

文章编号:1673-2049(2008)04-0031-05

# 弹性变形能形式的地震损伤评价模型

王全凤,刘良林,沈章春

(华侨大学 土木工程学院,福建 泉州 362021)

**摘要:**针对典型地震损伤评价模型存在的缺陷,通过将地震复杂的滞回过程进行简化,提出了一种弹性变形能形式的损伤评价模型;重点阐述了典型的 Park 地震损伤评价模型以及基于延性系数的地震损伤评价模型,并根据试验数据对这 3 种模型进行了对比分析。结果表明,新建模型以其正确性与合理性克服了典型地震损伤评价模型的缺陷。

**关键词:**骨架;延性系数;地震损伤;损伤评价

**中图分类号:**TU317.1 **文献标志码:**A

## Seismic Damage Assessment Model of Form of Elastic Deformation Energy

WANG Quan-feng, LIU Liang-lin, SHEN Zhang-chun

(School of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, Fujian, China)

**Abstract:** Aimed at the defects of the classic seismic damage assessment model, a model based on form of elastic deformation energy was proposed and the models based on the classic park seismic and the ductility were listed. Taking the complexity of the hysteretic process into account, the hysteretic process was changed into the static state based on the simplification of skeleton curves. Then, a new seismic damage evaluation model was built from the point of energy. According to the data from destructive experiments of four columns, comparisons were executed among the three models. The results show that the new model which is corrective and feasible can overcome the defects of the classic seismic damage assessment model.

**Key words:** skeleton; ductility coefficient; seismic damage; damage assessment

## 0 引言

地震是地壳运动在某些阶段发生急剧变化时的一种自然现象,它是地壳运动的一种表现,与地质构造有密切关系。据统计,全世界每年要发生数百万次地震,但绝大多数不为人所感觉,能造成破坏性灾害的地震平均每年只有十几次<sup>[1]</sup>。一次地震是一次能量释放的过程。在地震的往复作用过程中,建筑物通过产生反应(如变形)来消耗地震所释放的能量。结构对地震的响应导致建筑物构件强度与刚度下降、产生裂缝、断裂、破坏甚至建筑物的整体倒塌,

根据抗震与加固维护的要求,需要对这些构件甚至整体结构进行地震作用下的损伤情况的评价。

工程抗震的重要问题是如何评价结构遭遇地震时的损伤程度<sup>[2]</sup>。所谓损伤评价,就是试图通过某个指标对地震后的结构或构件的破坏状况进行评估。目前,各国学者提出过许多地震损伤评价模型。考虑到工程应用与实践的方便,本文中笔者针对常用的地震损伤评价模型存在的缺陷,提出一种基于弹性变形能形式的损伤评价模型,在对试验数据分析的基础上,对这 3 种模型进行了对比分析,证明了本文新建模型的正确性与合理性。该模型通过将地

收稿日期:2008-08-05

基金项目:国家自然科学基金项目(50578066/E080507)

作者简介:王全凤(1945-),男,福建莆田人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:qfwang@hqu.edu.cn。

震复杂的滞回过程进行简化,以其正确性以及简单易行性克服了典型地震损伤评价模型的缺陷。

1 典型地震损伤评价模型

1.1 Park 模型

根据一大批美国和日本的钢筋混凝土柱试验结果,美国学者 Park 等在 1985 年首次提出了以最大变形与累积滞回耗能组合的双参数地震损伤模型<sup>[3]</sup>,即

$$D = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \beta \frac{\int dE}{F_y \delta_u} \tag{1}$$

式中: $D$  为损伤指数; $\delta_m$  为地震作用下构件或结构的最大变形; $\delta_u$  为单调荷载作用下构件或结构的极限变形; $F_y$  为屈服荷载计算值; $\int dE$  为累积滞回耗能; $\beta$  为循环荷载影响系数,其表达式<sup>[4]</sup> 为

$$\beta = (-0.357 + 0.73\lambda + 0.24n_0 + 0.314\rho) \times 0.7\rho_w \tag{2}$$

式中: $\lambda$  为构件的剪跨比,当  $\lambda < 1.7$  时取 1.7; $n_0$  为构件的轴压比,当  $n_0 < 0.2$  时取 0.2; $\rho$  为纵筋的配筋率,当  $\rho < 0.75\%$  时取 0.75%; $\rho_w$  为体积配箍率,当  $\rho_w > 2\%$  时取 2%。 $\beta$  一般在 0~0.85 之间变化,其均值约为 0.15。Park 模型评价准则见表 1。

表 1 Park 损伤模型评价准则

Tab. 1 Assessment Rule of Park Damage Model

损伤等级	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
$D$	0.0~0.4 (可修复的破坏)		0.4~1.0 (不可修复的破坏)		$>1.0$

1.2 基于延性系数的模型

由于 Park 模型存在着  $\beta$  取值无根据以及结构或构件在极限状态下的损伤指数  $D$  值大于 1 等缺陷,Ghobarah 等提出了基于 2 次 Pushover 分析得到的刚度比来定义的损伤指数,以此进行地震损伤评价,其相应的地震损伤模型评价准则见表 2,该模型的表达式为<sup>[5]</sup>

表 2 Ghobarah 地震损伤模型评价准则

Tab. 2 Assessment Rule of Ghobarah Seismic Damage Model

$D$	损伤等级
$>0.80$	局部或整体失效
0.30~0.80	严重破坏(不可修复)
0.15~0.30	中等破坏(可修复)
0.00~0.15	轻微破坏

$$D = 1 - \frac{K_{final}}{K_{initial}} \tag{3}$$

式中: $K_{initial}$  为地震作用下框架的初始刚度; $K_{final}$  为地震作用下的最终刚度。

考虑刚度退化并采用克拉夫退化双线性模型得到位移延性系数  $\mu$  为<sup>[6]</sup>

$$\mu = (1 - D)^{-\frac{1}{\gamma}} \tag{4}$$

将式(4)整理,可得到基于延性系数的损伤评价模型

$$D = 1 - \mu^{-\gamma} \tag{5}$$

式中: $\gamma$  为卸载刚度系数,可取为 0.4<sup>[7]</sup>。

2 弹性变形能形式的损伤评价模型

由于结构的累积损伤破坏是一个过程,结构在地震动下的反应具有随机性,在实际地震中很难记录到每一个建筑结构的时程数据,一般只可能得到结构的初始状态和稳定后的状态。因此,影响结构破坏的累积效应和最大反应较难估计,也为估计最大反应和累积效应引起的损伤带来困难。但如果把损伤过程当作一个黑箱,通过结构的初始刚度和退化刚度来估计结构的等效最大位移,则可以认为结构只进行一次循环,用一次循环来等效累积效应,而这次循环的滞回耗能等效于结构的多次循环的滞回耗能。

构件破坏总是与其弹性变形能释放相关,如受弯构件局部屈服,屈服部位的弹性变形能转化为塑性变形能或其他能量形式,屈服开始时构件仍具有抵抗荷载作用的能力,构件未屈服部位的弹性变形能仍然保留,随着构件屈服部位逐渐破坏,屈服部位的抵抗能力下降,构件其他部位的弹性变形能逐渐转化为屈服部位的塑性变形能或以其他能量(如热能、声能)形式释放。构件破坏时,弹性变形能转化为塑性变形能和对外释放的比例与构件延性有关,构件延性越好,破坏时弹性变形能转化为塑性变形能的比例越大,反之则越小,完全脆性材料构件破坏时其弹性变形能完全释放。结构的破坏情况与构件破坏情况类似。虽然传统方法采用结构滞回耗能指标评价破坏或损伤程度,但结构释放出的弹性变形能也是可用的评价参数<sup>[8]</sup>。此外,根据内变量理论,结构发生损伤会影响其弹性能的改变,其损伤的程度可从弹性应变能得到反映<sup>[9-16]</sup>。

图 1 为滞回运动中的能量关系。基于文献[17]将骨架曲线理想化为三折线的方法,根据图 1 中的能量关系提出如下损伤评价表达式

$$D = \frac{U_D}{U} \tag{6}$$

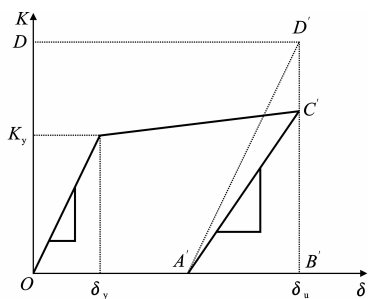


图 1 滞回运动中的能量关系

**Fig. 1 Relations of Energies in Process of Hysteretic Motion**  
式中: $U$  为无损伤结构相同弹性变形对应的弹性能,如图 1 中 $\triangle ADB$  的面积所示; $U_D$  为恢复力模型反映的结构损伤后的弹性能,见图 1 中 $\triangle ABC$  的面积。图 1 中, $K$  为结构的刚度; $\delta$  为结构的变形; $K_y$  为初始加载刚度; $K_D$  为卸载刚度。

本文中提出的损伤指数  $D$  具备如下性质:当结构或构件无损伤时, $U_D=0$ ,由式(6)得到  $D=0$ ;当结构或构件倒塌或整体倾覆时, $U_D$  不一定与  $U$  相等,所以  $0\leq D<1.0$ 。

3 低周反复荷载破坏性试验

近年来,由于材料科学的发展和实际工程的需要,使得高强混凝土这种新型建筑材料在世界许多地方、许多领域得到了越来越广泛的应用。新修订的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)<sup>[18]</sup> 为适应中国经济建设发展及促进科技进步,推荐采用高质量的 HRB400 级钢筋和高强度、低松弛的预应力钢绞线作为混凝土结构配筋的主导钢筋,未列出了应用了多年的各类冷拉钢筋。

由于地震作用下,混凝土很容易开裂,为了使结构裂而不倒,钢筋的抗震性能至关重要,为此,文献[19] 中从微观分析与成分分析出发,研究了 HRB400 级钢筋的抗震性能。但是对于 HRB400 级钢筋混凝土构件整体的抗震性能以及损伤评价,还需要更多的研究。基于此,文献[20] 中根据低周反复加载破坏性试验数据,研究了 HRB400 级钢筋混凝土柱的滞回性能。为进一步了解其抗震性能,笔者运用本文中提出的模型衡量柱的破坏状况,并采用了文献[20] 中 4 个试件 KZ-1~KZ-4 的骨架曲线,见图 2。

4 损伤指数计算

根据 4 个试件的低周反复荷载破坏性试验得到

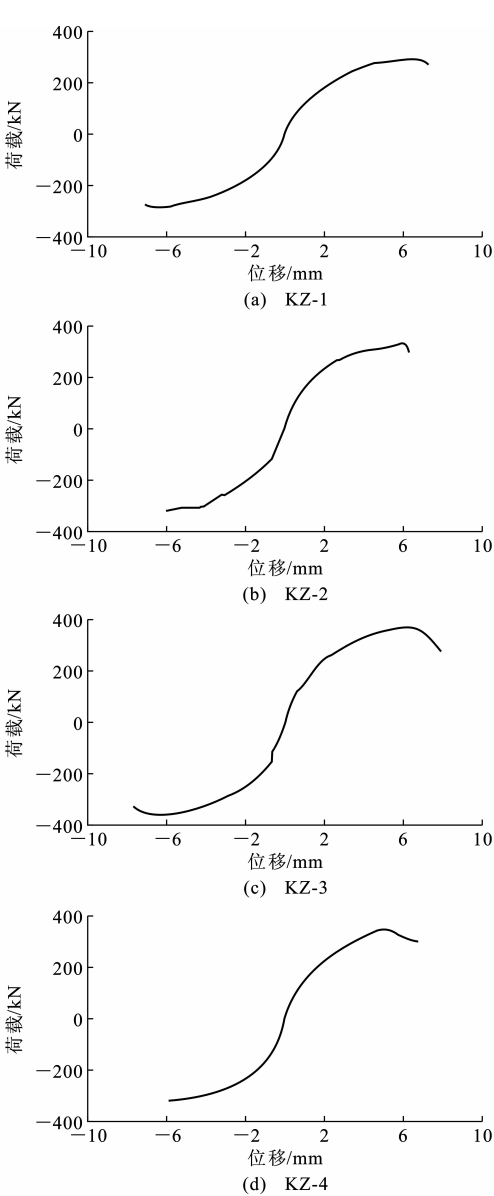


图 2 各试件的骨架曲线

**Fig. 2 Skeleton Curve of Each Specimen**

骨架曲线,运用等能量法计算出 4 个试件的位移延性系数,见表 3。根据试验结果和式(1)计算出 4 个试件的损伤指数以及由表 3 和式(5)计算出基于延性系数的损伤指数,见表 4。

表 3 各试件的位移延性系数

**Tab. 3 Displacement Ductility Coefficient of Each Specimen**

试件编号	KZ-1	KZ-2	KZ-3	KZ-4
$\mu$	2.52	2.53	2.43	2.52

将图 2 所示的骨架曲线的正向部分理想化为三折线形式,见图 3。根据图 3 以及式(6)计算出损伤指数,见表 4。

从表 4 中各试件在不同损伤模型下的损伤指数,可以得出如下的结论:

表 4 各试件在不同损伤模型下的损伤指数  
Tab. 4 Damage Index of Each Specimen from  
Different Damage Models

试件编号		KZ-1	KZ-2	KZ-3	KZ-4
D	Park 模型	1.02	1.02	1.01	1.01
	基于延性系数的模型	0.31	0.31	0.30	0.31
	本文模型	0.69	0.69	0.70	0.69

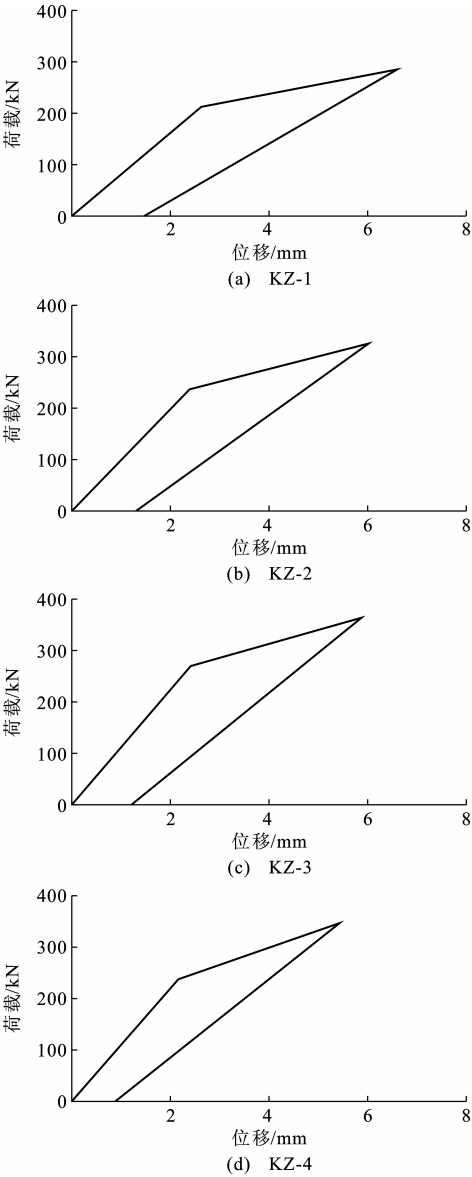


图 3 各试件的等效骨架曲线

Fig. 3 Equivalent Skeleton Curve of Each Specimen

(1)依据 Park 模型计算的损伤指数  $D$  均大于 1,按照表 1 的评价准则,可以认为 4 个试件已经倒塌,这与本次破坏性试验的结果不是很相符,但是计算的结果是偏安全的。

(2)基于延性系数计算出来的损伤指数  $D \geq 0.3$ ,按照表 2 的评价准则,4 个试件都处于严重破坏(不可修复)的阶段,这与试验的结果符合较好,但

是损伤指数值很边缘化,容易存在争议。  
(3)按照本文中提出的模型计算得到的损伤指数  $D$  值,无论是采用表 1 还是表 2 的评价准则,4 个试件都处于严重破坏(不可修复)的阶段,这与试验的结果非常一致,这说明本文提出的模型是正确可行的。

5 结 语

按照本文提出的基于能量形式的损伤指数评价模型计算无论是采用表 1 还是表 2 的评价准则,4 个试件都处于严重破坏的阶段,这与试验的结果非常一致,说明本文中提出的模型是正确可行的。应该指出的是,本文中建立的损伤模型还没有相应的评价准则,考虑到该模型是从刚度退化方面推导出的,与 Ghobarah 提出的模型存在一定的相似性,因此建议采用表 2 的评价准则。

参考文献:

References:

[ 1 ] 朱伯龙,屠成松,许哲明. 工程结构设计原理[M]. 上海:上海科学技术出版社,1982.  
ZHU Bo-long, TU Cheng-song, XU Zhe-ming. Design Principles of Engineering Structures[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1982.

[ 2 ] 王全凤,黄庆丰,王凌云. 断层剪力墙高层建筑抗震设计理论与关键技术[J]. 华侨大学学报:自然科学版, 2006, 27(2): 113-118.  
WANG Quan-feng, HUANG Qing-feng, WANG Ling-yun. Theory and Key Technique for the Seismic Design of High-rise Building with Fault Shear Wall [J]. Journal of Huaqiao University: Natural Science, 2006, 27(2): 113-118.

[ 3 ] YOUNG J P, ANG A H S. Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(4): 722-739.

[ 4 ] 于海祥. 钢筋混凝土结构地震损伤模型研究[D]. 重庆:重庆大学,2004.  
YU Hai-xiang. Research on Seismic Damage Model of Reinforced Concrete Structures [D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.

[ 5 ] GHOBARAH A, ABOU-ELFATH H, BIDDAR A. Response Based Damage Assessment of Structures [J]. Earthquake Engng Struct Dyn, 1999, 28: 79-104.

[ 6 ] 丁 建. 钢筋混凝土框架直接基于损伤性能的能力设计理论及方法的研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2004.  
DING Jian. Theory and Method of Direct Damage-

- based Seismic Capacity Design of Reinforced Concrete Frame Structures [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2004.
- [7] 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- JIANG Jian-jing, LU Xin-zheng, YE Lie-ping. Finite Element Analysis for Concrete Structures [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [8] 黄庆丰. 抗震结构动力响应的卸载分析方法 [D]. 天津: 天津大学, 2003: 78-79.
- HUANG Qing-feng. Off-loading Analysis Method of Dynamic Response of Anti-seismic Structure [D]. Tianjin: Tianjin University, 2003: 78-79.
- [9] 邢 君. 地震作用下钢筋混凝土框架倒塌过程数值模拟 [D]. 天津: 河北工业大学, 2003: 17-20.
- XING Jun. Numerical Simulation of Collapse Progress of Reinforced Concrete Frame Under Seism [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2003: 17-20.
- [10] 向天宇, 赵人达. 结构损伤识别的双重网格算法 [J]. 中国公路学报, 2006, 19(4): 94-97.
- XIANG Tian-yu, ZHAO Ren-da. Dual Mesh Method for Structure Damage Detection [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(4): 94-97.
- [11] 甘亚南, 周广春. 基于能量变分原理的薄壁箱梁自振特性分析 [J]. 中国公路学报, 2007, 20(1): 73-78.
- GAN Ya-nan, ZHOU Guang-chun. Analysis of Free Vibration Characteristics of Thin-walled Box Girder Based on Energy Variation Principle [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(1): 73-78.
- [12] 周勇军, 彭晓彬, 宋一凡. 在用简支梁桥横向地震动研究 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(5): 58-62.
- ZHOU Yong-jun, PENG Xiao-bin, SONG Yi-fan. Seismic Vibration of Existing Simply-supported Beam Bridges [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(5): 58-62.
- [13] 曹彩芹, 王春玲, 王爱勤. 指数函数模量成层土上剪切梁的随机地震反应 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(4): 66-69.
- CAO Cai-qin, WANG Chun-ling, WANG Ai-qin. Random Earthquake Response of Shearing Beam on Stratified Foundation with Exponential Function Shear Modulus [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(4): 66-69.
- [14] 楼梦麟, 雍国柱, 李建元. 阻尼特性对组合结构地震反应的影响 [J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(2): 24-29.
- LOU Meng-lin, YONG Guo-zhu, LI Jian-yuan. Influence of Damping Characteristics on Seismic Responses of Composite Structures [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(2): 24-29.
- [15] 易伟建, 张 颖. 混凝土框架结构抗震设计的弯矩增大系数 [J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(2): 46-51.
- YI Wei-jian, ZHANG Ying. Moment Magnification Factor in Anti-seismic Design of Concrete Frame Structure [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(2): 46-51.
- [16] 吴建营, 李 杰. 混凝土弹塑性损伤本构关系统一模型 [J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(4): 15-21.
- WU Jian-ying, LI Jie. Unified Elasto-plastic Damage Constitutive Relations Model for Concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4): 15-21.
- [17] 汪梦甫, 周锡元. 高层建筑结构抗震弹塑性分析方法及抗震性能评估的研究 [J]. 土木工程学报, 2003, 36(11): 44-49.
- WANG Meng-fu, ZHOU Xi-yuan. Modified Pushover Analysis and Seismic Performance Evaluation for Tall Building [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(11): 44-49.
- [18] GB 50010—2002, 混凝土结构设计规范 [S].
- GB 50010—2002, Code for Design of Concrete Structures [S].
- [19] 廖洪军, 盛光敏, 龚士弘, 等. HRB400 III 钢筋抗震性能研究 [J]. 钢铁钒钛, 2005, 26(4): 12-16.
- LIAO Hong-jun, SHENG Guang-min, GONG Shi-hong, et al. Investigation on Anti-seismic Properties of HRB400 Reinforced Steel Bar [J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2005, 26(4): 12-16.
- [20] 刘良林, 王全凤, 沈章春. HRB400 级钢筋混凝土柱的滞回性能研究 [J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2008, 29(2): 280-283.
- LIU Liang-lin, WANG Quan-feng, SHEN Zhang-chun. Research on the Hysteretic Characters of HRB400 Grade Reinforced Concrete Columns [J]. Journal of Huaqiao University: Natural Science, 2008, 29(2): 280-283.