c A_c + f_a A_a)$ ,  $N$  为构件竖向荷载设计值, 其中  $f_c$  为再生混凝土抗压强度设计值,  $A_c$  为再生混凝土截面面积,  $f_a$  为型钢强度设计值,  $A_a$  为型钢截面面积。

## 2 型钢再生混凝土柱抗震性态水平及其量化指标

### 2.1 型钢再生混凝土柱抗震性态水平划分

确定结构抗震性态水平的分类是实现其抗震性能化设计的前提条件之一。文献[7]将钢筋混凝土框架结构破坏划分为五个等级,并给出了相应的层间位移角限值,即基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和倒塌。文献[8]在国内外型钢混凝土柱试验研究的基础上,提出了型钢混凝土柱四个性能水

平极限状态对应的位移角取值。文献[9]结合试验研究将型钢混凝土异形柱分为五个性能水平评价等级,并给出了相关描述。本文在现有结构性态水平划分方法的基础上,结合型钢再生混凝土柱地震破坏特征,将型钢再生混凝土柱分为五个破坏等级,分别为:基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和倒塌。与此相对应,型钢再生混凝土柱抗震性能水平可从适用性、经济性、可修复性及安全性等方面予以综合考虑,可将该柱抗震性能水平划分为:正常使用、暂时使用、修复后使用、生命安全、防止倒塌五个评价等级。上述性能水平划分方法符合我国建筑抗震设防标准,且对该结构的抗震性能评估及其设计具有积极意义。

表 2 型钢再生混凝土柱荷载特征点及位移延性系数

Tab. 2 Load characteristic points and displacement ductility coefficient of SRRC columns

试件编号	$P_{cr}$ (kN)	$\Delta_{cr}$ (mm)	$P_y$ (kN)	$\Delta_y$ (mm)	$P_{max}$ (kN)	$\Delta_{max}$ (mm)	$P_u$ (kN)	$\Delta_u$ (mm)	$\mu = \Delta_u / \Delta_y$
SRRC1	100.3	0.74	250.2	3.73	325.5	8.33	276.7	9.92	2.66
SRRC2	121.6	1.13	263.1	3.69	335.7	7.83	297.6	9.59	2.60
SRRC3	112.4	1.12	268.7	4.68	331.2	8.20	282.9	11.00	2.35
SRRC4	123.0	1.46	248.4	4.68	328.6	8.27	300.7	10.84	2.31
SRRC5	101.1	1.03	237.4	4.19	318.6	9.56	270.9	16.93	4.06
SRRC6	119.1	1.06	284.0	4.13	380.7	7.39	333.3	8.15	2.04
SRRC7	121.2	1.34	267.7	4.03	318.7	6.98	298.5	8.69	2.18
SRRC8	120.2	1.05	284.6	4.34	354.8	9.15	338.1	11.99	2.76
SRRC9	79.2	1.19	235.1	5.30	283.6	10.49	241.1	14.74	2.77
SRRC10	79.4	1.40	186.1	5.08	224.8	10.09	191.1	16.19	3.17
SRRC11	60.8	1.44	119.3	4.67	146.9	8.90	124.9	16.14	3.47
SRRC12	60.4	1.50	117.9	4.28	154.6	9.68	131.4	14.32	3.35
SRRC13	49.6	1.37	123.1	5.24	147.5	8.99	125.4	17.25	3.30
SRRC14	40.7	1.32	106.4	5.97	135.7	15.18	115.3	31.08	5.22
SRRC15	60.4	1.62	144.6	5.47	168.9	8.47	143.5	11.99	2.19
SRRC16	41.0	0.97	110.1	4.82	142.4	10.92	121.1	15.05	3.13
SRRC17	50.8	1.71	122.4	5.90	158.3	12.92	134.5	20.89	3.64

注:  $P_{cr}$  为开裂荷载;  $\Delta_{cr}$  为开裂位移;  $P_y$  为屈服荷载;  $\Delta_y$  为屈服位移;  $P_m$  为峰值荷载;  $\Delta_m$  为峰值荷载对应的位移;  $\Delta_u$  为极限位移;  $\mu$  为位移延性系数;  $P_u$  为极限荷载。

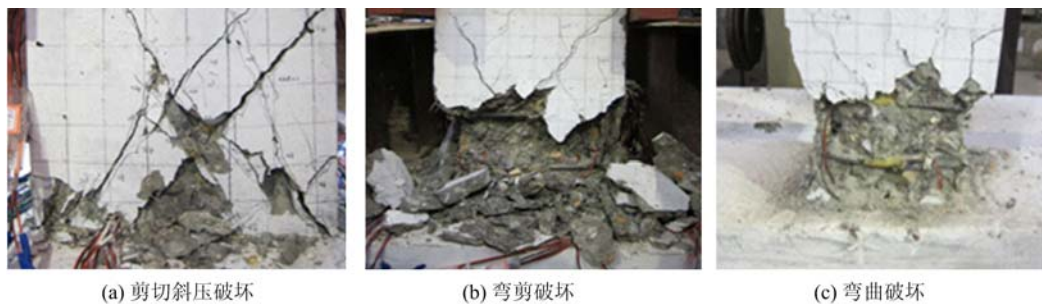


图 3 型钢再生混凝土柱典型破坏形态

Fig. 3 Typical failure modes of SRRC columns

## 2.2 型钢再生混凝土柱抗震性能水平控制指标及其量化

如何通过控制指标来合理衡量结构抗震性能水平是实现其抗震性能化设计的关键问题之一。从已有研究成果可知<sup>[7-9]</sup>,目前通常采用容许变形值作为控制指标来衡量结构的不同性能水平。层间位移角反映了构件在水平荷载作用下的变形能力,可作为衡量其抗震性能水平的评价指标,因此本文将采用

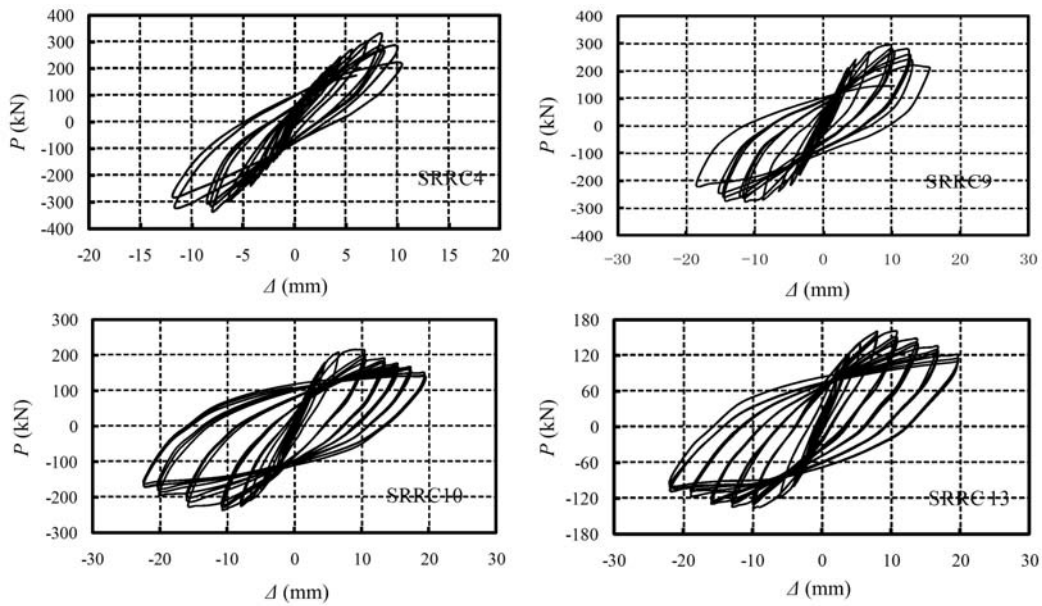


图 4 部分试件滞回曲线

Fig. 4 Hysteresis curves of partial specimens

层间位移角作为型钢再生混凝土柱抗震性能水平的量化指标。文献[9]在确定型钢混凝土异形柱抗震性能水平量化指标时,采用频数统计方法对试验数据进行处理,假定其近似服从正态分布,并采用试验数据平均值减去一倍标准差的方法来衡量结果的可靠程度,得到其概率保证率为 84.13%,满足我国当前经济发展水平要求。

本文将采用文献[9]的方法对型钢再生混凝土柱试件正负向加载试验特征点进行数学统计分析,包括试件开裂点、屈服点、峰值点和破坏点的层间位移角;并结合该柱地震破坏状态等级,建立型钢再生混凝土柱受力特征点与破坏状态等级对应关系,即开裂点对应基本完好,屈服点对应轻微破坏,峰值点对应中等破坏,破坏点对应严重破坏。表 3 为型钢再生混凝土柱层间位移角数学统计结果,其中型钢再生混凝土柱引起结构发生倒塌时的层间位移角可参考文献[10]取值为 1/35。

表 3 型钢再生混凝土柱试验荷载特征点层间位移角数理统计结果

Tab. 3 Statistical results of lateral shift angles for the test characteristics of SRRC columns

构件特征点	性能水平	层间位移角范围 $\Delta_{min} \sim \Delta_{max}$	层间位移角 均值 $\mu_{\Delta}$	层间位移角 标准差 $\sigma_{\Delta}$	满足保证率 层间位移角 $\mu_{\Delta} - \sigma_{\Delta}$	量化指标 建议取值
开裂点	正常使用	1/907~1/220	1/385	1/1089	1/596	1/600
屈服点	暂时使用	1/184~1/67	1/102	1/320	1/150	1/150
峰值点	修复后使用	1/111~1/31	1/51	1/162	1/74	1/75
破坏点	生命安全	1/70~1/19	1/35	1/112	1/51	1/50
—	防止倒塌	—	—	—	—	1/35

### 3 型钢再生混凝土柱地震损伤模型

#### 3.1 修正的 Park-Ang 损伤模型

地震损伤模型对于认识和评价结构或构件的地震损伤程度具有十分重要的意义。学者们提出了许多地震损伤模型,其中 Park-Ang 损伤模型<sup>[11]</sup>得到了广泛认可和应用,该模型充分考虑了最大变形和累积耗能两方面对结构或构件地震损伤的影响,比单独考虑最大变形或者累积耗能的损伤模型更合理,其数学表达式如下:

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

式中,  $\delta_m$  为构件的最大变形;  $\delta_u$  为构件在单调加载下的极限变形;  $E_h$  为构件实际的累积滞变耗能;  $F_y$  为构件的屈服剪力;  $\beta$  为构件的耗能因子, 可按式(2)计算:

$$\beta = \left[ -0.447 + 0.073 \frac{L}{d} + 0.24 n_0 + 0.314 \rho_t \right] \cdot 0.7 \rho_v \quad (2)$$

式中,  $L/d$  为构件的剪跨比;  $n_0$  为构件的轴压比;  $\rho_t$  为构件的受拉纵筋配筋率;  $\rho_v$  为构件的体积配箍率。

王东升等<sup>[12]</sup>结合钢筋混凝土柱构件试验研究, 提出了 Park-Ang 损伤模型的改进形式, 即修正的 Park-Ang 模型, 计算公式如下:

$$D = (1 - \beta) \frac{\delta_m - \delta_y}{\delta_u - \delta_y} + \beta \frac{E_h}{F_y(\delta_u - \delta_y)} \quad (3)$$

式中,  $\delta_y$  为构件的屈服变形, 其余符号意义同前。该模型以超过构件屈服点的变形和耗能来定义其损伤指数, 进一步明确了构件损伤指数合理取值范围, 提高了模型的可靠性。由(3)式可知, 在反复荷载作用下, 结构构件在弹性阶段无损伤, 故构件损伤指标近似为 0; 在破坏情况下, 构件损伤指标为 1.0; 与 Park-Ang 模型相比, 显然该修正损伤模型能够满足损伤指数上下界收敛的条件。鉴于此, 本文将在此模型的基础上建立符合型钢再生混凝土柱受力特征的地震损伤模型。

### 3.2 耗能因子 $\beta$ 计算

耗能因子  $\beta$  是修正 Park-Ang 损伤模型的一个重要参数, 也是建立型钢再生混凝土柱地震损伤模型的关键之一。本文结合型钢再生混凝土柱反复荷载试验研究, 将相关设计参数和试验数据代入式(3), 并令构件损伤指标  $D$  为 1.0, 可以反推计算构件的耗能因子  $\beta$ , 即

$$\beta = \frac{F_y(\delta_u - \delta_m)}{E_h - F_y(\delta_u - \delta_y)} \quad (4)$$

采用式(4)计算  $\beta$  时需要确定型钢再生混凝土柱在单调加载下的极限变形值  $\delta_u$ 。国际结构混凝土联合会(FIB)<sup>[13]</sup>基于试验数据回归给出了普通钢筋混凝土构件在单调加载下的极限位移计算公式:

$$\delta_u = \theta_u L \quad (5)$$

$$\theta_u = 0.0254 \cdot 0.3^{n_0} \left[ \frac{\max(0.01, \omega')}{\max(0.01, \omega)} \cdot f'_c \right]^{0.2} \times \left[ \frac{L}{d} \right]^{0.425} \times 25^{k_{sv} \frac{f_{sv}}{f'_c}} \quad (6)$$

式中,  $\theta_u$  为构件在单调荷载下极限转角;  $n_0$  为构件轴压比;  $\omega$  为构件受拉纵向钢筋配筋特征值;  $\omega'$  为构件受压纵向钢筋配筋特征值;  $L/d$  为构件剪跨比;  $\rho_s$  为构件面积配箍率;  $f_{sv}$  为箍筋强度;  $f'_c$  为混凝土圆柱体抗压强度;  $k$  为有效约束系数, 该值可按 Sheikh 等<sup>[14]</sup>所提的公式进行计算:

$$k = \left[ 1 - \frac{s_h}{2b_c} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{s_h}{2h_c} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{\sum b_i^2}{6b_c h_c} \right] \quad (7)$$

式中,  $b_c$  和  $h_c$  分别为构件最外层的中心线所围的约束区截面的宽度和高度;  $b_i$  为箍筋折角或弯钩约束的纵向钢筋间距;  $s_h$  为箍筋间距。

在型钢再生混凝土柱中, 型钢为构件主要受力组成部分, 型钢和箍筋对核心再生混凝土具有双重约束效应作用, 而纵筋主要起构造作用。与普通钢筋混凝土柱相比, 型钢再生混凝土柱在力学性能上存在很大差别, 故直接采用上述方法计算型钢再生混凝土柱的单调加载极限变形将产生误差, 因此有必要对上述公式进行一定的处理。本文参照文献[9]对型钢混凝土异形柱的计算方法, 结合型钢再生混凝土柱的受力特征, 作如下假定:

(1) 认为再生混凝土立方体抗压强度  $f_{rc}$  和再生混凝土圆柱体抗压强度  $f'_{rc}$  换算关系仍然为  $f'_{rc} = 0.79 f_{rc}$ ;

(2) 型钢再生混凝土柱滞回曲线近似呈正负向对称特点(如图3所示), 可认为该柱在往复荷载作用下截面近似处于一半型钢受拉, 一半型钢受压受力状态, 即式(6)中  $\omega = \omega'$ ;

(3) 型钢再生混凝土柱中型钢和箍筋对核心再生混凝土具有双重约束作用, 这与箍筋单独的约束能力具有明显差别, 显然采用式(7)计算约束系数存在偏差, 本文参照文献[1]和[9], 采用钢管混凝土套箍理论来计算型钢再生混凝土柱的有效约束系数, 计算公式如下:

$$k = \frac{A_a f_a}{A_r f_r} \quad (8)$$

式中,  $A_a$  为型钢截面面积,  $f_a$  为型钢屈服强度,  $A_r$  为构件再生混凝土截面面积, 其余符号同前。

在上述假定基础上, 采用(4)式可计算出型钢再生混凝土柱损伤指标  $D$  为 1.0(即处于破坏状态)时的耗能因子  $\beta$ , 见表 4。对耗能因子计算值进行数理统计, 可得其均值为 0.129, 标准差 0.057, 离散系数为 43.81%。由于在不同设计参数下型钢再生混凝土柱地震损伤性能存在较大差别, 导致耗能因子计算值具有较大的离散性。在型钢再生混凝土柱破坏状态时的损伤指标中, 变形项所占比例  $D_s/D$  均值为 38.41%, 累积耗能项所占比例  $D_E/D$  均值为 61.96%, 由此可知变形和累积耗能对该柱地震损伤的贡献均不可忽略, 因此采用变形和累积耗能双参数损伤模型来评价型钢再生混凝土柱的地震损伤性能是较为合理的。

表 4 型钢再生混凝土柱耗能因子  $\beta$  及损伤指数比例汇总

Tab. 4 Energy dissipation factor and damage index proportion of SRRC columns

试件编号	$r$	$\lambda$	$n$	$\rho_{sv}$	$\beta$	$D_s/D$	$D_E/D$	$D'$
SRRC1	0	1.40	0.6	1.36%	0.126	0.468	0.532	0.962
SRRC2	30%	1.40	0.6	1.36%	0.136	0.434	0.566	0.959
SRRC3	70%	1.40	0.6	1.36%	0.138	0.499	0.501	0.996
SRRC4	100%	1.40	0.6	1.36%	0.139	0.496	0.504	1.018
SRRC5	100%	1.40	0.3	1.36%	0.040	0.843	0.157	0.998
SRRC6	100%	1.40	0.9	1.36%	0.240	0.358	0.642	1.023
SRRC7	100%	1.40	0.6	1.02%	0.222	0.332	0.668	0.852
SRRC8	100%	1.40	0.6	2.04%	0.092	0.585	0.415	1.054
SRRC9	100%	1.85	0.6	1.36%	0.131	0.464	0.536	1.029
SRRC10	100%	2.35	0.6	1.36%	0.124	0.358	0.642	1.045
SRRC11	0	3.25	0.6	1.36%	0.097	0.224	0.776	0.974
SRRC12	70%	3.25	0.6	1.36%	0.114	0.186	0.814	0.999
SRRC13	100%	3.25	0.6	1.36%	0.120	0.230	0.770	1.016
SRRC14	100%	3.25	0.3	1.36%	0.029	0.433	0.567	0.768
SRRC15	100%	3.25	0.9	1.36%	0.216	0.139	0.861	1.048
SRRC16	100%	3.25	0.6	1.02%	0.141	0.195	0.805	1.008
SRRC17	100%	3.25	0.6	2.04%	0.090	0.284	0.779	1.007

从表 2 和表 4 可知, 型钢再生混凝土柱的耗能因子  $\beta$  与其位移延性有关, 构件延性越好, 则其耗能因子越小, 表明构件耗能能力增强, 即构件抗震性能越好。图 4 为试验设计参数对型钢再生混凝土柱耗能因子  $\beta$  的影响规律, 由图 5 和表 4 可知:

(1) 短柱试件和长柱试件的耗能因子  $\beta$  均随再生粗骨料取代率的增加而增大, 表明型钢再生混凝土柱的耗能能力随取代率增大而降低, 即构件延性变差, 这与表 2 中位移延性系数变化规律一致, 总体上看, 由型钢与再生混凝土组合而形成的型钢再生混凝土柱能够共同起到耗能作用, 仍具有较好的抗震性能;

(2) 轴压比对型钢再生混凝土柱耗能能力影响显著, 试件耗能因子  $\beta$  随轴压比的增大而增大, 表明型钢再生混凝土柱耗能能力随轴压比增大而降低, 即试件延性随轴压比增大而降低。因此, 在实际工程中, 需控制型钢再生混凝土柱的轴压比限值, 以满足其抗震性能要求;

(3) 型钢再生混凝土柱耗能因子  $\beta$  随体积配箍率的增大而降低, 即试件耗能能力增强, 表明增加体积配箍率对于提高型钢再生混凝土柱抗震延性是有利的;

(4) 试件耗能因子  $\beta$  随剪跨比的增大而降低, 这主要因为不同剪跨比下型钢再生混凝土柱的地震破坏形态不同, 导致其试件耗能能力存在差异, 发生弯曲破坏的长柱耗能能力明显强于发生剪切斜压破



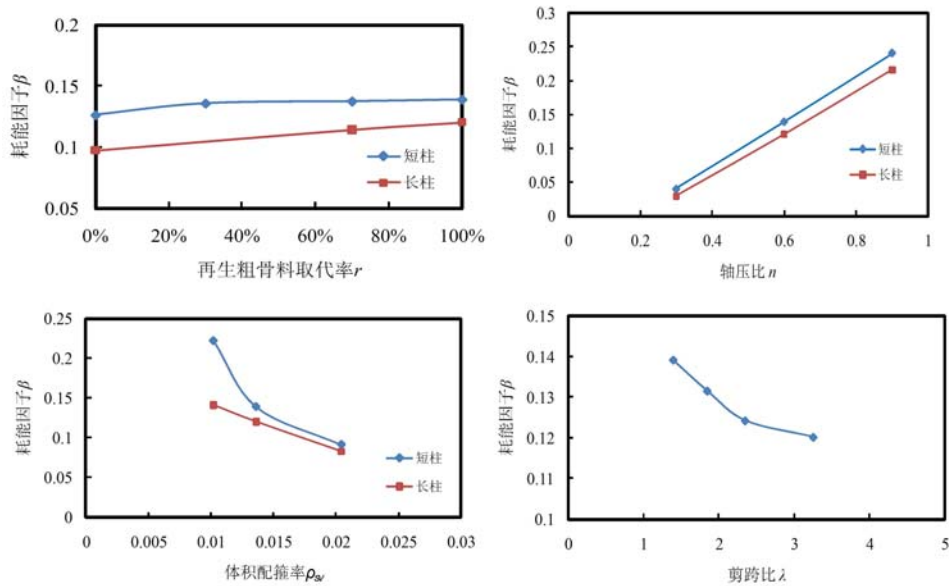
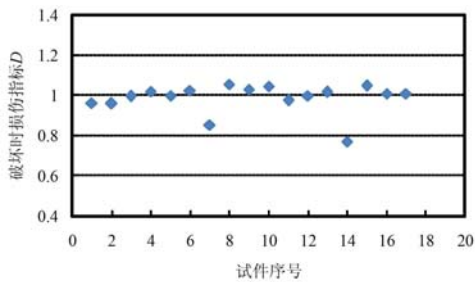


图5 设计参数对型钢再生混凝土柱耗能因子的影响

Fig. 5 Effect of design parameters on energy dissipation factor of SRRC columns

图6 型钢再生混凝土柱破坏状态时  
损伤指数计算值Fig. 6 Calculation value of damage indexes of  
SRRC columns in a state of destruction

均值为 0.986, 标准差为 0.073, 离散系数为 7.40%。可见将耗能因子  $\beta$  的回归公式代入地震损伤模型中, 计算得到型钢再生混凝土柱破坏状态时的损伤指标平均值得接近 1.0, 离散性较小, 满足计算要求, 如图 6 所示。

上述计算结果表明, 改进的损伤模型较好地反映了型钢再生混凝土柱破坏状态时的地震损伤特征, 可初步用于评价型钢再生混凝土柱地震损伤性能。

#### 4 型钢再生混凝土柱不同性态水平的损伤指标取值

目前, 通常采用地震损伤指数来衡量结构或构件的地震损伤程度。地震损伤指数能够较好地反映结构在地震作用下的损伤破坏特征, 也间接反映了结构抗震性态水平。因此, 建立结构地震损伤指数与破坏程度之间的对应关系, 就可采用损伤指数来描述结构的抗震性态水平, 对于研究结构的地震损伤性能具有积极意义。

式(3)地震损伤模型是以超过构件屈服点的变形和耗能来定义其损伤指数的, 因此, 可以采用上述地震损伤模型分别计算出型钢再生混凝土柱在屈服点、峰值点及破坏点所对应的不同抗震性态水平下的损伤指数取值, 所对应的损伤指数平均计算值分别为 0.193、0.512 及 0.986。另外, 建议型钢再生混凝土柱基本完好时的损伤指标范围为 0~0.1, 倒塌时的损伤指数大于 1.0。表 5 为型钢再生混凝土柱不同性态水平下的损伤指数取值。

坏的短柱, 即长柱延性较好, 因此对型钢再生混凝土短柱需采取相应的措施以保证其抗震性能。

为了便于耗能因子  $\beta$  计算, 本文利用 SPSS 统计分析软件对表 4 中 17 个型钢再生混凝土柱的耗能因子  $\beta$  值进行了多变量线性回归分析, 主要考虑再生骨料取代率、轴压比、剪跨比及体积配筋率四个试验设计参数, 型钢再生混凝土柱耗能因子  $\beta$  回归计算表达式为:

$$\beta = 0.029r + 0.353n - 0.012\lambda - 5.81\rho_{sv} \quad (9)$$

采用式(3)和式(9)可计算型钢再生混凝土柱破坏状态时的地震损伤指标  $D^c$ , 见表 4。损伤指数  $D^c$



表5 不同性态水平下型钢再生混凝土柱损伤指数取值

Tab. 5 Damage indexes of SRRC columns under different seismic performance levels

性态水平	破坏程度	修复状态	侧移角限值	损伤指数
正常使用	基本完好	无需修复	1/600	0~0.1
暂时使用	轻微破坏	较易修复	1/150	0.1~0.2
修复后使用	中等破坏	可以修复	1/75	0.2~0.5
生命安全	严重破坏	不可修复	1/50	0.5~0.9
防止倒塌	倒塌	无法修复	1/35	$\geq 1.0$

## 5 结论

本文在型钢再生混凝土柱低周反复荷载试验研究的基础上,对该柱地震损伤性能进行了研究,主要得到以下结论:

(1) 可将型钢再生混凝土柱抗震性态水平划分为五个评价等级,即正常使用、暂时使用、修复后可使用、生命安全和防止倒塌;

(2) 以层间位移角作为抗震性态水平控制指标,采用数理统计方法给出了型钢再生混凝土柱不同抗震性态水平下的量化指标分别为 1/600, 1/150, 1/75, 1/50 和 1/35;

(3) 在修正的 Park-Ang 损伤模型的基础上,确定了型钢再生混凝土柱单调荷载下极限位移的计算方法;提出了耗能因子  $\beta$  的回归计算公式,建立了该柱基于变形和累积耗能的双参数地震损伤模型;

(4) 结果表明,型钢再生混凝土柱处于破坏状态时的损伤指标平均值为 0.986,接近 1.0,离散性较小,故采用基于变形和累积耗能的损伤模型来评价该柱地震损伤性能是较为合理的。

(5) 利用上述地震损伤模型,给出了适合于型钢再生混凝土柱不同性态水平下的地震损伤指数取值。

### 参考文献:

- [1] 薛建阳, 马辉, 陈宗平, 等. 型钢再生混凝土柱保护层厚度力学分析[J]. 工程力学, 2013, 30(5):202-206 (XUE Jianyang, MA Hui, CHEN Zongping, et al. Mechanical analysis on the cover thickness of steel reinforced recycled concrete column [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(5):202-206 (in Chinese))
- [2] 薛建阳, 马辉, 刘义. 反复荷载下型钢再生混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(1):36-46 (XUE Jianyang, MA Hui, LIU Yi. Experimental study on seismic performance of steel reinforced recycled concrete columns under low cyclic reversed loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(1):36-46 (in Chinese))
- [3] Hui Ma, Jianyang Xue, Yunhe Liu, et al. Cyclic loading tests and shear strength of steel reinforced recycled concrete short columns[J]. Engineering Structures, 2015, 92(6):55-68.
- [4] Deierlein G G, Krawinkler H, Cornell C A. A framework for performance-based earthquake engineering [R]. New Zealand: New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2003.
- [5] 肖建庄, 李宏. 再生混凝土单轴受压疲劳性能[J]. 土木工程学报, 2013, 46(2):62-69 (XIAO Jianzhuang, LI Hong. Investigation on the fatigue behavior of recycled aggregate concrete under uniaxial compression[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(2):62-69 (in Chinese))
- [6] Thomas C, Setiána J, Polanco J A, et al. Fatigue limit of recycled aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2014, 52(2):146-154.
- [7] 吕静, 刘文峰, 王晶. 钢筋混凝土框架抗震性能目标的量化研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2011, 33(5):80-86 (LV Jing, LIU Wenfeng, WANG Jing. Quantization research on seismic performance target of reinforced concrete frames[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2011, 33(5):80-86 (in Chinese))
- [8] 王秋维, 史庆轩, 杨坤. 型钢混凝土结构抗震性态水平和容许变形值的研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2009, 41(1):82-87 (WANG Qiuwei, SHI Qingxuan, YANG Kun. Study on seismic performance levels and tolerant deformation values about SRC structures [J]. Journal of Xi'an University of Architecture

- &Technology (Natural Science Edition), 2009, 41(1):82–87 (in Chinese))
- [9] 陈宗平, 徐金俊, 薛建阳, 等. 基于变形和能量双重准则的型钢混凝土异形柱地震损伤行为研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(8):29–37 (CHEN Zongping, XU Jinjun, XUE Jianyang, et al. Deformation and energy-based seismic damage behavior of SRC specially shaped columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(8):29–37 (in Chinese))
- [10] 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 (LIU Yang, GUO Zixiong, HUANG Qunxian. Experimental study of damage model for SRC columns [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(9):203–207 (in Chinese))
- [11] Park Y J, Ang H S. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete [J]. Journal of Structure Engineering, 1985, 111(4):722–739.
- [12] 王东升, 冯启民, 王国新. 考虑低周疲劳寿命的改进 Park-Ang 地震损伤模型[J]. 土木工程学报, 2004, 37(11):41–49 (WANG Dongsheng, FENG Qimin, WANG Guoxin. A modified Park-Ang seismic damage model considering low-cycle fatigue life[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(11):41–49 (in Chinese))
- [13] FIB Bulletin No. 25. Displacement-based seismic design of reinforced concrete buildings [R]. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2003.
- [14] Sheikh S, Uzumeri S M. Analytical model for concrete confinement in tied columns[J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1982, 108(12):2703–2722.

## Study of Seismic Damage Model of Steel Reinforced Recycled Concrete Column Based on Deformation and Accumulated Energy Dissipation

MA Hui<sup>1</sup>, GUO Ting-ting<sup>1</sup>, XUE Jian-yang<sup>2</sup>, LIU Yun-he<sup>1</sup>, DONG Jing<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Shaanxi 710048, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Shaanxi 710055, China)

**Abstract:** In order to study the seismic damage performance of steel reinforced recycled concrete (SRRC) column, according to experimental results of 17 specimens subjected to low cyclic loading, five state levels were proposed to evaluate the performance levels of SRRC columns, including regular service state, temporary use state, repair after use, life safety and prevent collapse. Taking the layer displacement angle as column seismic performance control index, the experimental data were analyzed by mathematical statistics, and the quantitative indexes of SRRC column under different performance levels were determined. Based on the mechanical characteristics of SRRC column, the modified Park-Ang damage model is improved again, and the calculation method of ultimate deformation is determined under the monotonic loading. Using multivariate regression method, the calculated energy dissipation factor was obtained; the influence of design parameters on the energy dissipation capacity of SRRC column was analyzed. Finally, the seismic damage model of SRRC column was establishment based on the deformation and accumulated energy dissipation. Results show that the calculated average value of SRRC column damage index in damage state is 0.986, approaching to 1, which means small discrete. So it is feasible to evaluate seismic damage of SRRC column by using this damage model. Based on above results, the corresponding relation between different state levels of SRRC column and damage index was established and corresponding quantitative indexes were determined. Above results may provide reference for seismic performance design and seismic damage evaluation of SRRC column.

**Keywords:** steel reinforced recycled concrete column; seismic performance; performance level; seismic damage model; damage index