

火灾后混凝土短柱的滞回性能和损伤评定

林燕卿, 徐玉野, 杨清文, 罗漪

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 基于 7 根明火加热后钢筋混凝土短柱和 1 根未受火的对比试件的拟静力试验结果, 分析受火时间、轴压比和剪跨比对火灾后钢筋混凝土短柱滞回性能的影响情况. 结合强度退化分析各试件的损伤发展过程, 采用 Park 损伤模型对受火后短柱和未受火的对比试件的抗震性能进行损伤评定, 提出一种能反映火灾高温对柱式构件抗震性能损伤影响加大的评价指标. 研究表明: 火灾后钢筋混凝土短柱在低周往复荷载作用下的滞回曲线和滞回规则与未受火对比件的相似, 但受火后滞回环的稳定性较未受火的差; 钢筋混凝土短柱的累积滞回耗能随着受火时间的增加, 轴压比的减小, 以及剪跨比的减小而减小; 同一位移角下的强度退化随着受火时间的增加, 轴压比的增大, 以及剪跨比的增大而加快. 此外, Park 损伤评价模型对受火前后钢筋混凝土短柱的抗震性能损伤指数均存在超前估计的不足.

关键词: 钢筋混凝土; 短柱; 火灾; 滞回耗能; 强度退化; 损伤评价

中图分类号: TU 375.3

文献标志码: A

钢筋混凝土柱式构件在遭受火灾作用后, 由于其组成材料混凝土和钢筋的力学性能及二者之间的粘结性能降低^[1-2], 会导致火灾后抗震性能劣化. 低周反复荷载作用下, 柱式构件的滞回性能是评价其抗震性能优劣的一项重要指标^[3]. Park 和 Ang 提出的改进双参数模型既能较好考虑变形和能量耗散的影响, 又能得到一个定量的损伤指标, 因而得到地震工程界的广泛认可^[4-5]. 张家广等^[6]进行了高温下有初始应力的钢筋混凝土圆柱在火灾全过程后的滞回性能试验研究, 试件的破坏模式为保护层大面积脱落, 纵筋屈服. 曾跃飞等^[7]以受火前后混凝土构件承载力(如轴压承载力、抗弯承载力等)的降低率作为损伤指标进行数值分析和评估. 吴波等^[8]提出了一种以受火前后力-变形关系曲线的初始刚度的降低率作为火灾后结构(构件)损伤的定义指标, 并以此为基础给出火灾后钢筋混凝土构件、结构层及结构整体的损伤计算方法. 吴波等^[9]进行了 3 根火灾后钢筋混凝土柱在低周反复荷载下性能的试验研究, 分析了高温对钢筋混凝土柱强度、刚度、延性和滞回性能等的影响. 目前, 尚未见到有对火灾后呈剪切型破坏特征的钢筋混凝土短柱的滞回性能和损伤评价的研究报道. 本文研究火灾后钢筋混凝土短柱的滞回性能变化, 并提出一种能反映火灾高温对柱式构件抗震性能损伤影响加大的评价指标.

1 试验概况^[10]

设计制作 8 根倒 T 形钢筋混凝土短柱, 柱截面尺寸为 300 mm×300 mm, 混凝土保护层厚度 30 mm, 拟静力试验时混凝土的立方体抗压强度 f_{cu} 为 41.4 MPa. 纵筋采用 HRB 400 级钢筋, 对称配筋, 每侧配置 3C20, 箍筋采用 HPB 235 级钢筋, A8@100. 纵筋的屈服强度和极限强度分别为 439.3, 575.0 MPa, 箍筋的屈服强度和极限强度分别为 389.5, 525.0 MPa.

试件采用自拌混凝土, 于 2010 年 9 月在华侨大学的结构试验室现场制作, 浇注完成后浇水养护 7 d, 自然养护 8 个月, 然后在东南大学九龙湖校区的结构耐火实验室进行明火加热试验, 其升温曲线为

收稿日期: 2012-12-27

通信作者: 徐玉野(1978-), 男, 副教授, 主要从事结构抗火研究. E-mail: yuyexu@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50908091); 福建省自然科学基金资助项目(2012J01221); 福建省泉州市技术研究与开发重点项目(2011Z10, 2011Z12); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(JB-SJ1011)

ISO 834 标准升温曲线,当明火加热试件达到预定受火时间后熄火,自然冷却.明火加热试验后,将试件运回华侨大学,于 2011 年 9 月利用华侨大学的 MTS 电液伺服程控结构试验机进行拟静力试验.加载制度采用位移控制,位移角为 1/500,1/400,1/300,1/200,1/150,1/125 rad 时,每级位移角下反复加载循环一次,在位移角为 1/100,1/75,1/50,1/35,1/25 rad 时,每级位移角下反复加载循环三次.

火灾后钢筋混凝土短柱在低周往复加载作用下的裂缝发展情况及破坏形态与常温下短柱相似,各试件基本上形成较为明显的 X 形裂缝,临近破坏时,两条主斜裂缝交汇处混凝土脱落,承载力急剧下降,均发生明显的剪切型脆性破坏.

各试件的主要试验结果,如表 1 所示.表 1 中: t 为受明火作用的时间; n 为轴压比, $n=N/(f_c A)$,混凝土轴心抗压强度 f_c 取 $0.67f_{cu}$, A 为柱横截面面积, N 为轴向压力; λ 为剪跨比; V_y 和 Δ_y 分别为屈服荷载和屈服位移,采用能量等值法计算^[11]; V_c 为峰值荷载; Δ_u 为极限位移,取骨架曲线进入下降段后荷载为峰值荷载的 85% 的极限荷载所对应的位移; μ 为延性比,取极限位移和屈服位移的比值; E_u 为累积滞回耗能,取各试件自加载开始至位移角为 1/35 rad 的第二循环结束后的累积滞回耗能; θ 为破坏过程特征点所对应位移角.

表 1 各试件的主要试验结果
Tab. 1 Main experimental results of specimens

试件编号	t/min	n	λ	N/kN	V_y/kN	Δ_y/mm	V_c/kN	Δ_c/mm	Δ_u/mm
Z1	—	0.2	1.78	500	309.7	9.30	369.3	13.26	16.04
Z2	60	0.2	1.78	500	256.1	8.99	297.4	12.94	13.25
Z3	90	0.2	1.78	500	234.6	10.14	269.5	13.25	14.80
Z4	120	0.2	1.78	500	196.4	9.28	230.8	13.21	13.95
Z5	60	0.1	1.78	250	223.9	9.86	267.3	16.92	18.51
Z6	60	0.3	1.78	750	249.7	7.51	288.3	11.59	13.27
Z7	90	0.2	1.58	500	234.7	8.95	284.2	11.78	12.11
Z8	90	0.2	1.98	500	219.2	9.77	251.4	14.31	14.51

试件编号	μ	$E_u/\text{kN} \cdot \text{m}$	$\theta/\text{rad}^\text{①}$			
			试件开裂	箍筋屈服	纵筋屈服	峰值荷载
Z1	1.72	10.6	1/200(1+)	1/50(1+)	1/35(1+)	1/35(1+)
Z2	1.49	10.4	1/300(1+)	—	1/100(1+)	1/35(1+)
Z3	1.46	9.3	1/300(1+)	—	1/50(1+)	1/35(1+)
Z4	1.50	9.1	1/300(1+)	—	1/50(1+)	1/35(1+)
Z5	1.88	8.2	1/200(1+)	—	1/50(1—)	1/25(1+)
Z6	1.77	12.7	1/300(1+)	—	1/50(2+)	1/50(1+)
Z7	1.35	8.6	1/400(1+)	—	1/35(1—)	1/35(1—)
Z8	1.48	10.6	1/400(1+)	—	1/35(1+)	1/35(1+)

①: (1+)表示第一循环推进过程; (1-)表示第一循环回拉过程; (2+)表示第二循环推进过程.

2 滞回性能分析

图 1 为各试件的滞回曲线.从图 1 可以看出:受火前后各试件的滞回曲线均不饱满,捏拢效应明显,耗能能力较弱;在试件开裂以前,短柱的初始加载刚度较大,加载曲线的斜率变化小,正反向各加卸载一次所形成的滞回环不明显;在试件开裂以后,曲线的斜率随着荷载的增大而减小,并且减小的速率加快,尤其在构件屈服后更加明显.这主要是由于混凝土的拉压交替受力导致内部微裂缝缓慢发展,使其受压变形模量缓慢下降,其累计塑性变形逐渐加大,且减弱钢筋与混凝土之间的粘结力,加之钢筋本身的包兴格效应,都将导致短柱刚度逐步退化.

不同受火时间后,各试件的无量纲典型滞回环,如图 2 所示.图 2 中: V_a 和 Δ_a 分别是卸载点的水平荷载和位移.图 2 是取各试件达到屈服荷载和峰值荷载所在的第一次循环加载的滞回环,分别称为近屈服环和近极限环^[1].从图 2 可以看出,受火前后混凝土短柱的滞回规则类似,火灾高温并没有对混凝土短柱的滞回规则产生显著影响,火灾后混凝土短柱的滞回规则可近似采用对应的未受火时的模型.

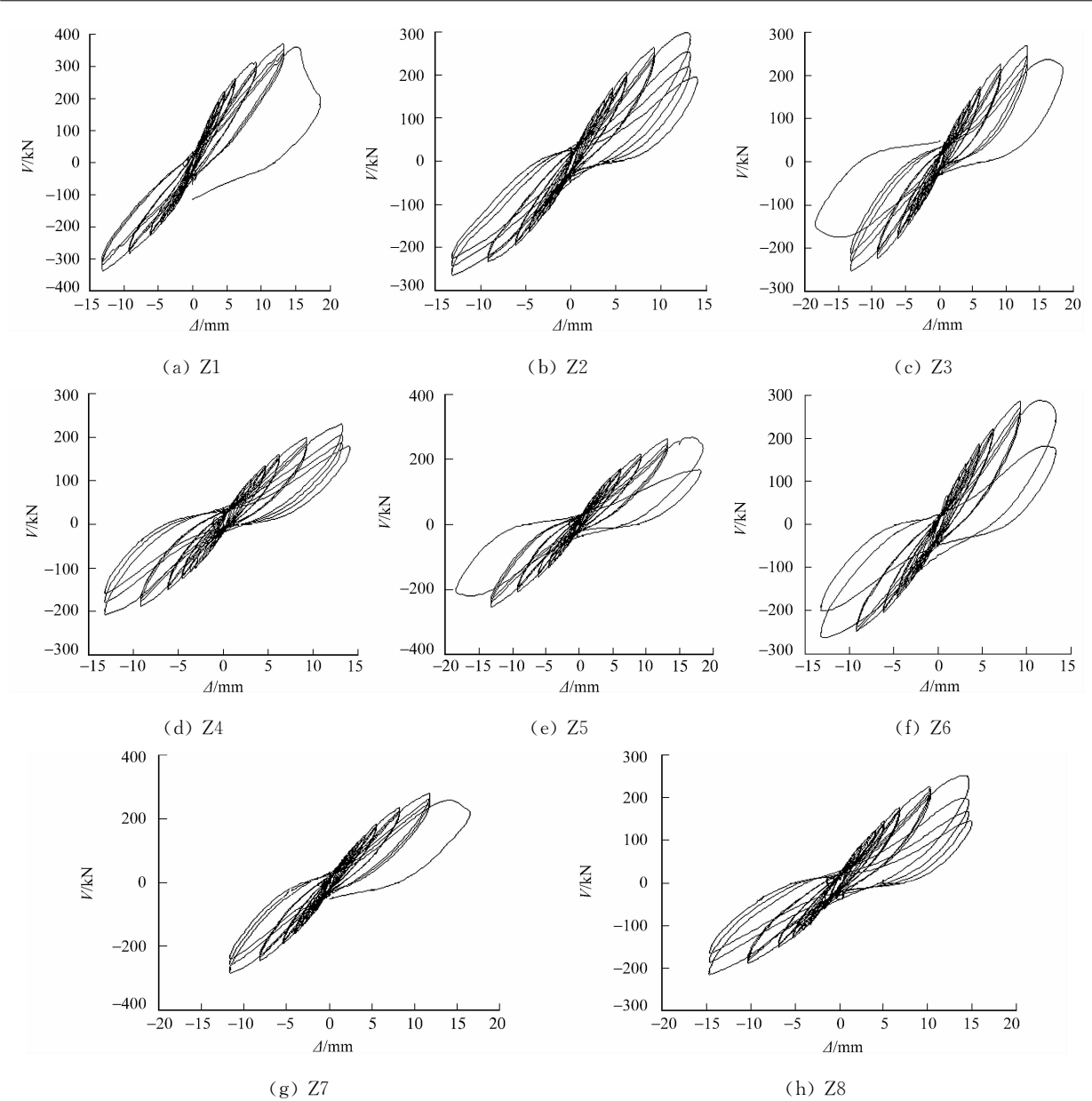


图 1 试件的滞回曲线

Fig. 1 Hysteretic curves of specimens

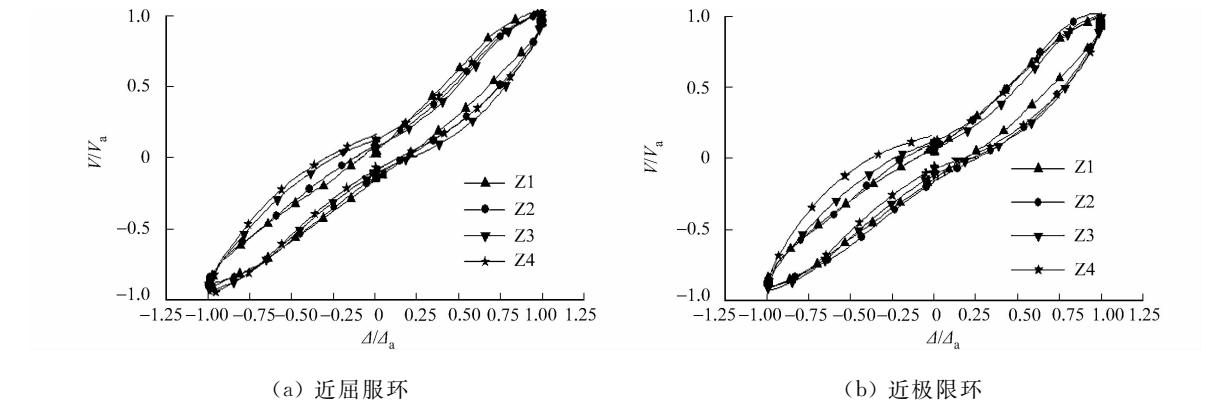


图 2 无量纲的典型滞回环

Fig. 2 Nondimensional typical hysteretic loop

各试件的水平力 V 和水平位移 Δ 之间的实际和无量纲形式的骨架曲线,如图 3 所示. 结合图 3 和表 1 中的峰值荷载、极限位移和延性系数的结果可以得到如下 4 个结论.

1) 随着受火时间的增加,试件的初始刚度降低,峰值承载力下降,极限变形能力有下降的趋势,骨架曲线的下降段更陡.这主要是由于是高温作用造成混凝土内部的结构性损伤,且随着高温的持续作用和受火时间的增加,力学性能恶化加剧.

2) 随着轴压比的增大,试件的极限变形能力和达到峰值荷载时变形均降低,骨架曲线下下降段更陡,抗剪承载力有增大的趋势,但当轴压比增大到一定程度($n=0.2$)后,再增加轴压比($n=0.3$),抗剪承载力反而略有下降.可见,相同的轴压比,火灾后的柱子由于高温损伤作用,力学性能降低,导致其实际应力水平较未受火柱子大.

3) 随着剪跨比的增大,试件的抗剪承载力降低;当剪跨比在 $1.5\sim2.0$ 之间时,剪跨比对短柱的极限变形能力和下降段斜率影响情况较为复杂,受火 90 min 后,不同剪跨比的试件的延性系数相差较小.

4) 对于不同的受火时间、轴压比和剪跨比,无量纲形式的骨架曲线的上升段曲线类似、可近似认为重合,但各因素对下降段的影响情况复杂,未见明显规律.

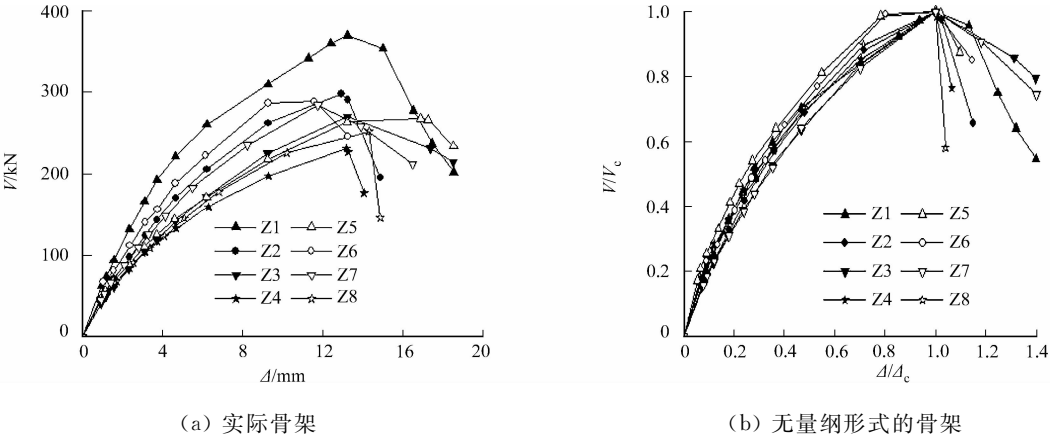


图 3 试件的骨架曲线
Fig. 3 Skeleton curves of specimens

试件 Z6 在位移角 $1/35\text{ rad}$ 的第二循环结束时停止了试验,为了比较各试件的累积滞回耗能,表 1 中给出了各试件在位移角 $1/35\text{ rad}$ 第二循环结束后的累积滞回耗能.从表 1 可以看出:累积滞回耗能随受火时间的增加、轴压比的减小、剪跨比的减小而减小.

各试件在不同受火时间、轴压比和剪跨比影响情况下的累积滞回耗能 M -位移角 φ 关系曲线,如图 4 所示.图 4 曲线能从整体上反映出试件的累积滞回耗能随位移角增大的变化发展趋势,其给出的点为从开始加载至各位移角最后一个循环末的累积滞回耗能.从图 4 可以得到如下 4 个结论.

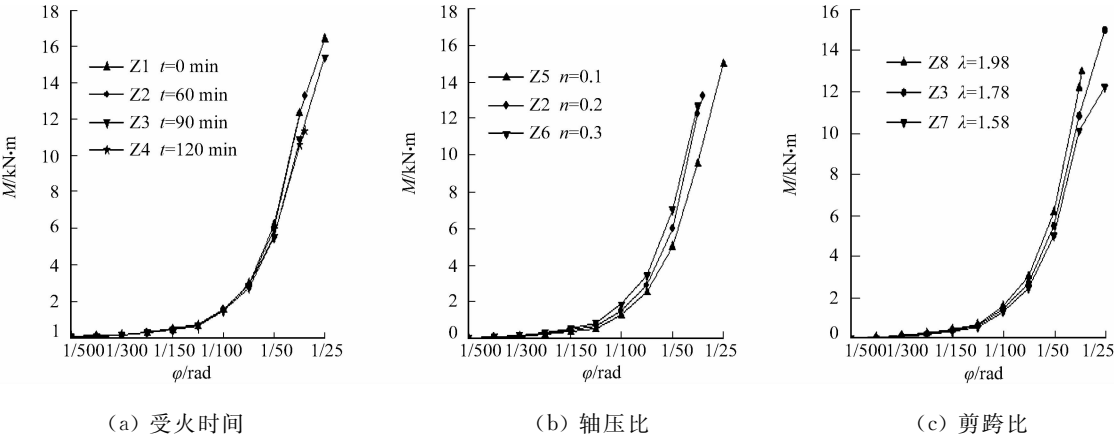


图 4 各种影响因素下的累积滞回耗能-位移角关系

Fig. 4 Relationship between accumulated hysteretic dissipated energy and displacement angle

1) 在加载初期,累积滞回耗能增长的速率比较缓慢,甚至位移角为 $1/500\text{ rad}$ 时接近于零.随着加载的进行,各个试件的曲线形式都出现了“抬头”的态势,斜率加大,增速加快,体现出了塑性部分逐渐发展,并且随着荷载的增大这一趋势不断加快.

2) 从图 4(a)中可以看出:受火后短柱的累积滞回耗能能力降低,未受火试件最终的总累积滞回耗能明显大于其他试件.曲线在加载初期并不能明显地区分出来,这可能是因为受火时间较长的试件高温损伤较严重,较早进入弹塑性阶段,相同位移角下,受火时间较长的柱子的滞回耗能比未受火柱子略大.到了位移角控制在 $1/75\text{ rad}$ (相当于位移 6.16 mm),4 条曲线开始逐渐分离.图 4(a)中,Z2 和 Z4 两个试件在加载后期混凝土发生较明显的裂缝,承载力下降也较大,基于试验安全考虑,把位移角 $1/25\text{ rad}$ 循环 18.48 mm 幅值的位移控制改为 14 mm (相当于位移角为 $1/33$).另外,Z1 是在位移角为 $1/25\text{ rad}$ 的第一次循环的推进阶段结束了试验,而 Z3 则在 $1/25\text{ rad}$ 的位移角下完整地进行了第一次循环.因此,图 4(a)中出现 Z3 的累积滞回耗能大于 Z2 且和 Z1 接近的情况.

3) 从图 4(b)可以看出:受火 1 h 后,轴压比不同的试件的累积滞回耗能-位移角曲线在加载初期并不能明显地区分出来,到了加载的中期,3 条曲线开始逐渐分离.轴压比为 0.1 的试件的 Z5 增速较缓,但其塑性发展的持续过程较长,最终耗能总量大于另外两个轴压比较大的试件.

4) 从图 3(c)中可以看出:不同剪跨比试件的累积滞回耗能-水平位移曲线初期发展趋势大致相同,当位移角达到 $1/100\text{ rad}$ 之后,三条曲线出现明显不同,相同的位移角增量所对应的累积滞回耗能增量不同,剪跨比较大的试件所对应的增量相对较大.试验时,Z8 的最大水平位移为 15 mm (相当位移角为 $1/34.3\text{ rad}$),而 Z3 的最大水平位移为 18.53 mm (相当位移角为 $1/25\text{ rad}$).即图 4(c)中 Z3 的最终累积滞回耗能大于 Z8.

从以上论述可以看出,试件结束试验时的位移角大小及在该位移角下完成的荷载循环次数对试件的最终累积滞回耗能影响较大.因此,要分析某一因素(如受火时间、轴压比和剪跨比等)对累积滞回耗能的影响,必须在相同的循环加载过程、位移角大小和荷载循环次数的前提下进行比较才有一定意义.

3 损伤分析与评定

从图 1 所示的试件滞回曲线可以看出:在等位移幅值加载下,试件的最大荷载随着循环次数的增加而减小,这种现象称为强度退化^[12].柱式构件的强度退化和其抗震性能的损伤密切相关,强度衰减越快,构件的抗震性能损伤也越大.用某一级位移控制下推进过程中第 n 次循环的最大荷载与其第一次循环的最大荷载的比值 V_n/V_1 表示强度衰减.各因素对火灾后钢筋混凝土短柱强度退化的影响,如图 5 所示.从图 5 可以得到以下 4 个结论.

1) 总体而言,随着位移角增大和循环次数的增加,试件强度衰减加快.试验加载前中期,各试件在等位移循环中强度退化量较小,说明此时试件的损伤较小;而在加载后期,试件产生了较大变形,部分混凝土被压碎,钢筋屈服,钢筋与混凝土相互错动,强度衰减幅度加大,损伤较大.

2) 从图 5(a)可以看出:受火时间对短柱的强度衰减影响很大.Z1 为未受火短柱,随着位移角的增加,短柱承载力的退化呈逐步而稳定的增加;而受火柱 Z2~Z4 在位移加载后期的强度衰减加快,这表明火灾后钢筋混凝土短柱滞回环的稳定性较未受火时差.

3) 从图 5(b)可以看出:随着轴压比的增大,试件的强度衰减加快,抗震性能明显降低.因为轴压比较小的试件,延性较好,耗能能力较强,在承载力没有明显降低的情况下所能经受的循环次数多.

4) 从图 5(c)可以看出:在相同的位移角下,随着剪跨比的增大短柱的强度衰退也加快.利用经典 Park 损伤模型^[5]对受火前后试件的损伤指数 D 进行计算(具体计算公式参见文献[4]),可算得损伤指数与水平位移角 φ 的关系曲线,如图 6 所示.从图 6 中可以得出以下 5 点结论.

1) 在加载初期,位移角较小,此时试件处于弹性变形阶段,短柱损伤增长的速率缓慢.随着加载的进行,各试件的曲线形式都出现了“抬头”的态势,曲线斜率加大,增速加快.

2) 从位移角 $1/75\text{ rad}$ 开始,各试件的损伤指数陆续超过 1.0,按 Park 经典损伤模型的评价指标,试件已经处于完全破坏的状态,但实际并非如此.换句话说,这个模型的计算结果,对短柱抗震性能的损伤指数存在超前估计,即试件的损伤指数刚好达到 1 或者大于 1 的时刻,试件远没有出现实效破坏的现象.虽然 Park 损伤模型存在着超前估计的不足,但是曲线仍反映出受火时间、轴压比、剪跨比对火灾后钢筋混凝土抗震性能的损伤影响规律.

3) 对于相同的位移角,未受火短柱的损伤及其发展速率均低于受火柱的情况.这主要是由于火灾

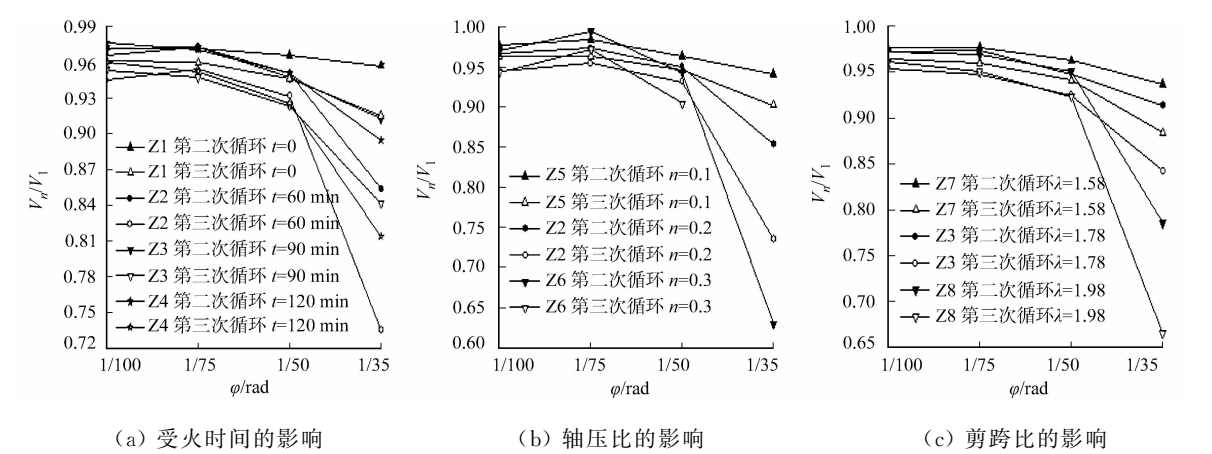


图 5 强度衰减-位移角关系曲线

Fig. 5 Relationship between strength degradation and displacement angle

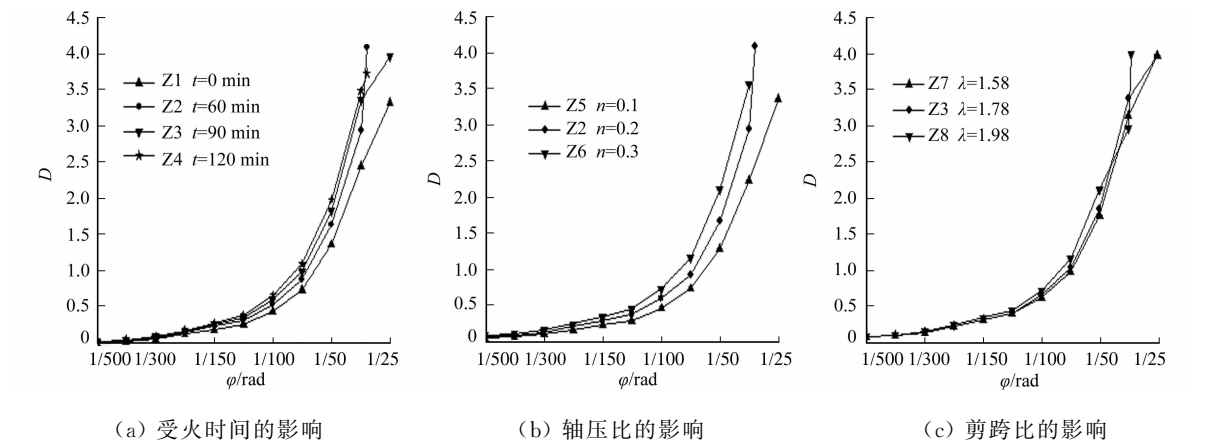


图 6 损伤指数-水平位移关系曲线

Fig. 6 Relationship between damage index and displacement

高温作用使短柱的强度、弹性模量降低,以致受火柱较早进入弹塑性状态,损伤及发展速率加快。

4) 在相同的受火时间下,轴压比较大试件的全过程损伤程度均高于轴压比较小的试件.这主要是由于轴压比较小试件的延性较好,耗能能力强,在低周反复荷载作用下的承载力降低较缓慢。

5) 在相同的位移角下,剪跨比较大的试件的损伤发展相对较快。

基于上述分析结果,并考虑我国国家标准 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[13]规定钢筋混凝土框架结构的弹塑性层间位移角限值为 1/50 rad,建议采用层间位移角为 1/50 rad 时受火后的框架柱的损伤指数 D_T 与未受火时的损伤指数 D_0 比值 η 来表示火灾高温对地震作用时框架柱抗震性能的损伤加大作用.由此计算,可得受火 60,90 和 120 min 后, η 值分别为 1.19,1.32 和 1.43,能较好地综合反映火灾高温对框架柱侧向变形能力和滞回耗能能力两方面抗震特性的损伤作用。

4 结束语

基于受火前后钢筋混凝土短柱在低周反复荷载作用下的抗震性能试验研究结果,对其滞回性能和损伤评定方法进行研究,可以得到以下 2 点主要结论。

1) 受火前后钢筋混凝土短柱的滞回曲线和滞回规则相似.混凝土短柱的累积滞回耗能随着受火时间的增加,轴压比的减小,以及剪跨比的减小而减小;同一位移角下的强度退化随着受火时间的增加,轴压比的增大,以及剪跨比的增大而加快。

2) Park 损伤评价模型对受火前后钢筋混凝土短柱的抗震性能损伤指数均存在超前估计的不足。

参考文献:

[1] 吴波. 火灾后钢筋混凝土结构的力学性能[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 43, 152.

[2] 牛向阳,王全凤,徐玉野,等. 高温后 HRB 高强钢筋粘结锚固性能的试验研究[J]. 工业建筑,2010,40(9):84-87.

[3] 刘良林,王全凤,沈章春. HRB400 级钢筋混凝土柱的滞回性能分析[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2008,29(2):280-283.

[4] 刘良林,王全凤,林煌斌. 地震损伤评价的累积滞回耗能计算[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2011,32(5):565-568.

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

[6] 张家广,霍静思,肖岩. 火灾全过程后钢筋混凝土柱滞回性能试验研究[C]//第 18 届全国结构工程学术会议论文集:第Ⅲ册. 广州:[出版者不详],2009:288-292.

[7] 曾跃飞,张强. 火灾后混凝土构件承载力损伤的数值分析与评估[J]. 广东土木与建筑,2008(4):52-54,47.

[8] 吴波,李惠,马忠诚. 钢筋混凝土结构在火灾和低周反复荷载作用下的损伤分析[J]. 哈尔滨建筑大学学报,1997,30(3):7-12.

[9] 吴波,马忠诚,欧进萍. 高温后钢筋混凝土柱抗震性能的试验研究[J]. 土木工程学报,1999,32(2):53-58.

[10] 杨清文. 火灾后钢筋混凝土短柱的抗震性能研究[D]. 泉州:华侨大学,2011:9-72.

[11] 刘良林,王全凤,沈章春. 基于损伤的累积滞回耗能与延性系数[J]. 地震,2008,28(4):13-19.

[12] 刘柏权,刘鸣. 钢筋混凝土柱低周疲劳试验中的强度退化与刚度退化[J]. 工程力学,1997,14(增刊 1):189-192.

[13] 中华人民共和国建设部. GB 500102012 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

Hysteretic Behaviors and Damage Assessment of Concrete Short Columns after Fire

LIN Yan-qing, XU Yu-ye, YANG Qing-wen, LUO Yi

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Based on the pseudo-static test data of seven reinforced concrete (RC) short columns after fire and one contrastive unfired specimen, the effects of fire exposure time, axial compressive ratio and shear span ratio on the hysteretic behaviors were analyzed. Combining strength degradation analysis which reflects the damage development process of the specimens, the Park's damage model was adopted to assess the damage of aseismic behavior of specimens unfired and after fire. An assessment index of fire on aseismic performance damage was proposed. The results show that: the hysteretic curves and hysteretic rules of RC short columns after fire are similar to the column unfired, but the stability of RC short columns after fire is much poorer than the column unfired. The accumulated hysteretic dissipated energy of short columns decreases with increasing fire exposure time and with decreasing the axial compressive ratio and the shear span ratio. Under the same displacement angle, the strength degradation increases with increasing fire exposure time, the axial compressive ratio and the shear span ratio. There exist some disadvantages in Park's damage model to estimate damage index of the aseismic behavior of reinforced concrete short columns before and after fire.

Keywords: reinforced concrete; short column; fire; hysteretic dissipated energy; strength degradation; damage assessment

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 方德平)