

文章编号 1000-5013(2005)02-0145-04

框架柱试验结果的震害指数计算模型比较

郭子雄 刘 阳 杨 勇

(华侨大学土木工程学院, 福建 泉州 362021)

**摘要** 基于钢筋混凝土框架柱试验研究结果和恢复力模型,对国际上较常用的 3 个震害指数计算模型进行计算.通过对 3 个不同轴压比框架柱试件基于不同震害指数模型计算结果的比较,分析所选用震害指数模型在评估钢筋混凝土构件破坏状态方面存在的优缺点.在此基础上,提出震害指数研究的发展方向和建议.  
**关键词** 震害指数, 框架柱, 试验结果, 累积损伤, 比较研究  
**中图分类号** TU 375.401 **文献标识码** A

震害指数是评价结构或构件遭受地震作用后的破坏状态无量纲指数,是人们在地震后对受损建筑做出处理决策的重要理论依据.迄今为止,地震工程界提出过许多对结构的地震破坏状态进行定量评估的方法,其中一个重要方面就是计算结构的震害指数.自 70 年代以来,地震工程界对结构地震破坏的量化模型开展了广泛的研究,提出了大量的震害指数计算模型.在这些见诸于文献的震害指数计算模型中,由于模型建立背景的不同,因而存在着各自的优点和局限性.本文针对作者开展的钢筋混凝土框架柱试验研究所用试件,对其中较具普遍性的震害指数模型进行了计算比较,以供震害评估选用和震害指数计算模型的研究参考.

1 试验概况

1.1 试件情况及试验方法

试验研究的内容和基于试验成果建立的恢复力模型,参见文[1]. (1) 试件情况.试件的几何尺寸及截面配筋,如图 1 所示.试件实际剪跨比约为 3.0,试验采用的设计轴压比( $N/f_c b h$ )约为 0.3~0.9.试件材料的力学性能,如表 1 所示.表中直径为  $d$ . (2) 加荷装置及加载程序.首先,通过液压千斤顶施加竖向荷载至试件的预定轴压力,保持其恒定.然后,施加水平荷载,水平力采用伺服作动器加载.采用荷载和位移双控制方法,具体过程为,试件屈服以前按照荷载值进行控制,屈服以后按照记录到的试件屈服位移  $y_y$  的倍数(单倍或双倍)控制循环加载,并分别在每级位移下进行 3 次往复循环加载.当试件的承载力下降至最大荷载的 80 % 时,整个试验终止.试件的整个破坏过程表现为,纵向受拉钢筋屈服 压区混凝土压屈剥落

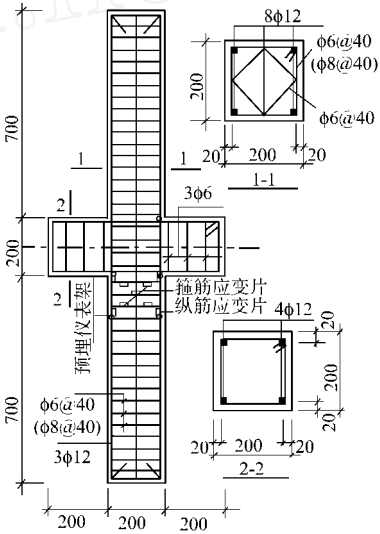


图 1 试件配筋图(mm)

表 1 材料性能

试件	混 凝 土		钢 筋		
	$f_{cu}/\text{MPa}$	$d/\text{mm}$	$f_y/\text{MPa}$	$E_s/\text{GPa}$	$\nu/\mu$
SP401 ~ SP403	41.2	6.5	315	205	1 536
SP404 ~ SP407	40.1	12.0	410	197	2 086

**收稿日期** 2004-10-19  
**作者简介** 郭子雄(1967-),男,副教授,博士,主要从事结构工程,防震减灾等领域的研究. E-mail: guozxcy@hqu.edu.cn  
**基金项目** 国家自然科学基金资助项目(50478120);福建省自然科学基金资助项目(E0410024)

箍筋屈服的发展 核心区混凝土逐步压酥 个别纵向钢筋压屈 箍筋弯钩拉直张开 纵向钢筋压屈. 试件的典型极限破坏状态,如图 2 所示.

1.2 主要特征点试验结果

用于进行震害指数计算的 3 个试件的骨架曲线特征点的试验结果,如表 2 所示. 表中  $n = N / f_c b h$ ,  $n = N / f_c b h$ . 其中  $f_c$  为实测的混凝土轴心抗压强度,  $f_c$  为混凝土轴心抗压强度设计值,  $f_c$  是试件循环加载下承载力下降至 80 %  $P_{max}$  时的变形. 从表 2 试验数据可以发现,随着轴压比的增大,试件的极限变形能力呈现减小趋势. 由于积累损伤的存在,  $f_c$  比试件在单调加载下的极限变形  $f$  小. 在以下损伤指数的计算中,取  $f = 1.1 f_c$ .

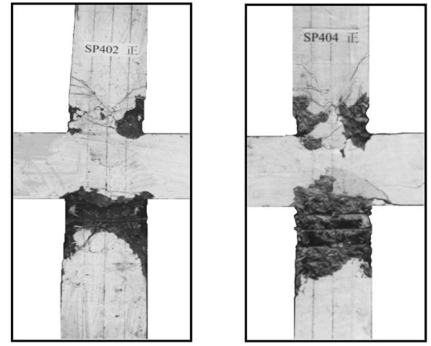


图 2 试件的极限破坏状态

表 2 骨架曲线主要特征点试验结果

试件	$n$	$n$	$P_{cr}/\text{kN}$	$\epsilon_{cr}/\text{mm}$	$P_y/\text{kN}$	$y/\text{mm}$	$P_{max}/\text{kN}$	$\epsilon/\text{mm}$	$P_u/\text{kN}$	$\epsilon_c/\text{mm}$	$\epsilon_c/y$
SP401	0.200	0.311	95	0.91	154	2.5	226	11.6	217	22.3	8.90
SP402	0.374	0.582	122	1.02	200	2.91	223	7.0	190	18.2	6.25
SP404	0.490	0.766	132	1.28	230	2.80	240	6.7	214	18.3	6.53

2 不同震害指数模型及相应的损伤指数

本文用于计算比较的震害指数模型分别选择如下 3 种模型. (1) 基于累积疲劳损伤的 Wang 模型. (2) 基于变形-能量双重准则的 Park 模型. (3) 基于刚度变化的 Roufaiel 模型. 更多的震害指数模型及相关评述可参见文 [2]. 为方便计算,假定构件在屈服前的加载过程是弹性反应. 计算试件震害指数时,采用与试验相同的加载历程,即在每一个  $y$  的整数倍位移下循环 3 次,直至构件破坏. 为减少篇幅,对于每个震害指数模型,本文只列出加载历程中的 2 个较有代表性的状态的损伤指数计算结果. 即 3  $y$  和 5  $y$  时的损伤指数,并分别记做  $D_3$  和  $D_5$ .

2.1 基于累积损伤的 Wang 模型

1987 年, Wang 和 Shah 等人<sup>[3]</sup>根据构件或结构的积累损伤速度,及其与存在的损伤量成正比的假设,得出震害指数计算模型为

$$D = (e^k - 1) / (e^k - 1). \tag{1}$$

在式(1)中,  $k$  为常数,可根据试验确定;  $n$  为循环加载参数. 其定义为

$$n = c \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{f}. \tag{2}$$

在式(2)中,  $c$  为常数,一般根据经验或试验确定;  $f$  是构件在单调加载试验下的极限变形;  $m_i$  是构件在第  $i$  个循环中的最大位移. 文 [3] 根据试验结果,建议对于抗震性能良好的受弯构件,  $c$  和  $k$  可分别取 0.1 和 1.0. 由于模型参数  $c$  的取值主要受试件的受力特征和几何特征影响,对于本文所研究的框架柱试件,参数  $c$  必然比上述受弯构件的取值大. 由于缺乏框架柱  $c$  的取值依据,本文取 3 个不同的  $c$  值 (0.10, 0.13, 0.15). 根据式 (1) 和式 (2) 对 SP1, SP2 和 SP4 等 3 个不同轴压比的框架柱试件的损伤指数进行了计算,通过与试验破坏现象及与其它损伤指数模型计算结果进行比较,以期得出合理的结论. 从表 3 所示计算结果可知,当  $c$  取 0.15 时,计算结果与试验揭示的破坏状态

表 3 Wang 模型的损伤指数计算结果

试件	$c = 0.10$		$c = 0.13$		$c = 0.15$	
	$D_3$	$D_5$	$D_3$	$D_5$	$D_3$	$D_5$
SP401	0.096	0.311	0.128	0.433	0.150	0.524
SP402	0.120	0.458	0.161	0.656	0.190	0.808
SP404	0.114	0.431	0.152	0.615	0.179	0.755

较为接近;而当  $c$  取与受弯构件相同的 0.1 时,损伤指数明显低估了试件的损伤程度. 由此可见,参数  $c$  的取值对计算结果的影响是很大的.

2.2 基于变形-能量准则的震害指数模型

1985 年, Park 和 Ang<sup>[4]</sup>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震害

指数模型. 其震害指数计算公式为

$$D = \frac{m}{f} + \frac{E_h}{F_y \times f} \tag{3}$$

在式(3)中,  $E_h$  为构件实际的累积滞变耗能,  $F_y$  为构件的屈服剪力,  $m$  和  $f$  的意义同前,  $\alpha$  是构件的耗能因子. 即

$$\alpha = (0.073 + 0.24n + 0.314 \rho_s - 0.447) \times 0.7 \tag{4}$$

在式(4)中,  $\lambda$  为构件的剪跨比(当  $\lambda < 1.7$  时,取 1.7),  $n$  是构件的轴压比(当  $n < 0.2$  时,取 0.2),  $\rho_s$  是构件的纵向受力钢筋配筋率(当  $\rho_s < 0.75\%$  时,取 0.75%),  $\rho_v$  是构件的体积配箍率. 根据试验结果,  $\alpha$  值一般在 0~0.85 之间变化. 研究结果同时表明,当  $D$  值在 0.4~0.5 范围时,是可修状态的极限. 针对 Park 和 Ang 模型存在的边界条件不够严谨的缺陷, Kunnath 等人提出了修正的 Park 模型. 即

$$D = \frac{m - \alpha}{f - \alpha} + \frac{E_h}{F_y \times f} \tag{5}$$

上式中,各符号意义同前. 该模型在原模型双重破坏准则的基础之上更进一步. 它以超过屈服点的变形和滞回耗能双参数定义破坏指数,不但纠正了原模型的缺点,而且更具合理性. 利用式(3)和式(5),分别对 SP1, SP2 和 SP4 等 3 个不同轴压比的框架柱试件的损伤指数进行了计算. 式(4)中的相关试件参数,如表 4 所示,滞回能量计算采用文[1]根据该批试件试验研究结果建议的恢复力模型. 损伤指数的最终计算结果,如表 5 所示. 其中,  $D_3$  和  $D_5$  是式(3)的计算结果,  $D_3$  和  $D_5$  是式(5)的计算结果. 从表 5 可以看出,该结果与试验的实际情况,以及震害指数的原始定义吻合较好.

表 4 试件相关计算参数

试件	$m_0$	$n$	$\rho_s / (\%)$	$\rho_v / (\%)$
SP401	3	0.311	0.200	
SP402	3	0.582	0.374	0.85
SP404	3	0.766	0.490	

表 5 Park 模型的损伤指数计算结果

试件	$D_3$	$D_5$	$D_3$	$D_5$
SP401	0.540	0.619	0.484	0.563
SP402	0.803	0.985	0.756	0.938
SP404	0.788	0.993	0.739	0.944

2.3 基于刚度变化的模型

1987 年, Roufaiel 和 Meyer<sup>[5]</sup>提出根据构件刚度的衰减来定量计算震害指数. 他们认为, 一栋建筑能否在地震中幸存, 主要取决于它的主体结构在本次及以前的各次地震中, 所经受的强度和刚度的衰减. 因此, 定义一个与结构的残余强度和刚度有关的破坏状态, 是非常有必要的. 文[5]建议了基于刚度变化的的震害指数计算模型. 即

$$D = \frac{k_t}{k_m} \times \frac{(k_m - k_0)}{(k_t - k_0)} \tag{6}$$

在式(6)中,各符号意义如图 3 所示. 利用式(6), 分别对 SP1, SP2 和 SP4 等 3 个不同轴压比的框架柱试件的损伤指数进行了计算. 式(6)中不同位移幅值的割线刚度值根据试验骨架曲线(表 2)和图 3 确定, 并和损伤指数计算结果同时列于表 6. 其中  $k_{m3}$  和  $k_{m5}$  分别为  $3 \phi_y$  和  $5 \phi_y$  的割线刚度.

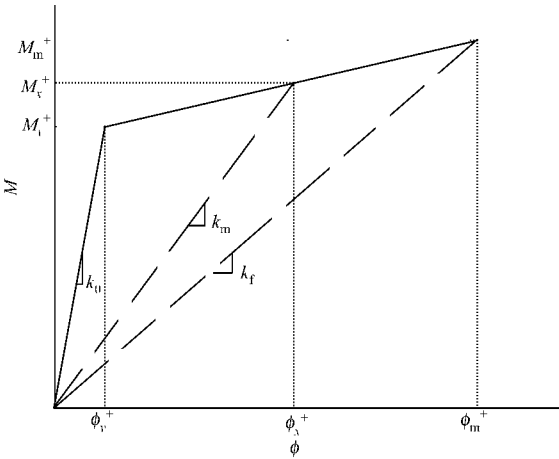


图 3 M-φ曲线及各阶段刚度示意图

表 6 Roufaiel 模型的损伤指数计算结果

试件	$k_0 / \text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	$k_{m3} / \text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	$k_{m5} / \text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	$k_t / \text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	$D_3$	$D_5$
SP401	61.60	25.35	18.03	8.03	0.214	0.362
SP402	68.73	24.56	14.97	10.30	0.317	0.633
SP404	82.14	28.10	15.09	9.15	0.241	0.557

3 计算结果比较分析

通过对上述各损伤指数模型的计算结果进行分析比较,可以得出以下 3 点结论. (1) 对于本文的计

算试件而言,所选用的 3 种震害指数模型的计算结果,均可以较好地反映试件不同位移幅值下的损伤程度.并且,结果基本上能够反映出轴压比对不同位移幅值下,构件损伤程度的影响.这说明,基于疲劳、能量及刚度等参数的震害指数模型,比传统的延性比等仅基于构件变形的震害指数模型,在评估结构损伤程度时具有明显的优势.(2)从表 7 不同震害指数模型计算结果可以看出,基于累积损伤的 Wang 模型可能过低估计 3<sub>y</sub> 时的损伤程度,而 Park 模型则可能得出对损伤程度的过高估计.(3)Wang 模型计算结果的合理性,在很大程度上依赖于试件参数 *c* 的取值(表 3).对于本文剪跨比为 3.0 的框架柱试件而言,取 *c* = 1.5 较为合理.

表 7 3 种损伤指数模型计算结果汇总

试件	Wang 模型		Park 模型		Roufaiel 模型	
	<i>D</i> <sub>3</sub>	<i>D</i> <sub>5</sub>	<i>D</i> <sub>3</sub>	<i>D</i> <sub>5</sub>	<i>D</i> <sub>3</sub>	<i>D</i> <sub>5</sub>
SP401	0.150	0.524	0.484	0.563	0.214	0.362
SP402	0.190	0.808	0.756	0.938	0.317	0.633
SP404	0.179	0.755	0.739	0.944	0.241	0.557

Park 模型在其耗能因子中考虑了剪跨比、轴压比、配筋率和配箍率等因素的影响,因而可以适用于各种不同受力特征的构件.但它也存在滞回耗能计算繁杂的缺点. Roufaiel 模型仅需要事先确定构件的 *M*-*Q*或 *P*-曲线,因而具备物理概念明确和计算简便的优点.但是,由于它未能考虑构件的累积损伤,因而可能低估构件在较大位移幅值时的损伤程度.

4 结 束 语

震害指数概念的提出已有 30 多年的历史,至今仍在不断的发展和完善中.通过对基于疲劳、变形-能量,以及刚度等参数的震害指数模型的计算和比较分析可以看出,不同模型中所用到的各种待定常数的取值对计算结果的影响不可忽视.不同的模型,其试验背景又往往相差较大,从而使得这些待定常数取值的通用性受到很大的限制.因此,也就不利于模型的推广应用.从应用角度,震害指数计算模型应提倡在概念清晰、物理意义明确的前提下,尽量简化,避免繁杂的计算过程,以便于震害指数在结构地震反应和性能评估中的推广应用.

参 考 文 献

1 郭子雄,吕西林.高轴压比框架柱恢复力模型试验研究[J].土木工程学报,2004,(5):32~38  
2 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,(5):56~61  
3 Wang M L, Shah S P. Reinforced concrete hysteresis model based on the damage concept[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1987,15(8):993~1003  
4 Park Y J, Ang A H-S. Mechanisric seismic damage model for reinforced concrete[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1985,111(4):722~739  
5 Roufaiel M S L, Meyer C. Analytical modeling of hysteretic behaviour of R/ C frames[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1987,113(3):429~444

A Comparative Study on Seismic Damage Index  
Based on Test Results

Guo Zixiong    Liu Yang    Yang Yong

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China)

**Abstract**    The damage indices of three cyclic loading reinforced concrete column specimens were calculated according to three known seismic damage index models, which were based on accumulative damage, deformation-energy and structural stiffness, respectively. Based on the calculation results, test data and damage characteristics in the test process, the validity of these damage index models on evaluation of damage degree of RC columns under seismic loading were analyzed and compared. The existing problems on the research of seismic damage index and some suggestions for the future research were brought forward finally.

**Keywords**    seismic damage index, frame column, test results, accumulative damage, comparative