

文章编号: 1000-5013(2011)03-0322-04

# 高强混凝土柱变形-耗能损伤模型的参数确定

林煌斌<sup>1,2</sup>, 王全凤<sup>1</sup>, 刘良林<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021;

2. 集美大学 工程技术学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 基于变形-耗能双参数损伤模型, 对 HRB 400 高强度钢筋混凝土柱的试验数据和现象进行损伤评价, 确定高强度混凝土柱损伤模型参数. 结合试验和震害中观察的破坏现象, 计算不同性能 HRB 400 高强度混凝土柱所对应的损伤指数, 并进一步结合构件破损状态及其对应的损伤指数, 确立基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏等 4 种不同破坏等级的损伤指数范围.

**关键词:** 损伤模型; 变形-耗能; 高强钢筋混凝土; 损伤评价

**中图分类号:** TU 392.3

**文献标志码:** A

混凝土结构材料是损伤累积特性颇为突出的工程材料, 在不同工况下, 其损伤发育和累积问题是结构失效的本质问题. 在地震作用下, 结构损伤与结构最大变形和结构低周疲劳效应所造成的累积耗能损伤有关, 地震损伤对建筑物后续服务期的承载能力和剩余寿命有重大影响. 结构地震主要有首次超越破坏和累积损伤破坏 2 种主要地震破坏形式, 应选择反映结构不同破坏机理的损伤参数来描述结构或构件的损伤. 结构在动力荷载作用下发生累积损伤, 而描述损伤需要建立合理的损伤模型. 结构损伤评价模型可分为双参数模型、疲劳损伤模型和基于动力特征损伤模型等 3 种主要类型. 然而, 目前的各类损伤模型仍有不足之处, 尚不能满足实际应用的要求. 本文通过 HRB 400 高强钢筋混凝土(RC)柱抗震试验<sup>[1-2]</sup>, 探讨损伤变形-耗能损伤模型中的参数确定.

## 1 变形-耗能损伤模型

美国学者 Park 和 Ang 根据美国和日本等国家的钢筋混凝土 261 组试验结果, 在变形分析基础上考虑累积滞回耗能对构件地震损伤的影响, 提出以最大变形与累积滞回耗能组合双参数地震损伤模型——Park & Ang 模型<sup>[3-7]</sup>. 即

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

$$D = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \beta \int \left( \frac{\delta}{\delta_u} \right) \frac{dE}{E_c(\delta)}. \quad (2)$$

式(1), (2)中:  $\delta_u$  为构件或结构在单调荷载作用下的破坏极限变形;  $\delta_m$  为地震作用下实际的最大弹塑性变形;  $Q_y$  为屈服剪力(如果  $Q_u$  小于  $Q_y$  时,  $Q_y = Q_u$ );  $dE$  为地震作用下实际的累积滞回耗能;  $\beta$  为循环荷载影响系数,  $\alpha, \beta$  为非负参数;  $D$  为损伤指数.

结构损伤的循环荷载影响是由循环荷载影响系数  $\beta$  来体现的. 吸收的滞回能(不含势能)是综合在循环荷载作用下梁和柱在破坏点时的 261 组数据进行计算, 只采用能准确观察到突然破坏点或通过骨架曲线能定义出渐变破坏点的数据. 使用损伤指数  $D$  时, 对每次试验中的  $P-\Delta$  曲线可跟踪到破坏点, 在破坏点( $D=1$ )时, 相应  $\beta$  值可计算出. 计算  $\beta$  值后, 可以观察  $\beta$  值和体积配箍率  $\rho_w$  呈负相关, 而和纵筋

收稿日期: 2010-11-03

通信作者: 林煌斌(1981-), 男, 讲师, 主要从事结构工程的研究. E-mail: linhuangbin@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50578066); 福建省教育厅 B 类科研计划项目(JB10099); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(200803850001)

的配筋率  $\rho_l$ 、轴压比  $n_0$ 、构件的剪跨比  $l/d$  相关. 对数据回归后, 有

$$\beta = (-0.447 + 0.73 \frac{1}{d} + 0.24n_0 + 0.314\rho_l) \times 0.7^{\rho_w},$$

(3)

$$\beta = (-0.165 + 0.0315 \frac{1}{d} + 0.131\rho_l) \times 0.84^{\rho_w}.$$

(4)

式(3),(4)中: $l/d$  为构件的剪跨比, 当  $l/d < 1.7$  时, 取值为 1.7;  $n_0$  为构件轴压比, 当  $n_0 < 0.2$  时, 取值为 0.2;  $\rho_l$  为纵筋配筋率, 当  $\rho_l < 0.75\%$  时, 取值为 0.75%;  $\rho_w$  为体积配箍率, 当  $\rho_w > 2\%$  时, 取值为 2%.

2 高强 RC 柱损伤模型参数确定

2.1 Park & Ang 损伤模型使用范围

Park & Ang 模型的使用范围<sup>[8]</sup>:  $1.0 < l/d < 6.6, 0.2 < \rho_w < 2.0, 0 < n_0 < 0.25; 15.84 \text{ GPa} < f'_c < 41.34 \text{ GPa}, 0.04 < \rho_l < 0.45$ . 其中:  $f'_c$  为美国标准立方体抗压强度值, 使用圆柱体(直径 150 mm, 高 300 mm)标准构件测定的抗压强度划分强度等级,  $f'_c = (0.79 \sim 0.81)f_{cn}$ ,  $f_{cn}$  中国的标准立方体抗压强度值. Beolchini 等<sup>[9-10]</sup>认为  $\beta$  值与  $\rho_w, \rho_l$ , 剪跨比  $\lambda$ , 轴压比  $n_0$  有关, 即有

$$\beta = (-0.28 + 0.06\lambda + 0.7n_0 + 0.19\rho_l) \times 0.66^{\rho_w}.$$

(5)

对应的中国混凝土强度等级为 C20~C55, 工程中应用大多强度高于 C55 的高强混凝土, 已超过 Park & Ang 模型使用范围. 体积配箍率  $\rho_w$  与  $\beta$  在工程中的关系为伴随  $\rho_w$  增加, 耗能和延性能力增强, 对应于双参数模型中应为  $\beta$  值增加. 因此, 有必要对变形-耗能模型中的参数表达式进行确定和试验研究.

表 1 试件材料参数表

Tab. 1 Parameters of specimen material

试件	等级	$f_{cn}/\text{MPa}$	箍筋	纵筋
KZ1	C60	67.1	$\Phi 8@150$	8 $\Phi 16$
KZ2	C60	67.1	$\Phi 8@150$	4 $\Phi 25$
KZ3	C70	75.9	$\Phi 8@150$	8 $\Phi 16$
KZ4	C80	70.7	$\Phi 8@150$	8 $\Phi 16$

2.2 高强柱试验抗震试验

HRB 400 高强度混凝土柱抗震试验共制作 4 组柱, 其参数如表 1 所示. 构件的几何尺寸和加载机制<sup>[1-2]</sup>, 如图 1, 2 所示.

图 3 为试验试件的最终破坏情况. HRB 400 高强钢筋混凝土柱 KZ-1, KZ-2, KZ-3, KZ-4 受反复荷载作用的  $P-\Delta$  曲线参见文献[1].

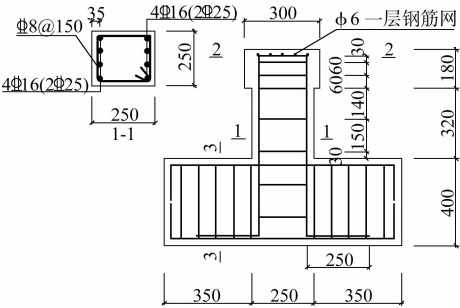


图 1 试件尺寸(单位: mm)

Fig. 1 Size of test specimen(unit: mm)



图 2 加载装置

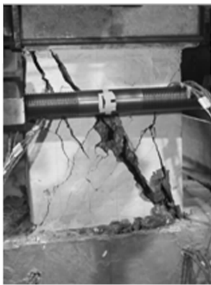
Fig. 2 Loading equipment



(a) KZ-1



(b) KZ-2



(c) KZ-3



(d) KZ-4

图 3 试件最终破坏图

Fig. 3 Final failure of test specimen

2.3 损伤模型参数确定

2.3.1 计算  $\delta_u$  经验公式 在 Park & Ang 模型中,当不考虑脆性剪切破坏时,对细长梁和柱,极限变形可用材料应力-应变关系进行评估.构件在循环荷载作用下,发生剪切破坏,在单调荷载作用下发生弯曲破坏.当考虑重复循环荷载时,所有破坏模式在评估  $\delta_u$  时都需要考虑.

到目前为止,还没有出现确定混凝土构件的极限变形的可靠方法.特别是当剪切变形和粘结滑移可能占大部分贡献时,甚至高精度复杂性的有限元分析都不可能跟踪到在极限变形状态时的变形性能.这是因为在该状态下,销栓作用、剪切裂缝、粘结退化和三向应力等因素具有不确定性.因此,现有单调加载试验数据的简单经验公式被发展来确定  $\delta_u$  数值.极限位移可预测,其中一种确定极限变形方法为

$$\delta_u = \mu \delta_y. \tag{6}$$

式(6)中: $\mu$  为延性系数; $\mu$  和  $\delta_y$  是独立的.

混凝土构件的屈服状态可以定义在张拉时开始屈服时,或当混凝土里的极限纤维压缩应变超过压碎应变值的 1.5 倍时.屈服变形可以由以下几项构成,钢筋锚固的粘结滑移变形  $\delta_i$ ,弹性剪力变形  $\delta_e$ ,非弹性剪切变形  $\delta_s$ ,即  $\delta_y = \delta_i + \delta_b + \delta_s + \delta_e$ . $\delta_e$  由传统弹性梁理论计算,其他数值参考 Park & Ang 文献计算方法.延性系数  $\mu$  计算方法:

$$\mu = \left(\frac{\epsilon_p}{\epsilon_0}\right)^{0.218\rho_w-0.215} \exp(0.654\rho_w + 0.28). \tag{7}$$

式(7)中, $\rho_w$  体积配筋率; $\epsilon_p, \epsilon_0$  主应变,开裂应变.

2.3.2 循环荷载影响系数 使用  $D$  时,对每次试验中  $P-\Delta$  曲线都可跟踪到破坏点,在破坏点时  $D=1$ ,相应循环荷载影响系数  $\beta$  值可计算出.试验构件延性系数( $\mu$ )、屈服位移( $\Delta_y$ )和极限位移( $\Delta_l$ )计算结果,如表 2 所示.试验数据根据式(3)计算  $\beta_1$  和式(5)计算  $\beta_2$ ,以及根据高强 RC 构件试验结果进行计算得出的  $\beta_3$ ,如表 2 所示.

通过表 2 的损伤模型参数  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  对比,表明式(3),(5)拟合数据与试验实测  $\beta_3$  的趋势相同.因为构件数量有限,所以未能通过足够数量的试验数据拟合出高强混凝土柱  $\beta(\lambda, n, \rho_l, \rho_w)$  表达式.

表 2 损伤模型参数计算比较  
Tab. 2 Comparison among the calculation parameters of damage model

构件	$\mu$	$\Delta_y$	$\Delta_l$	$n_0$	$\lambda$	$\rho_l$	$\rho_w$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
KZ1	2.52	2.64	6.65	0.20	1.86	2.57	0.269	1.542	0.780	0.104
KZ2	2.53	2.39	6.05	0.20	1.86	3.14	0.269	1.690	0.866	0.144
KZ3	2.43	2.42	6.05	0.23	1.86	2.57	0.269	1.560	0.791	0.101
KZ4	2.52	2.16	5.44	0.26	1.86	2.57	0.269	1.578	0.802	0.153

考虑式(3),(5)中对高强混凝土强度考虑不足,在高强混凝土构件中,混凝土强度等级对构件的延性耗能性能影响相对于低强混凝土表现更为显著,增加考虑高强混凝土等级  $f_c$  的影响参数,则有

$$\beta = (-0.447 + 0.73 \frac{1}{d} + 0.24n_0 + 0.314\rho_l)^\gamma \times 0.7^{\rho_w}. \tag{8}$$

其中: $\gamma$  参数需由构件试验确定.

2.3.3 损伤模型参数 高强度钢筋混凝土柱极限状态时,其损伤指数如表 3 所示.表 3 中: $D_{P-A}, D_{cor}$  分别为 Park 模型损伤指数和修正参数损伤指数.从表 3 可知,采用 Park & Ang 模型损伤指数超过 1.0,组合耗能参数计算值超过正常范围.

Park & Ang 模型采用拟合 261 组数据,以低强度,高延性构件为主的数据进行拟合,拟合曲线更趋近于数据.对于超过混凝土强度范围的试验数据采用 Park 式回代计算,计算的耗能参数会偏大.修正的变形-耗能的损伤模型参数按式(8)计算后代入试验构件分析评价,得到修正损伤指数如表 3 所示.结果表明,损伤指数与构件破坏状态相对吻合,即破坏时损伤指数接近 1.

表 3 构件极限时损伤指数

Tab. 3 Damage index in limit state

构件	$\delta_u/mm$	$Q_y/kN$	$\delta_m/mm$	$\int dE/kN \cdot mm$	$D_{P-A}$	$D_{cor}$
KZ-1	6.65	212	2.64	6 031.0	6.994	0.959
KZ-2	6.05	237	2.39	8 173.0	10.028	0.943
KZ-3	5.88	270	2.42	9 613.0	9.857	0.960
KZ-4	5.44	238	2.16	5 110.0	6.625	0.939

对比试验现象和构件开裂、构件屈服和构件极限状态时的损伤指数分布,给出高强 RC 柱在不同震害等级时的损伤指标,如表 4 所示.

3 结束语

在变形-耗能损伤模型基础上分析 RC 柱的损伤参数,结合试验结果确定 HRB 400 高强钢筋混凝土柱构件地震损伤模型中构件循环荷载影响系数的取值. 结合构件破坏状态及其对应的损伤指数,确立了高强钢筋混凝土柱构件不同的破坏等级所对应的损伤指数范围. 该修正后模型可以应用于 RC 工程结构设计与损伤评价.

参考文献:

[1] 林煌斌,王全凤. HRB 400 高强度混凝土柱抗震性能分析[J]. 建筑结构学报,2008,29(S1):36-41.

[2] 沈章春. 新型高强度钢筋混凝土柱抗震和偏压试验研究[D]. 泉州:华侨大学,2007.

[3] 王全凤,黄庆丰. 损伤结构弹塑性抗震分析及评价[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2009,30(1):6-10.

[4] 王锋,郑玉芳. 基于模态应变能法识别混凝土梁结构损伤的数值及试验研究[J]. 福州大学学报:自然科学版,2007,35(5):713-719.

[5] 吴建营,李杰. 混凝土结构的静力和动力损伤非线性分析[J]. 福州大学学报:自然科学版,2005,33(S1):16-21.

[6] 吕西林,张国军. 高强混凝土框架柱的地震损伤模型[J]. 地震工程与工程振动,2005,25(2):100-104.

[7] 王全凤,刘凤谊,杨勇新,等. HRB 500 级钢筋混凝土筒支梁受弯试验[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2007,28(3):300-303.

[8] PARK Y J,ANG A H S. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete[J]. J Struct Engrg,1985,111(4):722-739.

[9] BEOLCHINI G C,GALEOTA D,GIAMMATTEO M M,et al. Seismic behavior of high strength RC columns[C]// Proc of the 12th WCEE. Auckland:[s. n. ],2000.

[10] REINHORN A M,VALES R E. Damage evaluation in inelastic response of structures; A determinstic approach [R]. Buffalo:State University of New York at Buffalo,1995.

Analysis of Deformation-Hysteretic Energy Dissipation  
Damage Model of High-Strength  
Reinforced Concrete Columns

LIN Huang-bin<sup>1,2</sup>, WANG Quan-feng<sup>1</sup>, LIU Liang-lin<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;  
2. College of Engineering Technology, Jimei University, Xiamen 361021 China )

**Abstract:** Damage evaluation on HRB 400 high-strength reinforcement concrete columns was analyzed based on the deformation-energy dissipation double parameter model. The damage model parameters were found through experimental data. Combining with experimental failure and practical seismic failure, the damage indexes for four failure grades (in good condition, slight failure, moderate failure, and complete collapse) are given. Damage indexes to evaluate the failure model of high-strength reinforcement concrete columns is also presented, which is useful for engineer design and evaluation.

**Keywords:** damage model; deformation-energy dissipation; high-strength reinforcement concrete; damage evaluation