

文章编号: 1000-5013(2011)03-0313-04

弹性能损失的地震损伤评价模型

郑济坤, 王全凤

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 针对混凝土结构构件在地震过程中的弹性能损失现象, 提出一种与弹性能损失相关的地震损伤评价模型. 该模型考虑了混凝土结构构件在地震中的能量转移和刚度退化的影响, 多角度地评价混凝土结构构件的损伤情况. 对 6 根 HRBF 500 钢筋混凝土柱进行低周反复加载试验, 考察其在地震中损伤发展的趋势和程度, 并对比经典 Park 模型和所建立的模型的损伤评价情况. 结果表明: 所建立的模型具有较好的可靠性和合理性, 能克服经典 Park 模型的部分缺陷.

关键词: 地震损伤; 损伤评价; 弹性能; HRBF 500 钢筋; 刚度退化; Park 模型

中图分类号: TU317.1; TU 375.3

文献标志码: A

结构的抗倒塌分析是判断建筑物能否经历强震而不倒的关键技术, 而如何定量地分析结构的破坏程度是抗倒塌分析中的一个重要环节. 因此, 合适的结构地震损伤评价模型将决定破坏程度量化及抗倒塌分析的准确性. Hearn 等^[1]从截面退化方面定义损伤指标. Krawinkler 等^[2]分别从刚度退化和能量退化考虑结构损伤. Powell 等^[3]认为在各种参数中变形得出的指标最好. 1985 年, Park 等^[4]提出的钢筋混凝土构件基于地震弹塑性变形和累积滞回耗能组合的地震损伤模型. 陈永祁等^[5]根据文献[4]Park 模型思路, 引入耗能指数 η 和延性系数 μ , 得出一个图解的双控破坏准则. 牛荻涛等^[6]比较了各种双参数破坏准则, 指出以往破坏准则的参数组合形式不合理, 且没能处理好参数 β 的取值问题, 提出了变形与耗能的非线性组合形式. 李军旗等^[7]改进了经典的 Park 模型表达式, 认为大变形幅值下的累积耗能对循环损伤的影响应作折减. 于海洋等^[8]结合损伤力学的基本原理, 提出一种新型的混凝土结构双参数地震损伤模型, 并根据已有的实验结果确定模型参数. 杨伟等^[9]寻找出结构滞回耗能与结构最大位移的关系, 方便求解出结构的滞回耗能. 刁波等^[10]依据能量耗散原理, 提出反复荷载作用下异形柱累积损伤评价模型. 王全凤等^[11-14]提出以累积释放弹性能为指标的结构损伤模型, 并对 HRB400 RC 柱进行损伤评价. 本文立足于卸载理论中的动力屈服卸载效应, 提出基于弹性能损失的地震损伤评价模型.

1 弹性能损失的地震损伤模型

利用卸载分析的概念, 从构件在荷载作用下弹性能损失的角度, 建立构件的损伤模型理论. 动力卸载是指在结构系统振动过程中, 由于系统参数变化, 使得系统振动能量在系统内转移或对系统外释放, 系统的振动能量分布发生变化, 同时系统的变形状态和运动状态发生变化^[12]. 构件以自身的弹性变形和塑性变形来储存能量, 此过程中储存下的能量简称为弹性能和塑性能.

地震作用下, 构件发生损伤和刚度退化, 局部产生屈服, 屈服部位的刚度显著变小, 仍处于弹性工作阶段的部分向屈服部位卸载弹性能, 使得屈服现象加剧, 部分弹性变形能转化成塑性能或释放, 从而引起构件的弹性能损失. 构件在振动过程中, 由于不断地出现局部屈服或损伤, 使得此动力卸载状态也持续地发生改变. 这种现象同时也表现在每一次循环之后, 构件储存弹性能的能力均有所下降. 从试验现

收稿日期: 2010-09-09

通信作者: 王全凤(1945-), 男, 教授, 主要从事工程结构力学分析、结构抗震及加固的研究. E-mail: qfwang@hqu.edu.cn.

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(200803850001)

象中观察,这种弹性能损失与构件的刚度退化、塑性发展有着密切关系. 同样,弹性能损失程度与构件损伤的发展也有着紧密的联系.

构件某一循环的滞回曲线,如图 1 所示. 图 1 中,构件开始加载时刻的初始刚度为 K_0 . 若加载过程中,构件刚度无退化、截面无损伤,则构件以初始刚度按线弹性变形;当水平位移为 OB 时,构件应当存储的弹性能为 $\triangle OAB$ 的面积. 在一个循环中,构件应当储存的弹性能为 $\triangle OAB$ 与 $\triangle OCD$ 的面积之和. 在此循环的实际实验过程中,外部能量转移形成构件的弹性能的部分是图 1 中的阴影部分 EFB 和 $O'DG$ 的和. 从图 1 中可以看出,实际试验中形成的弹性能显著小于理论的无损伤状态. 这种现象是由于构件的试验过程中刚度退化和局部损伤引起的.

将试验中吸收的弹性能与理论的无损伤状态的弹性能之比定义为构件的损伤指数,即

$$D = 1 - (\int_0^l E_h) / E_0.$$

(1)

式(1)中: $\int_0^l E_h$ 为某一时刻构件中形成的弹性能; E_0 为无损伤状态的弹性能. 以某一循环结束时刻的滞回曲线形态,计算在此循环中构件形成的弹性能,则有

$$\int_0^l E_h = \triangle EFB + \triangle O'GD.$$

(2)

式(2)中: $\triangle EFB + \triangle O'GD$ 为曲线 EFB 和 ODG 围成的面积,即图中的阴影部分面积,表示此循环构件形成的弹性能.

2 HRBF 500 钢筋混凝土柱破坏试验

通过对 6 个配置 HRBF 500 钢筋的混凝土柱进行低周反复水平加载,考察 HRBF 500 RC 柱在地震中损伤发展的趋势和程度. 由于篇幅所限,仅列出典型的 KZF1, KZF2 等 2 个构件的骨架曲线,如图 2 所示. 利用通用屈服位移法,通过骨架曲线确定出构件的屈服位移和屈服荷载,如表 1 所示. 表 1 中: 构件混凝土均为 C50;纵筋均为 4 根直径 20 mm 的 HRBF 500 钢筋; n 为轴压比; λ 为剪跨比; X_y 为屈服位移; X_u 为极限位移; F_y 为屈服荷载; F_u 为极限荷载.

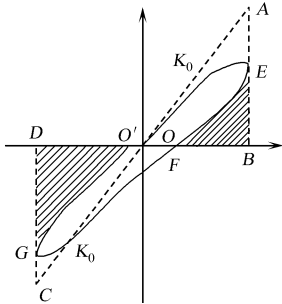
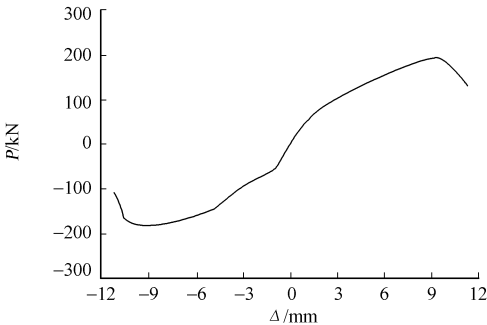
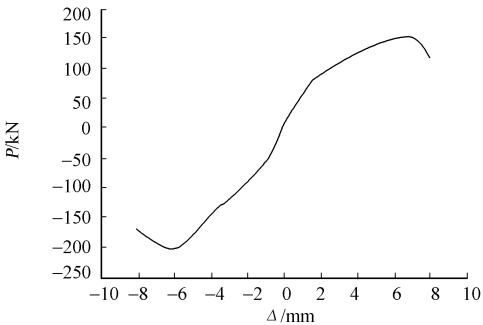


图 1 构件某一循环滞回曲线
(2) Fig. 1 Hysteresis curve of one loop



(a) KZF1



(b) KZF2

图 2 典型构件骨架曲线
Fig. 2 Skeleton curve of typical components

表 1 构件参数及特征点
Tab. 1 Component parameters and feature points

构件	$a \times b / \text{mm} \times \text{mm}$	箍筋	n	λ	X_y / mm	X_u / mm	F_y / kN	F_u / kN
KZF1	150 × 250	Φ 8@150	0. 20	1. 9	5. 02	11. 20	146	194
KZF2	150 × 250	Φ 8@150	0. 35	1. 9	3. 75	8. 20	137	187
KZF3	150 × 250	Φ 8@150	0. 50	1. 9	4. 26	8. 90	177	209
KZF4	150 × 250	Φ 8@100	0. 35	1. 9	4. 04	9. 20	147	216
KZF5	150 × 250	Φ 8@150	0. 20	1. 5	4. 68	9. 40	203	284
KZF6	150 × 250	Φ 8@150	0. 20	2. 4	4. 93	11. 60	128	205

3 地震损伤评价

3.1 HRBF 500 RC 柱的地震损伤评价

基于 HRBF 500 RC 柱的试验数据,通过 Origin 8.0 软件精确计算循环中构件形成的弹性能,并通过式(2)计算构件的加载全过程的损伤指数,结果如表 2 所示.表 2 中: X_{cr} , E_{cr} , E_{cr_0} 分别为构件开裂位移、开裂时刻弹性能、该循环末无损伤理论弹性能; X_u , E_u , E_{u_0} 分别为构件极限位移、破坏时刻弹性能、该循环末无损伤理论弹性能; D 为构件损伤指数.开裂位移和极限位移所对应的弹性能和损伤指数分别由位移循环末的弹性能计算得到.由于篇幅有限,表 2 中仅列出开裂时刻、破坏时刻的数据.

表 2 构件弹性能计算及损伤指数
Tab. 2 Calculation of elastic energy and damage index

构件	开裂时刻				破坏时刻			
	X_{cr}/mm	E_{cr}/J	E_{cr_0}/J	D	X_u/mm	E_u/J	E_{u_0}/kJ	D
KZF1	1.35	55.79	95.41	0.41	11.20	543.04	6.596 31	0.92
KZF2	1.98	138.30	300.83	0.54	8.20	683.76	5.118 23	0.86
KZF3	2.47	245.32	414.21	0.41	8.89	837.17	5.357 06	0.84
KZF4	2.93	279.80	580.33	0.52	9.18	812.76	5.700 62	0.86
KZF5	1.33	40.81	129.33	0.39	9.39	1133.31	6.407 75	0.82
KZF6	2.78	235.09	490.55	0.52	11.60	143.10	8.528 79	0.83

3.2 损伤模型的评价准则

依据试验中的现象记录及损伤指数计算,建立试验现象和模型损伤指数的一一对应关系,提出基于弹性能损失的损伤模型的评价准则.所建立的模型与经典 Park 模型的损伤评价准则,如表 3 所示.

表 3 两种模型的损伤评价准则
Tab. 3 Different criterions for evaluation in two models

损伤程度	细微开裂、微观裂缝	轻微开裂、可见裂缝	中等破坏	严重破坏	构件失效(倒塌)
Park 模型指标	0~0.2	0~0.2	0.2~0.4	0.4~1.0	>1.0
本文模型指标	0~0.3	0.3~0.5	0.5~0.7	0.7~0.9	0.9~1.0

3.3 模型对比分析

运用基于双参数的经典 Park 损伤评价模型^[4]对 HRBF 500 RC 柱的破坏性试验进行评价,并与建立的模型对比分析,以验证模型的损伤评价效果,如表 4 所示.

表 4 两个模型的损伤指数值
Tab. 4 Values of D in two different models

项目	KZF1	KZF2	KZF3	KZF4	KZF5	KZF6
循环荷载系数	0.408	0.422	0.435	0.634	0.354	0.545
Park 模型	2.50	2.51	2.35	4.70	2.94	2.96
本文模型	0.92	0.86	0.84	0.86	0.82	0.83

从表 4 可以看出,利用所建立的模型进行评价,6 个构件均处于严重破坏或失效状态,与试验现象吻合良好;而通过经典 Park 模型进行评价,构件均处于失效状态.两模型的评价结论一致,说明了模型的正确性和可行性.通过计算 Park 损伤模型指数,发现其值远大于 1,虽然处于失效的范围内,但其范围过大,具体表现难以界定.当所建立模型的指数达到最大值 1 时,说明构件完全丧失吸收弹性能的能力,认定接近此刻的状态即为构件失效.此标准定义明确,易于细化.

通过两种模型的对比分析可以知道 Park 损伤模型考虑了位移和塑性耗能的综合影响,而所提出的损伤模型考虑了弹性能的损失,即塑性耗能和释放能的增加,同时综合了刚度退化因素的影响,在能量角度考虑上更加深化.

4 结束语

文中提出的是一个全新的基于弹性能损失的损伤模型和损伤评价准则.应该指出的是,所提出的

模型在计算上较为复杂,需要积分过程. 由于只能在某一循环末计算构件在循环中形成的弹性能,从而计算出一个循环结束后构件的损伤情况,因此,任一个循环的过程中具体的损伤发展情况还有待研究.

参考文献:

[1] HEARN G,TESTA R B. Modal analysis for damage detection in structures[J]. J Structural Engineering,1991,117(10):3042-3063.

[2] KRAWINKLER H,ZOHREI M. Cumulative damage in steel structures subjected to earthquake ground motions[J]. Computers and Structures,1983,16(1/2/3/4):531-541.

[3] POWELL G H,ALLCHABADI R. Seismic damage prediction by deterministic methods[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics,1988,16(5):719-734.

[4] PARK Y J,ALFREDO H S A. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete[J]. J Structural Engineering,1985,111(4):722-739.

[5] 陈永祁,龚思礼. 结构在震动时延性和累积塑性耗能的双重破坏准则[J]. 建筑结构学报,1986,7(1):35-48.

[6] 牛荻涛,任利杰. 改进的钢筋混凝土结构双参数地震破坏模型[J]. 地震工程与工程震动,1996,16(4):44-54.

[7] 李军旗,赵世春. 钢筋混凝土构件损伤模型[J]. 兰州铁道学院学报,2000,19(3):25-27.

[8] 于海洋,武建华,张国彬. 一种新型的混凝土结构双参数地震损伤模型[J]. 重庆建筑大学学报,2004,26(5):43-48.

[9] 杨伟,欧进萍. 基于能量原理的 Park&Ang 损伤模型简化计算方法[J]. 地震工程与工程振动,2009,29(2):159-165.

[10] 刁波,李淑春,叶英华. 反复荷载作用下混凝土异形柱结构累积损伤分析及试验研究[J]. 建筑结构学报,2008,29(1):57-63.

[11] 王全凤,刘良林,沈章春. 弹性变形能形式的地震损伤评价模型[J]. 建筑科学与工程学报,2008,25(4):31-35.

[12] 黄庆丰,王全凤. 弹塑性结构动力系统的时变刚度激励效应分析[J]. 土木工程学报,2006,39(12):16-22,32.

[13] 王全凤,黄庆丰. 损伤结构弹塑性抗震性能分析及评价[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2009,30(1):6-11.

[14] 郑济坤,王全凤. HRBF 500 RC 柱地震全过程损伤试验分析[J]. 工业建筑,2010,40(12):51-54.

Seismic Damage Assessment Model Based on
Loss of Elastic Energy

ZHENG Ji-kun, WANG Quan-feng

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

Abstract: Considering the loss of elastic energy of structural elements during earthquake, a seismic damage model is presented. The energy transfer and stiffness degradation are involved in this new model, so the damage of structure can be evaluated in various aspects. Six HRBF 500 RC columns are tested under low frequency cyclic loading. The trend and level of damage in earthquake are analyzed by Park model and new model. By comparison of the results of two models, it's shown: the new model is reliable and reasonable and it can overcome some shortcomings of Park model.

Keywords: seismic damage; damage evaluation; elastic energy; HRBF 500 steel bar; stiffness degradation; Park model

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)