

文章编号: 1000-4750(2014)07-0112-07

考虑加载路径影响的改进 Park-Ang 损伤模型

罗文文¹, 李英民^{1,2}, 韩 军^{1,2}

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘 要: 合理准确地评价结构和构件在地震作用下的损伤程度是地震工程研究领域中的重要课题。Park-Ang 损伤模型具有良好的试验基础, 近似考虑了首次超越和塑性累积损伤综合作用的破坏机理, 在地震工程研究领域应用广泛。该文针对 Park-Ang 损伤模型不能考虑加载路径的影响、单调加载时损伤指标大于 1 等问题, 根据低周疲劳理论和 Miner 准则, 结合国内外相关试验结果, 提出了能考虑加载路径影响的改进模型。利用 Kunnath 完成的尺寸和配筋构造完全相同仅加载路径不同的系列试验的结果对改进模型进行了验证。结果表明, 改进模型能比较准确地评价加载位移幅值较小时试件产生的低周疲劳损伤破坏, 且对于不同的加载路径, 改进模型减小了构件破坏时损伤指标的离散性, 提高了损伤评估的准确性。

关键词: 钢筋混凝土; 地震损伤模型; 损伤指标; 滞回耗能; 低周疲劳; 加载路径

中图分类号: TU375.3 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.01.0070

A MODIFIED PARK-ANG SEISMIC DAMAGE MODEL CONSIDERING THE LOAD PATH EFFECTS

LUO Wen-wen¹, LI Ying-min^{1,2}, HAN Jun^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Key Laboratory of New Technique for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing 400045, China)

Abstract: Reasonably evaluating the damage of structures and components under earthquake action is an important subject in earthquake engineering research field. Because of the good experimental foundation as well as approximately considering the comprehensive function of first passage and cumulative damage effect, the Park-Ang seismic damage model has been widely used since it was proposed. However, it cannot consider the load path effects and the damage index will become greater than unity under monotonic loading. After analyzing the experimental results published previously, a modified model is proposed based on low-cycle fatigue theory and Miner's rule. Then the modified model is verified by the experimental results of Kunnath. The results show that the modified model can accurately evaluate the low-cycle fatigue damage under small displacement loading. Furthermore, it also can improve the accuracy of damage evaluation, as it reduced the coefficient of variation of the damage index when the failure is caused by different load paths.

Key words: reinforced concrete; seismic damage model; damage index; hysteretic energy; low-cycle fatigue; load path

合理评价建筑结构在地震作用下的损伤程度是评价结构抗震性能和实现基于性能的抗震设计的重要组成部分^[1]。目前, 国内外对破坏机理比较

一致的看法是, 结构最大反应与累积损伤的破坏界限相互影响, 随着结构累积损伤的增加, 结构最大反应破坏的控制界限不断降低; 同样, 随着结构最

收稿日期: 2013-01-22; 修改日期: 2013-05-29

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20100191110028); 国家自然科学基金项目(51108486); 重庆市自然科学基金项目(cstcjjA3006)

通讯作者: 李英民(1968—), 男, 山东无棣人, 教授, 博士, 主要从事地震工程、结构抗震研究和城市防灾减灾研究(E-mail: liyingmin@cqu.edu.cn)。

作者简介: 罗文文(1987—), 男, 四川绵阳人, 博士生, 主要从事钢筋混凝土结构抗震研究(E-mail: m.luowenwen@gmail.com);

韩 军(1978—), 男, 安徽巢湖人, 副教授, 博士, 主要从事工程结构抗震、结构非线性动力反应分析研究(E-mail: hanjun@cqu.edu.cn)。

大反应的增加, 结构累积损伤破坏的控制界限也在不断降低。Park-Ang 损伤模型是最大变形反应与累积滞回耗能的线性组合^[2], 一定程度上能反映上述破坏机理, 自提出以来得到了广泛的应用。然而, Park-Ang 损伤模型也存在一些不足之处: 1) 单调加载破坏时, 损伤指标大于 1; 2) 弹性阶段损伤指标不等于 0; 3) 不能反映构件极限滞回耗能随累积位移幅值的变化, 认为构件极限滞回耗能仅与最大位移幅值相关, 而与加载路径无关。

针对 Park-Ang 损伤模型中存在的问题, 许多学者提出了相应的修正模型。Kunnath 等^[3]将弹性变形从位移项中减去, 以修正 Park-Ang 损伤模型在弹性阶段损伤指标不等于 0 的缺陷。Chai 等^[4]认为超出单调加载时耗散能量的部分才会对构件造成损伤。陈林之等^[5]修正了单调加载破坏时 Park-Ang 损伤模型损伤指标不等于 1 的缺陷, 并根据美国太平洋地震工程研究中心 (Pacific Earthquake Engineering Research Center) 数据库中的部分试验结果和自己完成的试验结果对改进模型中的能量项加权系数 b_{PA} 进行回归分析, 建议对受弯为主, 横向约束良好的矩形钢筋混凝土试件 b_{PA} 取 0.1。牛荻涛等^[6]提出了变形与耗能非线性组合方式的改进双参数地震破坏模型, 根据实际钢筋混凝土框架结构的弹塑性分析结果和损伤评价分析确定了模型的参数, 并指出该模型也可适用于钢结构、砖石结构, 只是模型中参数需重新确定。王东升等^[7]引入一个能量项加权因子, 以改进 Park-Ang 损伤模型在中小位移幅值循环荷载作用下低估构件极限滞回耗能这一缺陷。然而该改进模型采用固定的临界位移延性系数, 对剪跨比较大的构件(剪跨比大于 8)不尽合理^[8], 且未能彻底解决加载路径对结构损伤的影响。傅剑平等^[9]在 Park-Ang 损伤模型的位移项和能量项前面各加了一个指数形式的调节项, 并根据延性系数 $m=3\sim 7.5$ 的 40 个柱类构件的分析结果, 提出了位移项与能量项非线性组合的改进模型。付国等^[10]根据有效滞回耗能的概念, 采用有效耗能因子修正 Park-Ang 损伤模型的能量项以反映不同位移幅值加载下结构破坏的差异, 但认为构件的极限滞回耗能只与位移幅值和单调加载时的极限位移相关的观点需深入研究。上述修正大多针对 Park-Ang 损伤模型上下界不收敛的问题和位移项与能量项组合方式的问题, 并未能较好的考虑加载路径对损伤的影响。

1 Park-Ang 损伤模型分析

1.1 Park-Ang 损伤模型

Park 和 Ang 基于一大批美国和日本的钢筋混凝土梁和柱的破坏试验资料, 提出了最大变形反应与累积滞回耗能的线性组合来表达构件的损伤程度^[2], 如下式所示。

$$D_{PA} = \frac{d_m}{d_u} + b_{PA} \frac{\int dE}{F_y d_u} \quad (1)$$

其中: D_{PA} 为 Park-Ang 损伤指标; d_m 为地震作用下构件的最大变形; d_u 为单调加载时的极限变形; F_y 为屈服强度; $\int dE$ 为累积滞回耗能; b_{PA} 为能量项加权系数。 D_{PA} 越大表示损伤越严重, 当 $D_{PA} \geq 1$ 时表示构件完全破坏。

Park 和 Ang 给出了 b_{PA} 的经验公式^[2], 如下式所示。

$$b_{PA} = \left(-0.447 + 0.073 \frac{l}{d} + 0.24n_0 + 0.314p_t \right) 0.7^{r_w} \quad (2)$$

其中: l/d 为构件剪跨比($l/d < 1.7$ 时, 取 1.7); n_0 为轴压比($n_0 < 0.2$ 时, 取 0.2); p_t 为纵筋配筋率百分数($p_t < 0.75\%$ 时, 取 0.75%); r_w 为体积配箍率。 b_{PA} 只与构件配筋构造、剪跨比、试验轴压比相关, 对于相同的试件, b_{PA} 取定值。同时文献[11]建议构造良好的构件 b_{PA} 可取 0.05。

令式(1)中 $D_{PA} = 1$ 可得到由 Park-Ang 损伤模型确定的构件极限滞回耗能 $E_{U,PA}$, 用 $F_y d_u$ 将其规格化则如下式所示。

$$\frac{E_{U,PA}}{F_y d_u} = \frac{1}{b_{PA}} \left(1 - \frac{d_m}{d_u} \right) \quad (3)$$

因而 Park-Ang 损伤模型可以改写为下式所示的形式。

$$D_{PA} = D_M + D_{E,PA} = D_M + (1 - D_M) D_e \quad (4)$$

其中: 位移项 $D_M = d_m / d_u$; 能量项 $D_{E,PA} = (1 - D_M) D_e$; $D_e = \int dE / E_{U,PA}$, 表示滞回耗能造成的损伤。

为使构件破坏时损伤指标 $D_{PA} = 1$, 该模型中的第二项(即能量项)只应占 $(1 - D_M)$, 即意味着 D_e 应等于 1。因此, 只有准确的估计构件的极限滞回耗能 $E_{U,PA}$, 才能准确地评价构件的损伤。

1.2 极限滞回耗能分析

由式(3)可知, 由 Park-Ang 损伤模型确定的规

格化构件滞回耗能仅与最大位移幅值呈线性递减关系,而与加载路径无关。若取 $b_{PA} = 0.05$ 可得到构造良好的钢筋混凝土构件的规格化极限滞回耗能与最大位移幅值的关系。该关系与刘伯权完成的 6 根 1/2 缩尺钢筋混凝土柱在不同位移幅值下的等幅值低周疲劳试验结果^[12]的对比如图 1 所示。

由图 1 知,刘伯权试验中的等幅值加载试件的极限滞回耗能表现出随位移幅值增大迅速减小的关系:当位移幅值较小时构件极限滞回耗能非常大,随着位移幅值的增大迅速降低;当位移幅值较大时试件极限滞回耗能的降低趋势趋于平缓。而 Park-Ang 损伤模型却是线性递减的关系, Park-Ang 损伤模型通常会低估位移幅值较小时构件的极限滞回耗能,高估位移幅值较大时构件的极限滞回耗能。

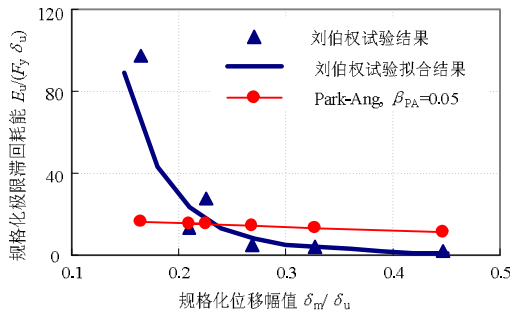


图 1 等幅值加载时构件规格化极限滞回耗能与位移幅值的关系

Fig.1 Relationship between normalized ultimate hysteretic dissipation energy and displacement amplitude at constant amplitude loading

在实际地震作用下结构或构件在较大位移幅值处的振动次数较少,在中小幅值处振动次数较多,中小幅值振动耗散的能量在总耗散的能量中所占的比例是不可忽略的。然而,构件的塑性累积损伤与滞回耗能并不具有完全的对对应关系^[13-14],加载路径对构件极限滞回耗能影响较大。因此,若不能准确地确定构件极限滞回耗能与位移幅值之间的关系,必定会给损伤评价带来一定的误差。Park-Ang 损伤模型就未能准确反映加载路径的影响。

2 考虑加载路径影响的改进 Park-Ang 损伤模型

2.1 考虑低周疲劳效应的构件极限滞回耗能

Jeong 和 Iwan 于 1988 年针对钢筋混凝土柱构件提出了一个和著名的 Coffin-Manson 准则类似的关系式^[15],如式(5)所示,通过试验标定后,建议常

数 s 、 c 分别取 6 和 416。

$$N_{f,a} \cdot m_a^s = c \quad (5)$$

式中: m_a 为延性系数,即最大位移 d_a 与屈服位移 d_y 之比; $N_{f,a}$ 为该位移幅值对应的疲劳寿命。然而不同的配筋构造、剪跨比和轴压比等条件对钢筋混凝土构件的疲劳寿命影响很大。Kunnath 根据位移幅值在 $0.35d_u \sim 0.61d_u$ 之间的低周疲劳试验结果建议 s 取 3.5^[16],刘伯权根据位移幅值在 $0.11d_u \sim 0.45d_u$ 之间的低周疲劳试验结果建议 s 取 6.16^[12]。参数 s 越大,构件的疲劳寿命随位移幅值的增大衰减得越快。

根据式(5)的形式,构件疲劳寿命 $N_{f,a}$ 与等幅值加载位移幅值 d_a 的关系可表示为下式的形式。

$$N_{f,a} = h(d_a / d_u)^{-s} \quad (6)$$

其中, $h = c(d_u / d_y)^{-s}$ 为与构件剪跨比、轴压比、配筋构造等相关的非负常数,其余参数同前。

另外, Park 等的研究表明:构件的平均单周滞回耗能 E_1 与构件位移延性系数线性相关^[2]。本文假定构件的平均单周滞回耗能 E_1 可表示为下式的形式。

$$\frac{E_1}{F_y d_u} = a \frac{d_a}{d_u} \quad (7)$$

其中, a 为与构件剪跨比、轴压比、配筋构造等相关的非负常数,其余参数同前。

将式(6)与式(7)相乘,即得到等幅值加载位移 d_a 对应的构件规格化极限滞回耗能 $E_{U,a} / (F_y d_u)$,如下式所示。

$$\frac{E_{U,a}}{F_y d_u} = (1/b)(d_a / d_u)^{-g} \quad (8)$$

其中, $b = 1/(ah)$ 、 $g = s - 1$,是与构件剪跨比、轴压比、配筋构造等相关的常数。

2.2 改进 Park-Ang 损伤模型

根据以上讨论,考虑低周疲劳效应时,构件规格化极限滞回耗能如式(8)所示。对于等幅值加载试件,按照 Park-Ang 的形式滞回耗能造成的损伤可表示为下式的形式。

$$D_e = \int dE / E_{U,a} \quad (9)$$

采用 Miner 准则考虑不同位移幅值作用下损伤的线性累积,变位移幅值加载试件的滞回耗能造成的损伤 D_e 可进一步表示为下式的形式。

$$D_e = \sum_i (E_i / E_{U,i}) \quad (10)$$

式中: E_i 为第 i 圈的滞回耗能; $E_{u,i}$ 为第 i 圈的位移幅值对应的等幅值加载时的极限滞回耗能。

将式(8)代入式(10), 并考虑加载顺序(假定构件极限滞回耗能由构件曾经经历的最大位移确定)及不对称加载的影响, D_e 可表示为:

$$D_e = \frac{b \sum_i (d_{m,i}^\pm / d_u)^g E_i}{F_y d_u} \quad (11)$$

式中: $d_{m,i}^\pm$ 为第 i 个滞回半圈及以前经历过的相应正负方向的最大位移幅值; E_i 为第 i 个半圈的滞回耗能。此处一个半圈定义为承载力由零经正向(或负向)加载及卸载后回到 0, $d_{m,i}^\pm$ 及 E_i 的计算方法如图 2 所示。

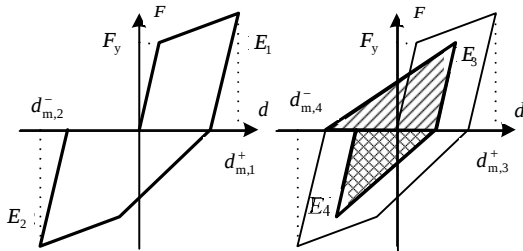


图 2 $d_{m,i}^\pm$ 及 E_i 的计算方法示意图

Fig.2 Calculation method schematic diagram of $d_{m,i}^\pm$ and E_i

将式(11)代入式(4), 即在 Park-Ang 损伤模型的基础上得到了能考虑加载路径影响的改进模型, 如下式所示。

$$D = \frac{d_m}{d_u} + \left(1 - \frac{d_m}{d_u}\right) \frac{b \sum_i (d_{m,i}^\pm / d_u)^g E_i}{F_y d_u} \quad (12)$$

其中, $\sum_i (d_{m,i}^\pm / d_u)^g E_i$ 的概念与文献[14]提出的有效累积滞回耗能类似。与之不同的是, 此处的 $d_{m,i}^\pm$ 可考虑加载顺序和不对称加载的影响。考虑到 g 值较大时, 构件的滞回耗能能力随位移幅值的增大衰减较快, 文献[14]建议, 对于一般构件 g 可取 2(即式(5)中 s 取 3)。

单调加载破坏时, 该改进模型得到的损伤指标恒等于 1。位移幅值较小时, 能量项所占的比重较大; 位移幅值较大时, 位移项所占的比重较大。与原模型相比, 改进模型更能直观的反映结构最大反应与累积损伤的破坏界限相互影响的破坏机理。

3 改进 Park-Ang 损伤模型试验验证分析

下面利用 Kunnath 1997 年完成的尺寸和配筋构

造均完全相同仅加载方式不同的 11 根 1/4 比例的圆形截面钢筋混凝土桥墩(A2~A12)的试验结果^[16], 对提出的改进 Park-Ang 损伤模型进行验证。

试件为钢筋混凝土悬臂柱, 如图 3 所示。圆形截面, 直径为 305mm, 加载点至地梁顶面距离为 1372mm, 剪跨比约为 4.5, 混凝土圆柱体抗压强度约为 31MPa, 纵筋直径为 9.5mm, 屈服强度 470MPa, 全部纵筋面积为 1489mm², 采用螺旋式箍筋, 直径为 4mm, 屈服强度为 408MPa, 体积配箍率为 0.94%, 轴压比约为 0.1。

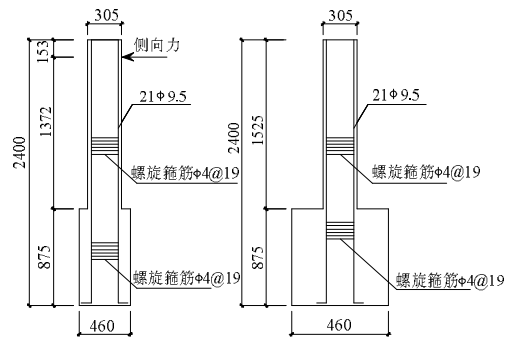


图 3 试件尺寸与配筋构造 /mm

Fig.3 Specimen size and reinforcement detailing

各试件的加载方式均不相同, A2~A12 试件加载制度如表 1 所示。

表 1 加载制度与位移幅值

Table 1 Load pattern and displacement amplitude

加载方式	试件编号	位移幅值(位移角/(%))
增幅加载	A2	1~1.5~2~2.5~3~4~5~6 (每圈循环三次)
	A3	2
	A4	4
等幅值加载	A5	5.5
	A6	7
随机地震作用加载	A7	5.9
	A8	5.9
	A9	6.6(-5.6)
	A10	6.6(-5.6)
	A11	4.2(-7.5)
	A12	4.2(-7.5)

注: A3 试件在 150 圈等幅值加载结束后未发生破坏, 最终在单调加载时发生破坏。

3.1 构件滞回耗能造成的累积损伤分析

根据试验现象的描述^[16], 到各试件破坏为止(箍筋被拉断或纵筋被拉断)的累积滞回耗能如图 4 所示。对于等幅值加载试件 A3~A6, 累积滞回耗能随着位移幅值的增大逐渐减小。对于随机地震作用加载的试件 A7~A12, 位移幅值较小的试件 A7、A8 反而比位移幅值较大的试件 A9~A12 的累积滞回耗

能小。同时再次说明了构件的塑性累积损伤与滞回耗能并不具有完全的对应关系,加载路径对构件的累积滞回耗能影响较大。

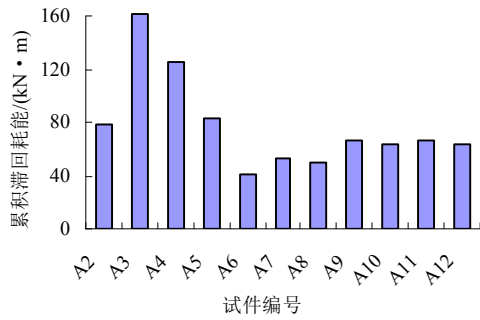


图4 累积滞回耗能

Fig.4 Cumulative hysteretic dissipation energy

试件破坏时,令 $D_{PA}=1$ 和 $D=1$, 反算出各试件 Park-Ang 损伤模型的参数 β_{PA} 和改进模型的参数 β , 如表 2 所示。所有试件的平均值分别为 $\beta_{PA}=0.07$, $\beta=0.76$ 。

Park-Ang 损伤模型与改进模型位移项是相同的,差别仅在于能量项。根据以上讨论, Park-Ang 损伤模型和改进模型的能量项可分别表示为式(13)和式(14)。分别代入 $\beta_{PA}=0.07$, $\beta=0.76$ 即可得到两个损伤模型的能量项。图 5 给出了试件 A2~A6 能量项随加载半周数的变化情况;图 6 给出了试件 A7~A12 顶部位移和能量项随加载半周数的变化情况。

$$D_{E,PA} = \beta_{PA} \frac{\int dE}{F_y \delta_u} \quad (13)$$

$$D_E = \left(1 - \frac{\delta_m}{\delta_u}\right) \frac{\beta \sum_i (\delta_{m,i}^{\pm} / \delta_u)^{\gamma} E_i}{F_y \delta_u} \quad (14)$$

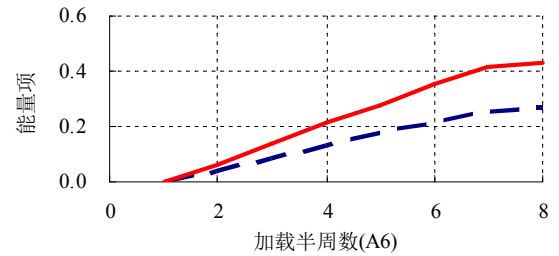
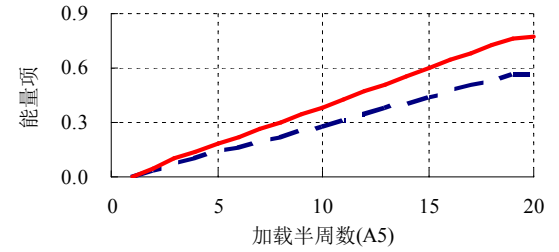
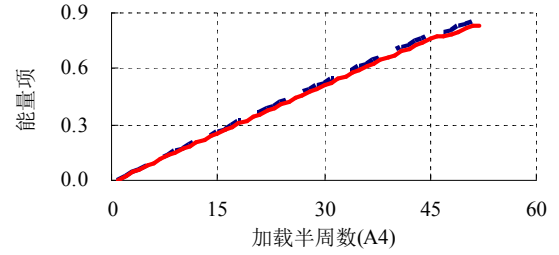
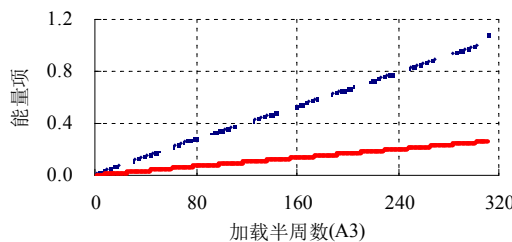
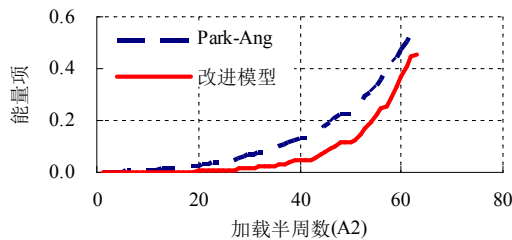
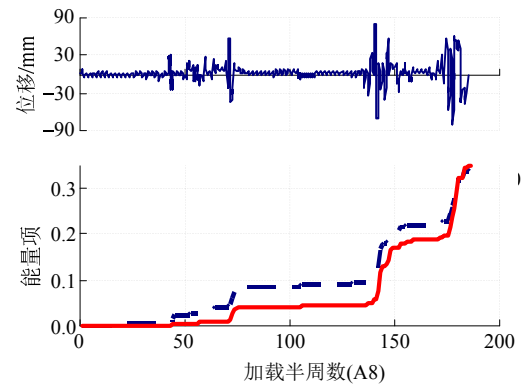
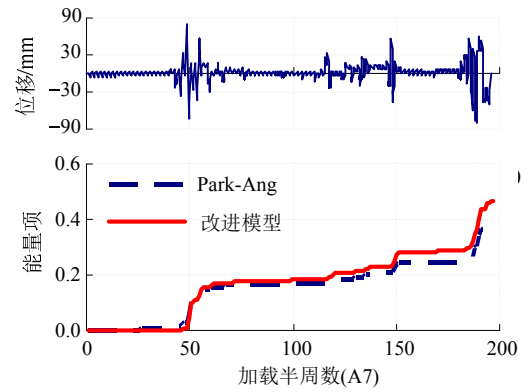


图5 A2~A6 能量项

Fig.5 A2~A6 specimens energy item



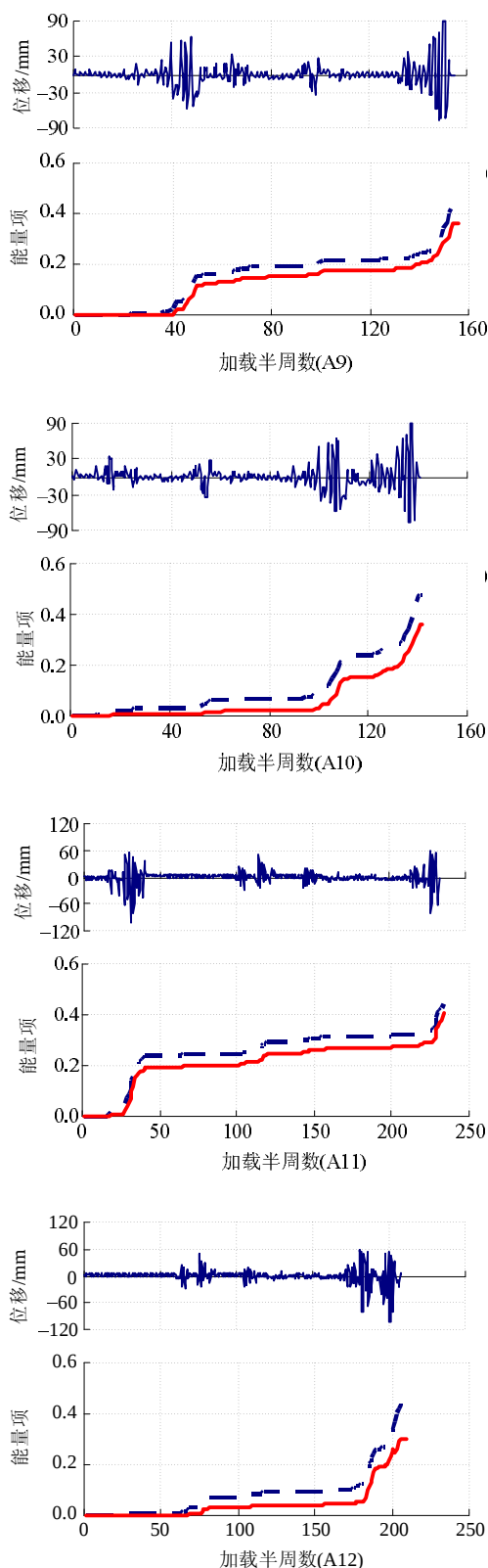


图6 A7~A12 试件顶点位移与能量项

Fig.6 A7~A12 specimens displacement and energy item

对于 A2 试件, 随着位移幅值的增加, 改进模型中能量项比 Park-Ang 损伤模型中能量项增加得更快, 损伤累积得更快。

对于 A3~A6 试件, 当位移幅值较小时, Park-Ang 损伤模型能量项比改进模型的大; 当位移幅值较大时, Park-Ang 损伤模型能量项比改进模型的小。由此可见, 与改进模型相比, Park-Ang 损伤模型通常高估了位移幅值较小时滞回耗能产生的损伤, 同时低估了位移幅值较大时滞回耗能产生的损伤。Park-Ang 损伤模型对损伤评价通常是“平均综合”的结果。

随机地震作用加载时, 施加在各试件上的地震作用均可视为由“小震作用”事件、“中震作用”事件、“大震作用”事件组成。

首先经历“大震作用”的 A7 试件, 两个损伤模型中能量项差异较小, 当试件再次经历“中震作用”时两个模型的能量项才出现差异。

对于先经历“小震作用”或“中震作用”, 后经历“大震作用”的试件 A8~A10, A12, Park-Ang 损伤模型的能量项均比改进模型的能量项大。(Park-Ang 损伤模型低估了位移幅值较小时的极限滞回耗能, 高估了位移幅值较大时的极限滞回耗能)。

试件 A11 与试件 A7 经历的地震作用事件顺序类似, 但试件 A11 在首次经历“大震作用”时出现了明显的不对称振动。根据刘伯权的试验结果, 构件在经历不对称加载作用下, 破坏时的累积滞回耗能比相同幅值对称加载作用下的大^[12]。Park-Ang 损伤模型的能量项比改进模型的能量项大, 高估了滞回耗能产生的损伤。

3.2 构件破坏时损伤指标分析

将 3.1 节中得到的 $b_{PA} = 0.07$ 和 $b = 0.76$, 代入式(1)和式(12)中, 即可得到各试件的损伤指标 D_{PA} 和 D , 如表 2 所示。

由表 2 可知, 在上述的几种加载方式作用下改进模型得到的损伤指标的变异系数为 Park-Ang 损伤模型的 39%, 显著地提高了评估的准确性。

然而, 实际地震作用并非增幅加载或等幅值加载, 而是更加接近随机地震作用加载的情况。对于随机地震作用加载, 改进模型得到的损伤指标的变异系数是 Park-Ang 损伤模型的 68%, 同样提高了损伤评估的准确性。

施加在 A3 试件上的位移幅值较小(位移角为 2%), 在 150 圈等幅值加载作用后, 试件的保护层混凝土显著剥离, 但并未发生破坏, 试件最终在单调荷载作用下破坏。将 $b_{PA} = 0.07$ 和 $b = 0.76$ 代入相应的损伤模型即得到 A3 的损伤指标, 如图 7 所

示。改进模型能较好考虑加载位移幅值较小时低周疲劳损伤效应，准确地评价构件的损伤程度。

表 2 各试件 β_{PA} , D_{PA} 和 β , D 的对比分析
Table 2 The comparison between the β_{PA} , D_{PA} and β , D

试件编号	Park-Ang 损伤模型		改进 Park-Ang 损伤模型	
	β_{PA}	D_{PA}	β	D
A2	0.06	1.03	0.84	0.95
A3	—	2.11	—	1.00
A4	0.05	1.24	0.57	1.21
A5	0.06	1.06	0.50	1.26
A6	0.10	0.88	0.67	1.05
A7	0.08	0.91	0.77	0.99
A8	0.10	0.86	1.04	0.87
A9	0.06	1.03	0.87	0.95
A10	0.06	1.06	0.87	0.95
A11	0.05	1.11	0.63	1.07
A12	0.05	1.10	0.85	0.96
均值(全部)	0.07	1.13	0.76	1.02
变异系数(全部)	—	0.31	—	0.12
均值(除去 A3)	—	1.03	—	1.03
变异系数(除去 A3)	—	0.11	—	0.12
均值(A7~A12)	—	1.01	—	0.96
变异系数(A7~A12)	—	0.10	—	0.068

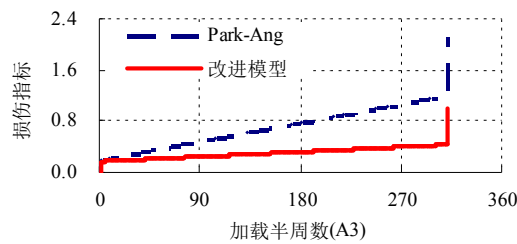


图 7 A3 试件损伤指标

Fig.7 A3 specimen damage index

当不考虑 A3 试件时，对于增幅加载、等幅值加载及随机地震作用加载，改进模型得到的损伤指标的变异系数与 Park-Ang 损伤模型的近似相同。

4 结论

(1) 根据刘伯权试验结果分析可知，构件的规格化极限滞回耗能随位移幅值的增加迅速减小，而非 Park-Ang 损伤模型中的线性递减关系。Park-Ang 损伤模型通常会低估位移幅值较小时构件的极限滞回耗能，高估位移较大时的极限滞回耗能。Park-Ang 损伤模型对损伤评价通常是“平均综合”的结果。

(2) 根据低周疲劳理论分析得到了等幅值加载时构件极限滞回耗能与位移幅值之间的关系式。利用 Miner 准则考虑变幅值加载时不同幅值对损伤的

影响，同时考虑了加载顺序及不对称加载的影响，在 Park-Ang 损伤模型的基础上提出了能考虑加载路径影响的改进模型。该改进模型更能反映最大反应与累积损伤的破坏界限相互影响的破坏机理。且单调加载破坏时，改进模型得到的损伤指标收敛于 1。

(3) 利用 Kunnath 完成的尺寸和配筋构造均完全相同仅加载方式不同的系列试验的结果对改进模型进行了验证。结果表明，构件破坏时，对于不同的加载路径(增幅加载、等幅值加载、随机地震作用加载)，改进模型得出的损伤指标的变异系数为 Park-Ang 损伤模型的 39%左右；对于随机地震作用加载，改进模型得出的损伤指标的变异系数是原模型的 68%，提高了损评估的准确性。且改进模型能准确评价加载位移幅值较小时，试件产生的低周疲劳损伤破坏。

本文的研究目的是通过考虑加载路径的影响提高损伤评价的准确性。但改进模型中不同截面及配筋构造的构件参数 β 的确定和损伤等级的划分还需继续通过大量试验数据的统计分析完成。

参考文献:

[1] 李英民, 罗文文, 韩军. 钢筋混凝土框架结构强震破坏模式的控制[J]. 土木工程学报, 2013, 46(5): 85—92.
Li Yingmin, Luo Wenwen, Han Jun. Control of failure mechanism for RC frame structure under strong earthquakes [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(5): 85—92. (in Chinese)

[2] Park Y, Ang A H S. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE. 1985, 111(4): 722—739.

[3] Kunnath S K, Reinhorn A M, Lobo R F. IDARC version 3.0: a program for the inelastic damage analysis of reinforced concrete structures [R]. Buffalo: National Center for Earthquake Engineering Research, 1994.

[4] Chai Y H, Romstad K M, Bird S M. Energy-Based linear damage model for high-intensity seismic loading [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1995, 121(5): 857—864.

[5] 陈林之, 蒋欢军, 吕西林, 等. 修正的钢筋混凝土结构 Park-Ang 损伤模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(8): 1103—1107.
Chen Linzhi, Jiang Huanjun, Lü Xilin, et al. Modified Park-Ang damage model for reinforced concrete structures [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(8): 1103—1107. (in Chinese)

(参考文献[6]—[16]转第 128 页)

- anchorage zone enhancement with fiber-reinforced concrete [J]. *Journal of Bridge Engineering ASCE*, 2006, 11(5): 566—572.
- [10] Johnson S. Analytical modeling of fiber reinforced post-tensioned concrete anchorage zones [D]. Tallahassee, FL, USA: The Florida State University, 1996: 1—97.
- [11] 王勇华, 梁小燕, 王正道, 等. 活性粉末混凝土冲击压缩性能实验研究[J]. *工程力学*, 2008, 25(11): 167—172.
- Wang Yonghua, Liang Xiaoyan, Wang Zhengdao, et al. Experimental study on the impact compressive behavior of reactive powder concrete [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(11): 167—172. (in Chinese)
- [12] 张多新, 屈文俊, 王清云. RPC200 塑性与各向异性损伤耦合本构建模研究[J]. *工程力学*, 2012, 30(5): 243—248.
- Zhang Duoxin, Qu Wenjun, Wang Qingyun. Study on the coupling of anisotropic damage and plasticity constitutive modeling for RPC200 [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 30(5): 243—248. (in Chinese)
- [13] 杜任远, 陈宝春. 活性粉末混凝土拱极限承载力试验研究[J]. *工程力学*, 2012, 30(5): 42—48.
- Du Renyuan, Chen Baochun. Experimental research on the ultimate load capacity of reactive powder concrete arches [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 30(5): 42—48. (in Chinese)

(上接第 118 页)

- [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]. *地震工程与工程振动*, 1996, 16(4): 44—54.
- Niu Ditao, Ren Lijie. A modified seismic damage model with double variables for reinforced concrete structures [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1996, 16(4): 44—54. (in Chinese)
- [7] 王东升, 冯启民, 王国新. 考虑低周疲劳寿命的改进 Park-Ang 地震损伤模型[J]. *土木工程学报*, 2004, 37(11): 41—49.
- Wang Dongsheng, Feng Qimin, Wang Guoxin. A modified Park-Ang seismic damage model considering low-cycle fatigue life [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2004, 37(11): 41—49. (in Chinese)
- [8] 王宏业. Park-Ang 双参数地震损伤模型的试验统计分析 & 改进[D]. 大连: 大连海事大学, 2008.
- Wang Hongye. Statistical analysis and improvement of Park-Ang seismic damage model [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2008. (in Chinese)
- [9] 傅剑平, 王敏, 白绍良. 对用于钢筋混凝土结构的 Park-Ang 双参数破坏准则的识别和修正[J]. *地震工程与工程振动*, 2005, 25(5): 75—81.
- Fu Jianping, Wang Min, Bai Shaoliang. Identification and modification of the Park-Ang criterion for failure of RC structures [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2005, 25(5): 75—81. (in Chinese)
- [10] 付国, 刘伯权, 邢国华. 基于有效耗能的改进 Park-Ang 双参数损伤模型计算研究[J]. *工程力学*, 2013, 30(8): 84—90.
- Fu Guo, Liu Boquan, Xing Guohua. The research and calculation on modified park-Ang double parameter seismic damage model based on energy dissipation [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(8): 84—90. (in Chinese)
- [11] CEB. Seismic design of reinforced concrete structures for controlled inelastic response (Design Concepts) [R]. Lausanne, Switzerland: CEB, 1998.
- [12] 刘伯权. 钢筋混凝土抗震结构的破坏准则及可靠性分析[D]. 重庆: 重庆建筑大学, 1994.
- Liu Boquan. Criteria for reinforced concrete seismic structural damage and reliability analysis [D]. Chongqing: Chongqing Jianzhu University, 1994. (in Chinese)
- [13] 白绍良, 黄宗明, 肖明葵. 结构抗震设计的能量分析方法研究述评[J]. *建筑结构*, 1997(4): 54—58.
- Bai Shaoliang, Huang Zongming, Xiao Mingkui. Review of energy analysis method for structural seismic design [J]. *Building Structure*, 1997(4): 54—58. (in Chinese)
- [14] 曲哲, 叶列平. 基于有效累积滞回耗能的钢筋混凝土构件承载力退化模型[J]. *工程力学*, 2011, 28(6): 45—51.
- Qu Zhe, Ye Lieping. Strength deterioration model based on effective hysteretic energy dissipation for RC members under cyclic loading [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(6): 45—51. (in Chinese)
- [15] Jeong G D, Iwan W D. The effect of earthquake duration on the damage of structures [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1988, 16(8): 1201—1211.
- [16] Kunnath S K, El-Bahy A, Taylor A W, et al. Cumulative seismic damage of reinforced concrete bridge piers [R]. Buffalo: State University of New York, 1997.