

文章编号: 1000-4750(2013)Suppl-0154-05

高强钢筋高强混凝土柱损伤模型试验研究

陈 鑫, 阎 石, 李 兵, 赵乃志

(沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁, 沈阳 110168)

摘 要: 该文主要研究了轴压比系数和体积配箍率等因素对配有高强钢筋高强混凝土柱滞回特性的影响和配有高强钢筋高强混凝土柱在不同抗震性能水平条件下的变形指标。通过试验结果分析了配有高强钢筋高强混凝土柱试件的破坏形态、变形能力、滞回特性等抗震性能指标。基于配有高强钢筋高强混凝土柱试件的低周反复加载试验结果, 该文采用修正 Park-Ang 模型对 12 个配有高强钢筋高强混凝土柱试件进行了不同位移角幅值下的损伤指数计算对比分析。基于不同性能水平下的变形和相关参数试验结果, 提出了以裂缝宽度和纵向钢筋应力水平、残余变形、极限转角分别作为正常使用、可修和避免倒塌等性能水平的评定参数, 并建议了相应性能水平的限值。与试验结果的对比显示, 该模型可以合理的反映不同参数高强混凝土柱的损伤发展过程, 可为高强混凝土结构基于性能的震损评估提供参考。

关键词: HSC 柱; 损伤指数; 修正 Park-Ang 模型; 低周往复加载; 试验研究

中图分类号: TU352.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.05.S029

EXPERIMENTAL STUDY ON DAMAGE MODEL FOR HSC COLUMNS

CHEN Xin, YAN Shi, LI Bing, ZHAO Nai-zhi

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China)

Abstract: A new damage model for the high-strength concrete column reinforced with high-strength stirrup is presented. The effects of axial compression ratio and stirrup ratio on hysteretic characteristics of the high strength concrete columns reinforced with high strength reinforcement(HSC) and the seismic performance parameters for the performance based seismic design of HSC columns were investigated. The failure mechanism, ductility, and hysteretic behavior were analyzed based on the experimental data. The damage index of 12 HSC columns under different story drifts was calculated using the modified Park-Ang model. According to the damage characteristics and measurement results, a series of performance parameters and the corresponding limit value that can be used to evaluate the performance level of HSC columns under earthquake was proposed. It is indicated that the crack width and stress level of a longitudinal bar, the residual drift and ultimate drift index can be adopted as the key parameters to appraise the seismic performance of functional, repairable and collapse avoidable capacities, respectively. The comparison between the calculated damage indices using the proposed model and test results shows a good agreement. This can be referenced for the performance based seismic assessment of HSC columns.

Key words: HSC columns; damage index; modified Park-Ang model; low cyclic loading; experimental study

抗震试验和震害研究表明, 结构或构件的损伤将随着荷载的循环而不断积累, 从而导致结构或构件发生破坏。地震工程界为此提出了许多方法对结构的震后损伤进行定量评估, 其中计算结构损伤指

收稿日期: 2012-05-31; 修改日期: 2013-02-28

基金项目: 住建部科学技术计划项目(2011-K2-5); 辽宁省(高校)重点实验室开放基金项目(JG-200912)

通讯作者: 陈 鑫(1974—), 男, 辽宁人, 讲师, 博士, 主要从事混凝土结构抗震研究(E-mail: cexchen@sjzu.edu.cn).

作者简介: 阎 石(1962—), 男, 辽宁人, 教授, 博士, 博导, 主要从事结构抗震理论与应用研究(E-mail: syan1962@163.com);

李 兵(1974—), 男, 辽宁人, 副教授, 博士, 主要从事结构工程抗震研究(E-mail: cebli@sjzu.edu.cn);

赵乃志(1973—), 男, 辽宁人, 副教授, 博士生, 主要从事结构工程振动控制研究(E-mail: cenzhao@sjzu.edu.cn).

数就是其中一个重要方向。

自 20 世纪 70 年代以来,地震工程界提出了很多损伤指数计算模型对结构的地震破坏进行了广泛研究。在诸多损伤指数模型中,也各自存在着优点及局限性。本文对应用广泛的 Park-Ang 模型及其修正模型进行了简要的评述和比较。

Park 等提出了双参数损伤模型,此模型可同时考虑构件的最大变形与积累滞变耗能的影响,物理意义明确,因此得到工程界的广泛认可。但该模型仍存在一些缺陷,一些学者在此基础上对 Park-Ang 模型进行了修正。本文采用修正的 Park-Ang 模型对已完成的高强钢筋高强混凝土柱试件进行不同位移角幅值下的损伤指数对比分析。因配有试件的材料强度都很高,直接采用修正 Park-Ang 模型来计算其损伤指数与实际情况不是十分理想,计算结果明显偏大。故决定对计算公式进行进一步修正,以适应高强混凝土结构的损伤分析。

1 损伤指数模型

1.1 Park-Ang 模型

Park 和 Ang 提出了能够同时考虑构件的最大变形和累积滞变耗能两个方面影响的损伤指数模型,其损伤指数计算公式如下^[1]:

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

式中: E_h 为构件实际积累滞变耗能; F_y 为构件屈服剪力; δ_m 为结构或构件最大变形; δ_f 为在单调加载下构件的极限变形。由于积累损伤 δ_{ic} 往往比单调加载下试件的极限变形 δ_f 要小,故在下面的损伤指数计算中,取 $\delta_f = 1.1\delta_{ic}$ 。 β 为构件的耗能因子,按下式计算:

$$\beta = (-0.447 + 0.073\lambda + 0.24n_0 + 0.314\rho_t) \times 0.7^{P_{\omega}} \quad (2)$$

式中: λ 为构件剪跨比(当 $\lambda < 1.7$ 时,取 1.7); n_0 为构件轴压比(当 $n_0 < 0.2$ 时,取 0.2); ρ_t 为构件纵筋配筋率(当 $\rho_t < 0.75\%$ 时,取 0.75%); ρ_{ω} 为构件体积配箍率。由试验结果可知, β 取值一般在 0~0.85。

因该模型的物理意义明确,且经过地震记录和试验的校正,故得到地震工程界广泛认同。然而该模型也存在以下缺点:

- 1) 在弹性阶段,当 $E_h = 0$, D 应为 0,但据式(1), $D > 0$;
- 2) 在单向加载时,当构件达到最大变形时, D 应为 1,表示此时体系处于破坏的极限状态,但据式(1), $D > 1$ 。

1.2 修正 Park-Ang 模型

针对 Park-Ang 模型的上述缺陷,一些学者提出了修正形式,其中 Kunnath 等提出的修正 Park-Ang 模型^[2]得到广泛共识:

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

该模型纠正了原模型损伤指数在取值范围上的不合理,而且在原模型双重破坏准则的基础上更进一步,用超屈服点变形和滞回耗能双参数来定义破坏指数。

2 试验概况

2.1 试件概况

本文共完成了 12 个配有高强钢筋高强混凝土柱(6 个方形截面,6 个圆形截面)在低周往复荷载作用下的试验研究^[3-6]。试验的量测及加载设备见图 1,试件主要参数如表 1 所示。

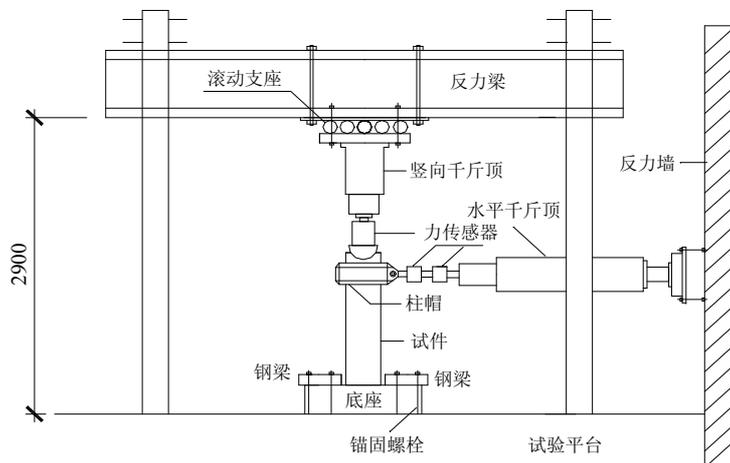


图 1 加载装置图

Fig.1 Test setup

表 1 试件主要参数
Table 1 Test parameters of specimens

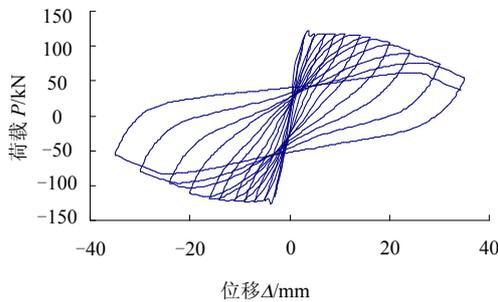
试件编号	混凝土强度等级	箍筋		纵向钢筋			轴压比	剪跨比
		直径/mm	间距/mm	箍筋屈服强度/MPa	直径/mm	配筋率/(%)		
RECT1	C90	7.1	50	1275	10.7	2.38	0.380	3.75
RECT2	C90	7.1	100	1275	12	2.26	0.380	3.75
RECT3	C90	6.5	50	235	12	2.26	0.380	3.75
RECT4	C90	7.1	50	1275	12	2.26	0.380	3.75
RECT5	C60	7.1	50	1275	12	2.26	0.538	3.75
RECT6	C90	7.1	50	1275	12	2.26	0.221	3.75
CIRC1	C90	7.1	50	1275	10.7	1.95	0.342	3.49
CIRC2	C90	7.1	70	1275	10.7	1.95	0.342	3.49
CIRC3	C90	7.1	50	1275	12	2.18	0.342	3.49
CIRC4	C90	7.1	50	1275	12	2.18	0.479	3.49
CIRC5	C90	7.1	50	1275	12	2.18	0.295	3.02
CIRC6	C60	8	50	235	12	2.18	0.295	3.02

根据设计，柱顶端选用 2000kN 油压千斤顶施加竖向力。竖向油压千斤顶安装在滑板上，在试验过程中随柱顶端移动，轴压荷载通过压力传感器和球铰作用于柱上。

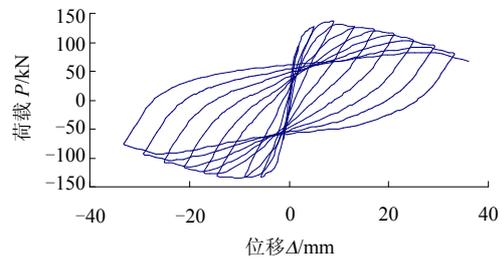
柱顶采用 200kN 水平双向油压千斤顶，千斤顶前连接拉压传感器，并通过连杆与柱头用螺栓相连，千斤顶固定在反力墙上。

2.2 主要试验结果

方柱和圆柱试件的典型滞回曲线如图 2 所示。配置适当高强钢筋高强混凝土能够具有较好的变形能力和滞回耗能能力。相同位移幅值下，多次循环引起的强度衰减很小，说明其损伤程度随滞回耗能的累积速度较慢。试件骨架曲线如图 3 所示，骨架曲线特征点见表 2 所示，表中 P_c 、 P_y 、 P_u 分别为试件开裂荷载、屈服荷载和极限荷载， Δ_c 、 Δ_y 、 Δ_u 分别为试件开裂位移、屈服位移和极限位移， μ 为位移延性系数。由图 3 可见，骨架曲线下降段平缓，强度衰减缓慢，说明其损伤程度随变形增加的累积速度较慢。



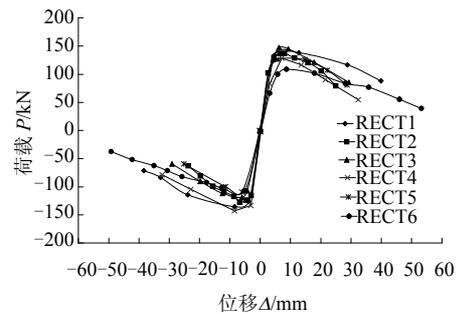
(a) 试件 RECT1 的滞回曲线



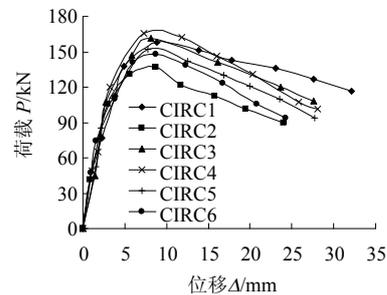
(b) 试件 CIRC1 的滞回曲线

图 2 部分试件滞回曲线

Fig.2 Hysteretic loops of part specimen



(a) 方柱骨架曲线



(b) 圆柱骨架曲线

图 3 骨架曲线

Fig.3 Skeleton curve

表 2 P-Δ骨架曲线特征点
Table 2 Characteristic points in skeleton curves

编号	开裂荷载 P_c/kN	开裂位移 Δ_c/mm	屈服荷载 P_y/kN	屈服位移 Δ_y/mm	最大荷载 P_m/kN	最大荷载位移 Δ_m/mm	极限位移荷载 P_u/kN	极限位移 Δ_u/mm	位移延性系数 $\mu=\Delta_u/\Delta_y$
RECT1	61	2.0	120	4.3	139	9.0	106	31.52	7.33
RECT2	54	1.3	116	3.3	137	6.9	101	21.75	6.59
RECT3	51	1.8	113	4.7	147	6.7	102	25.3	5.39
RECT4	66	1.4	128	3.2	152	8.4	87	21.25	6.64
RECT5	52	1.2	109	3.2	128	13.2	103	20.51	6.41
RECT6	51	2.1	109	5.4	112	8.5	76	38.34	7.10
CIRC1	60	2.6	129.1	4.1	149.2	8.7	121	30.93	7.543
CIRC2	54	1.7	125.4	3.7	137.6	6.6	90	24.25	6.553
CIRC3	63	2.0	135.8	4.0	154.9	9.1	108	28.54	7.134
CIRC4	55	1.8	147.2	3.5	165.1	7.8	124	22.68	6.479
CIRC5	58	1.7	145.9	3.1	158.6	8.8	116	21.95	7.082
CIRC6	68	2.2	121.9	3.2	139.8	8.1	111	18.71	5.847

3 损伤指数分析

3.1 不同性态水平下柱损伤指数的建议取值

要将损伤指数应用于高强混凝土结构的性能设计，必须先确定高强混凝土结构不同性能水平下的损伤指数取值范围。参考国内外抗震性能水平的划分方法^[7-10]，将高强混凝土结构划分为 4 个性能水平，分别为：运行、基本运行、可修和避免倒塌，结合试验结果和各性态水平的宏观描述，建议 4 个性能水平对应的层间位移角限值分别为 1/250、1/150、1/50 和 1/35。本文中所述高强钢筋高强混凝土柱在各性态水平下对应的层间位移角限值和损伤指数取值范围如表 3 所示。

表 3 柱抗震性态水平与损伤指数取值范围

Table 3 Seismic performance levels of columns and damage index ranges

性态水平	界限层间位移角	损伤指数取值范围
运行	1/250	0~0.20
基本运行	1/150	0.20~0.40
可修	1/50	0.40~0.75
避免倒塌	1/35	0.75~1.0

注：损伤指数超过 1.0 则说明试件已损坏。

3.2 柱损伤指数的计算

采用修正 Park-Ang 模型对 12 个高强钢筋高强混凝土柱在 1/50 和 1/35 位移角下的损伤指数进行计算，计算结果如表 4 所示。

由表 4 可得如下结论：

1) 1/50 位移角为规范规定的混凝土结构的弹性位移角限值，试件在 1/50 位移角下的损伤指数大部分都在 0.4~0.75，说明试验试件的抗震形态水平与损伤指数取值范围吻合较好。

2) 试件在 1/35 位移角下的损伤指数均在 1.0 左

右，RECT5 的损伤指数大于 1.0，说明轴压力系数越大，相同加载路径下试件损伤程度越高。

3) 保持试件的箍筋种类、含箍特征值、箍筋型式、箍筋间距、混凝土强度等基本相同，只是轴压比大小不同，损伤指数随轴压比的增大而增加。

4) 体积配箍率增加，试件耗能能力增加。从图 5 可以看出，试件的滞回曲线骨架线的下降段较为平缓。由表 5 可知，试件的损伤指数随着体积配箍率的增加而降低，说明在其他条件相同的情况下，增加体积配箍率可以提高构件的延性，进而降低损伤程度。

5) 箍筋种类的影响，从轴压比、箍筋间距、型式等基本相同的方柱 RECT4 和 RECT3 的滞回曲线骨架线(见图 3)可以看出，尽管试件 RECT4 的体积配箍率大于试件 RECT3，但其滞回曲线骨架线的下降段仍比 RECT3 陡。由表 4 可知，试件 RECT3 在 1/50 和 1/35 位移角下的损伤指数分别为 0.65 和

表 4 修正 Park-Ang 模型计算柱损伤指数结果

Table 4 Calculating results of columns' damage index using the modified Park-Ang model

编号	$\rho_f(\%)$	λ	$\rho_w(\%)$	ν_0	β	1/50	1/35
						D	D
RECT1	2.38	3.75	2.00	0.380	0.254	0.74	1.12
RECT2	2.26	3.75	1.00	0.380	0.254	0.82	1.20
RECT3	2.26	3.75	1.70	0.380	0.253	0.65	0.99
RECT4	2.26	3.75	2.00	0.380	0.253	0.54	0.86
RECT5	2.26	3.75	2.00	0.538	0.2903	0.97	1.43
RECT6	2.26	3.75	2.00	0.221	0.214	0.37	0.58
CIRC1	1.95	3.49	1.58	0.342	0.222	0.48	0.76
CIRC2	1.95	3.49	1.13	0.342	0.222	0.62	0.95
CIRC3	2.18	3.49	1.58	0.342	0.224	0.50	0.81
CIRC4	2.18	3.49	1.58	0.479	0.257	0.65	1.01
CIRC5	2.18	3.02	1.58	0.295	0.179	0.64	0.99
CIRC6	2.18	3.02	2.01	0.295	0.179	0.77	1.20

0.99, 而 RECT4 在 1/50 和 1/35 位移角下的损伤指数分别为 0.54 和 0.86。这主要是由于 RECT4 的箍筋 PC 钢棒是变形钢筋, 它与混凝土的粘结锚固好, 更好地约束了柱核心部分混凝土的变形, 从而提高了构件的延性; 而试件 RECT3 的箍筋是热轧 HPB235 级钢筋, 是光圆钢筋, 与混凝土的粘结较差。

4 结 论

1) 修正 Park-Ang 模型在计算配有高强钢筋高强混凝土构件的损伤指数时能够很好的反映构件的损伤程度。

2) 试件的损伤指数与抗震性态水平吻合较好, 说明其在不同性态水平下损伤指数的建议取值范围能比较合理的反映试件的损伤发展状态。

3) 轴压比是影响高强混凝土压弯构件延性的重要因素之一。当其他条件相同时, 轴压比越高, 构件的延性越小, 损伤指数越大, 损坏程度越高, 为满足抗震要求, 需对轴压比进行严格限制。

4) 箍筋的种类, 形式及配箍率对构件的损坏程度有重要的影响。提高配箍率, 采用高强钢筋作箍筋比热轧钢筋对核心混凝土的约束作用好, 试件损伤指数小, 损坏程度低。

由于试件数量的限制和试验参数水平的不足, 文中提出的损伤指数的计算方法、取值范围与抗震形态水平对应关系等方面仍有待于进一步的验证和改进。

参考文献:

- [1] Park Y J, Ang H S. Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1985, 111(4): 722—739.
- [2] Kunnath S K, Reinhorn A M, Park YJ. Analytical Modeling of Inelastic Seismic Response of RC Structures [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1990, 116(4): 996—1017.
- [3] 阎石, 肖潇, 张曰果, 等. 高强钢筋约束混凝土矩形截面柱的抗震性能试验研究[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2006, 22(1): 7—10.
Yan Shi, Xiao Xiao, Zhang Yueguo, et al. Seismic performances of square HSC columns confined with high-strength PC rebar [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2006, 22(1): 8—10. (in Chinese)
- [4] 阎石, 张曰果, 王旭东. 圆形截面高强混凝土柱抗震性能试验研究[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2006, 22(4): 538—542.
Yan Shi, Zhang Yueguo, Wang Xudong. Seismic performance test study on circular HSC columns confined with high-strength rebar [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2006, 22(4): 538—542. (in Chinese)
- [5] 肖潇. 配有高强钢筋的高强混凝土柱的抗震性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2004.
Xiao Xiao. Seismic behaviors of high strength concrete columns reinforced with high strength reinforcement [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2004. (in Chinese)
- [6] 张曰果. 高强钢筋高强混凝土圆柱抗震性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2005.
Zhang Yueguo. Seismic behaviors of high strength concrete circular columns reinforced with high strength reinforcement [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2005. (in Chinese)
- [7] 郭子雄, 刘阳, 杨勇. 结构震害指数研究评述[J]. *地震工程与工程振动*, 2004, 24(5): 56—61.
Guo Zixiong, Liu Yang, Yang Yong. State-of-the-art of seismic damage index of structures [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2004, 24(5): 56—61. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 郭子雄, 刘阳, 杨勇. 框架柱试验结果的震害指数计算模型比较[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2005, 26(2): 145—148.
Guo Zixiong, Liu Yang, Yang Yong. A comparative study on seismic damage index based on test results [J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 2005, 26(2): 145—148. (in Chinese)
- [10] 郭子雄, 林煌, 刘阳. 不同配箍形式型钢混凝土柱抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2010, 31(4): 110—115.
Guo Zixiong, Lin Huang, Liu Yang. Experimental study on seismic behavior of SRC columns with different stirrup configuration [J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(4): 110—115. (in Chinese)