

文章编号:1671-8879(2012)05-0065-06

钢筋混凝土柱低周疲劳力学性能分析

刘 鸣,刘伯权

(长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘 要:在以往 12 根 1/2 比例钢筋混凝土柱低周疲劳试验研究基础上,分析了不同位移幅值下弯曲型破坏混凝土柱的累积损伤发展规律,重点研究了钢筋混凝土柱的强度退化、刚度退化、能量耗散等力学性能。研究表明:钢筋混凝土柱的低周疲劳破坏过程一般可分为损伤迅速发展、相持及破坏 3 个阶段;强度退化和刚度退化与构件的损伤过程发展一致,导致其产生的根本原因是构件弹塑性性质及损伤的发展;构件破坏时滞回耗能随加载路径不同而存在显著差异,裂缝的开展和分布状态对构件耗能能力有明显的影响。

关键词:结构工程;柱;低周疲劳;累积损伤;疲劳寿命

中图分类号:TU375.4 **文献标志码:**A

Low-cycle fatigue damage for shear behavior of reinforced concrete columns

LIU Ming, LIU Bo-quan

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: Based on existing low-cycle fatigue tests on 12 identical half-scale reinforced concrete columns, the development of cumulative damage of reinforced concrete frame column was investigated. Furthermore, the rigidity deterioration, strength deterioration and energy dissipation of reinforced concrete columns were studied. The results indicate that the failure process of reinforced concrete columns can be divided into three stages: damage rapid development stage, stalemate stage, and failure stage. The stiffness degradation traces and rigidity deterioration traces are accompanied with the failure process. The reason lies in the essential feature of elastic-plastic behavior of member and the development of damage. In addition, the energy dissipation is related to the loading path and is influenced by the crack development and crack distribution of column. 2 tabs, 9 figs, 13 refs.

Key words: structural engineering; column; low-cycle fatigue; cumulative damage; fatigue life

0 引 言

震害灾害调查表明:主余震作用下钢筋混凝土框架结构发生倒塌的主要原因在于框架柱或节点核

心区发生破坏^[1-2]。若将节点区看作为框架柱受力较为特殊的一部分,则框架结构的抗地震倒塌能力研究应着重分析框架柱在地震作用下的受力性能,特别是地震动造成的累积损伤效应不容忽视^[3-4]。

收稿日期:2011-12-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51078037);教育部高校博士点基金项目(20100205110010);陕西省自然科学基金项目(2010JM7002)

作者简介:刘 鸣(1957-),女,河北保定人,教授,E-mail: lium@chd.edu.cn。

结构的累积损伤研究早期主要集中于钢结构的疲劳问题,直到 20 世纪 80 年代,累积损伤效应研究的重点才从钢结构转到量大面广的钢筋混凝土结构,Mizuhata 采用 7 个 1/4 比例的钢筋混凝土单跨框架进行了固定变位的疲劳试验,得出了钢筋混凝土构件的疲劳寿命,并将结构的破坏指数 (Damage Index,简称 DI)表示为最大变形和累积疲劳损伤的线性组合^[5];Banon 等首先将结构破坏表示为最大变形和累积耗能的函数,首次建立了变形/能量双参数破坏准则^[6]。但是可能由于所统计数据的离散性太大,或者是因为所做试验仅为受弯构件,未能引起学术界和工程界的足够重视。

1985 年 Park 等建立了最大反应变形和累积耗能线性组合的地震破坏评估模型,即 Park-Ang 双参数准则^[7]。该准则反映了破坏是由大的荷载幅值和重复的循环加载效应联合作用所引起的这一事实,较好解释了地震动三要素各自对结构破坏的影响,在国内外地震工程界获得广泛应用。中国陈永祁等先后对 Park-Ang 双参数准则进行了适当修正^[8-10]。然而该准则的最大缺点是忽略了加载幅值和加载路径变化对累积损伤的影响,这一点已为文献^[11]的对比试验结果所证实。

本文在以往 12 根钢筋混凝土模型柱低周疲劳试验研究的基础上,分析了不同位移幅值下弯曲型破坏混凝土柱的累积损伤发展规律,重点研究钢筋混凝土柱的强度退化、刚度退化、能量耗散等力学性能,为分析加载幅值和加载路径变化对累积损伤的影响和研究钢筋混凝土柱的低周疲劳寿命奠定基础。

1 试验概况

制作了 12 个钢筋混凝土柱进行试验研究,所有柱的尺寸、配筋均相同,截面尺寸为 200 mm×250 mm,上下端两铰相距 2 550 mm。纵向钢筋采用对称配筋并通长经过扩大端,单侧纵筋配筋率为 1.25%,配箍率为 0.5%,扩大段两侧以外 300 mm 范围内箍筋加密为 Φ8@50。所有试件的参数见表 1 (Δ_y 为构件)。试件的尺寸及配筋如图 1 所示;试验加载装置如下页图 2 所示,疲劳试验其他信息详细可见文献^[5]。

2 试验结果分析

虽然在试验过程中试件出现了不同程度的剪切斜裂缝,均发展不大,所有试件的最终破坏均按设计要求出现弯曲破坏,但低周疲劳试件的破坏过程和特征与普通低周反复荷载下试件的破坏特征有所不同,主要试验结果可见下页表 2。

表 1 试件参数表

Tab. 1 Basic parameters of specimens

试件号	轴向力/kN	混凝土强度/MPa	加载形式
CF-1	254.0	22.3	等幅循环 ±2Δ _y
CF-2	272.0	24.0	等幅循环 ±3Δ _y
CF-4	296.4	26.1	等幅循环 ±4Δ _y
CF-5	285.6	25.2	不等幅循环 ±1Δ _y (先) ±2Δ _y (后)
CF-6	292.0	25.7	等幅循环 ±2.5Δ _y
CF-7	278.2	24.5	等幅循环 ±1.5Δ _y
CF-11	478.0	27.3	等幅循环 ±2Δ _y
CF-12	296.4	26.1	不等幅循环 ±3Δ _y (先) ±2Δ _y (后)
CF-13	311.4	27.4	不等幅循环 ±2Δ _y (先) ±3Δ _y (后)
CF-14	319.7	28.1	不等幅循环 ±1Δ _y (先) ±2Δ _y (后)
CF-15	295.3	25.9	不等幅循环 ±2Δ _y (先) ±1Δ _y (后)
CF-20	341.3	30.1	等幅循环 ±2.25Δ _y

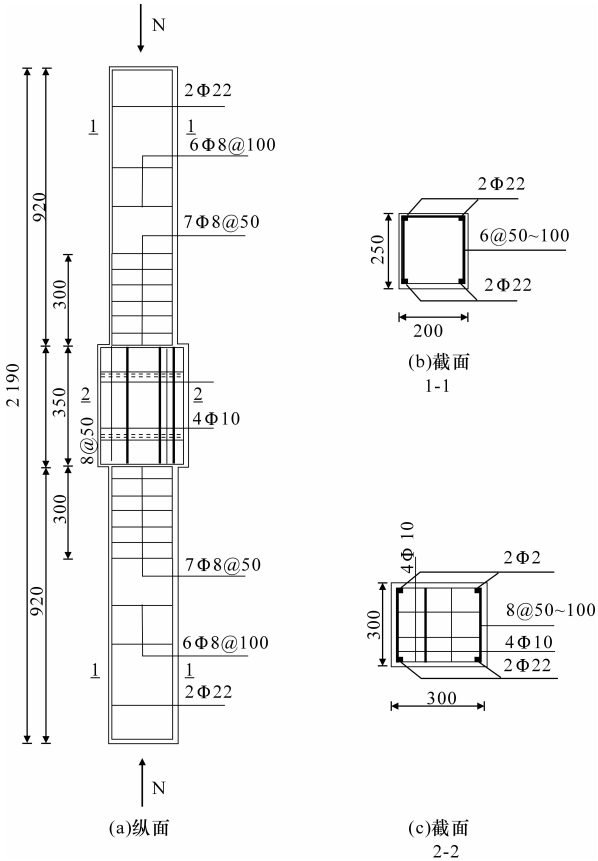


图 1 试件尺寸及配筋

Fig. 1 Dimensions and reinforcement of specimen

2.1 等幅位移循环下柱的破坏

试验柱在等幅对称位移循环作用下的疲劳破坏特征随位移幅值的大小而不尽相同,具体可分为以下 3 种情况。

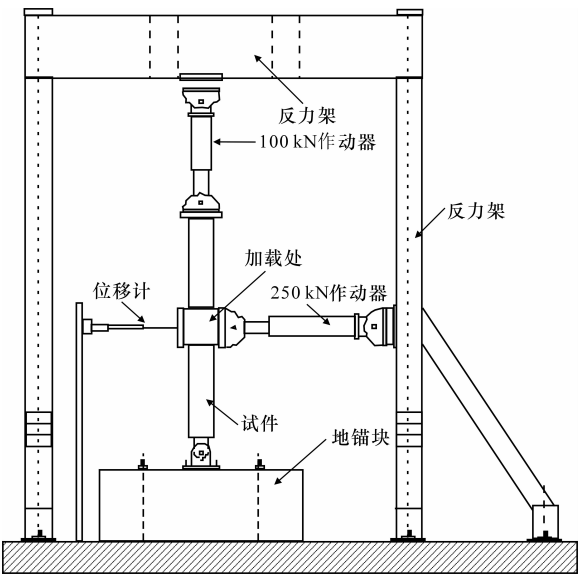


图 2 加载装置
Fig. 2 Test set-up

表 2 主要试验结果
Tab. 2 Main test results

试件号	水平承载力/kN		屈服位移/mm		位移幅值/mm		循环周数/周
	推	拉	推	拉	推	拉	
CF-1	135.0	−114.0	15.5	−13.5	31.0	−27.0	268.0
CF-2	120.0	−120.0	13.0	−15.0	39.0	−45.0	7.5
CF-4	133.0	−121.0	14.4	−14.4	57.4	−57.4	2.0
CF-5	133.0	−126.0	14.0	−14.0	14.0 (28.0)	−14.0 (−28.0)	1 000.0 + 136.0
CF-6	125.0	−133.0	13.6	−14.0	34.0	−35.0	13.0
CF-7	125.0	−120.0	13.9	−14.2	20.9	−21.3	1 048.0
CF-11	140.0	−140.0	12.0	−12.3	24.0	−24.6	21.0
CF-12	115.5	−117.5	12.3	−11.5	36.9 (24.6)	−34.5 (−23.0)	3.0 + 193.5
CF-13	115.5	−110.0	13.0	−12.5	26.0 (39.0)	−25.0 (−37.5)	193.5 + 6.3
CF-14	118.0	120.0	12.5	−12.5	12.5 (25.0)	−12.5 (−25.0)	7 000.0 + 104.0
CF-15	111.5	−117.0	13.5	−13.0	27.0 (13.5)	−26.0 (−13.0)	136.0 + 7 200.0
CF-20	121.0	−123.0	11.5	−12.5	25.9	−28.1	135.0

注:括号中的数字为不等幅加载试件的后续加载位移。

2.1.1 中等位移幅值试件

中等位移幅值(指作用位移延性系数处于 1.5 和 3.0 之间)的混凝土柱试件,破坏过程可划分为 3 个阶段。

第一阶段:损伤迅速发展阶段。这一阶段的主要特点是新裂缝不断出现,裂缝之间纵筋的粘结在交替反向受力后逐步退化,粘结劈裂裂缝从弯矩最大截面的主裂缝处沿纵筋向构件两端延伸。这一阶段以潜在塑性铰区两侧保护层混凝土大部分剥落或

退出工作为结束。
第二阶段:相持阶段。保护层混凝土退出工作后,截面内力由两侧钢筋和核心区混凝土承担。反复荷载作用下受拉时由钢筋承担拉力,受压时由钢筋和混凝土共同承担压力和大部分剪力。受拉时裂缝逐渐由外向里扩散,受压时混凝土在剪压复合作用下被进一步分割。分割后的混凝土小块体在循环受压后又相互磨挤、错动,造成混凝土酥裂。损坏从破坏截面逐渐向块体内渗透,缓慢积累,持续过程较长。表现在滞回曲线中为强度退化较小。此阶段后期,在破坏段出现沿纵筋的劈裂裂缝,该裂缝一般从混凝土已剥落的区段向构件两端逐步发展,这表明在多次反复作用下钢筋和混凝土的粘结性能进一步退化。

第三阶段:破坏阶段。核心区混凝土割裂、破碎、酥松的区域渗透到一定范围后,破坏区段的混凝土开始大量掉落。当核心区消弱严重,依靠钢筋和未完全破坏的混凝土无法平衡竖向荷载时,混凝土侧向膨胀加剧,试件发生突发性的压溃。

典型试件 CF-20 的滞回曲线如图 3 所示。 P 为荷载; Δ 为位移。

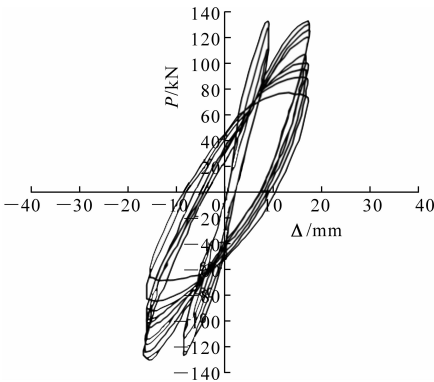


图 3 CF-20 滞回曲线(+2.25 Δ_y)

Fig. 3 Response of specimen CF-20

2.1.2 大位移幅值试件

大位移幅值试件主要是指作用位移延性系数大于 3 的钢筋混凝土柱,该类试件的破坏亦可分为前述 3 个阶段。与中等幅值试件不同之处在于第二阶段“相持”短,循环次数少,且与第一阶段不易区分,不过仍有一个强度下降减缓的过程。试件的破坏以整个破坏区段的突然压溃为特征。

该类试件典型试件 CF-4 的滞回曲线如图 4 所示。

2.1.3 小位移幅值试件

小位移幅值试件主要是指作用位移延性系数小于 1.5 的混凝土柱,该类试件亦有一个损伤发展与稳定的过程。CF-14 在 1 倍屈服位移水平上循环

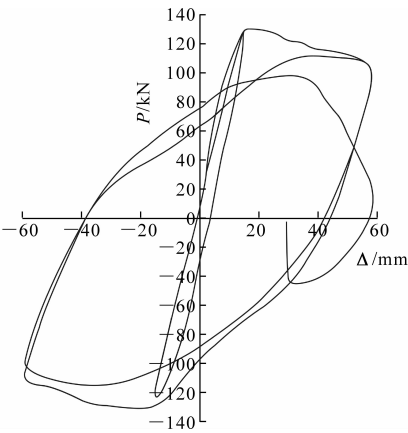


图 4 CF-4 滞回曲线(+4Δ_y)

Fig. 4 Response of specimen CF-4

7 000 周时,无论试件外观还是滞回环形状均与第 50 周几无差别,从第 50 周到 7 000 周所产生的强度退化总量仅相当于前 5 周的强度退化量,且其退化的总体趋势是收敛的。

循环作用下拉压钢筋基本上处于弹性工作状态,纵筋和箍筋对混凝土的约束始终有效。试件的损伤主要在保护层外发展,裂缝较难渗入到核心区。考虑到试件设备和试验时间等因素,加载后期作用位移幅值增大为 2 倍屈服位移水平后试件 CF-14 循环 104 周后方发生最终破坏。因此从结构抗震设计角度而言,可认为延性系数等于±1 是压弯构件的“疲劳极限”。

2.2 变幅位移循环下柱的破坏

从表 1 可以看出,试件 CF-5 与 CF-15,CF-12 与 CF-13 的加载顺序恰好相反,主要目的是研究荷载作用路径对试件损伤的影响。

试件 CF-5 先在 1 倍屈服位移下循环了 1 000 周,然后加大位移幅值,在较大位移幅值(2Δ_y)下循环 136 周后试件破坏。相反,CF-15 在较大位移幅值(2Δ_y)下循环 136 周后,减小位移幅值以 1Δ_y 循环 3 200 周试件尚未破坏。从试件的外观看损伤几乎不再发展,滞回曲线亦无明显变化。不得已重新增大至 2Δ_y 后试件始破坏。试件 CF-12 与 CF-13 亦有类似的规律,详细可见表 2。需要指出的是 CF-15 在 1Δ_y 下循环次数 7 200 周是笔者根据 Miner 线性损伤理论换算后得到的。

与相同位移幅值下的对称循环试件比较后可以发现,在 1Δ_y 这样的小位移幅值下的单周循环对试件造成的损失非常小,在与较大幅值的位移循环组合时,其顺序对试件的最终破坏影响较小,破坏由大位移循环控制。而在较小的位移幅值也大于 1.5Δ_y 后,位移幅值大小的顺序将显著影响结构的最终破坏。

3 强度退化

图 5 为几个典型试件的强度退化和循环周数的关系,其中纵坐标为剩余强度与最大荷载的百分比(用 R 表示),横坐标为循环次数(N)的对数。从图中可以看出,滞回曲线具有一个明显的特点:即强度下降先快后慢,接着趋于一个较稳定的值,临近破坏时强度退化重新加大。

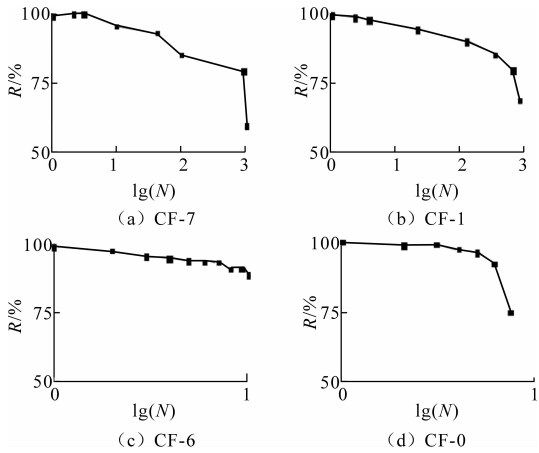


图 5 强度退化与循环周期的关系

Fig. 5 Strength deterioration VS cycle numbers

强度退化规律与损伤发展过程基本一致。事实上,产生强度退化的主要原因就是试件累积损伤。这种损伤主要表现在钢筋混凝土微细裂缝的发育、发展,钢筋与混凝土之间的粘结退化、破坏,被裂缝割裂的混凝土块体的相互错动、掉落、酥松和破碎。

4 刚度退化

随位移循环次数的增加,试件刚度(本文以割线刚度表示)也在退化。在等位移幅值循环下,可以得到类似于强度退化的刚度-周数退化关系。结合文献[11]、[12]中等位移幅值试验,图 6 表示试件最终破坏时的割线刚度与首次屈服时的屈服点割线刚度之比和位移幅值间的关系。可以看出,位移幅值越大,最终刚度退化亦越严重。

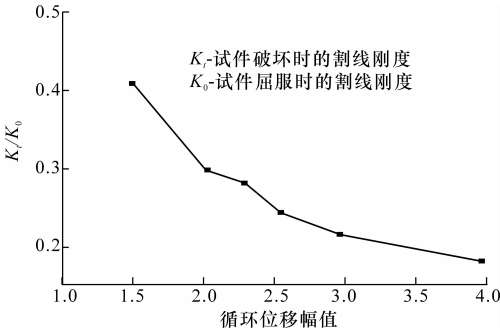


图 6 最终破坏刚度与循环位移幅值关系

Fig. 6 Failure rigidity VS cycle displacement

导致强度、刚度退化的根本原因是构件屈服后的弹塑性性质和损伤的发展。有学者指出,屈服后的负刚度是由于重力的 $P-\Delta$ 效应所引起的。这可能没有说明问题的全部。 $P-\Delta$ 效应使柱产生附加弯矩,当然将使滞回曲线形成负刚度,但负刚度中还包括了构建塑性区损伤累积的影响在内。应该说,负刚度现象是包括 $P-\Delta$ 效应在内的强度退化和刚度退化的综合效应。

延性的概念不能充分反映结构在地震中的振动性质及其所表现出的刚度、强度退化。文献[13]提出以退化刚度准则(破坏比)、退化强度准则(强度下降率)评判结构或构件的损伤与破坏。由钢筋混凝土柱的低周疲劳试验可知,试件损伤的发展伴随着刚度、强度的退化。刚度、强度退化的规律与试件损伤发展的过程基本一致。也是由于这个原因,退化刚度(准则)、退化强度准则(强度下降率)在一定程度上反映了结构破坏的实质。不过,刚度、强度的退化虽然有规律可循,但定量上却很难把握。由钢筋混凝土柱的试验结果知,刚度、强度退化只是在每一位移循环的初期和临近破坏时比较明显^[11-12]。试验在“相持阶段”相当多的循环次数下刚度、强度退化很少。但这并不是说试件的损伤没有发展,而是损伤在逐步积累。因此,要掌握在增幅循环及等幅循环下的刚度、强度的退化规律,并进而找到一种能预测结构反应随机过程中的刚度、强度衰减直至破坏的方法,仍需开展进一步精细化试验研究。

5 滞回耗能

图 7 为单周平均滞回耗能与位移幅值的关系,其中 E 为单周平均耗能(该构件总耗能除以循环次数)。从图 7 可以看出,在等位移幅值的循环试验中,随着位移幅值的增大,单周滞回耗能显著增加。

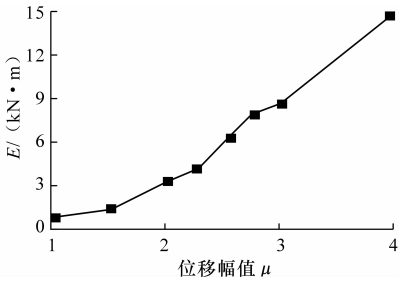


图 7 单周平均滞回耗能与位移幅值的关系
Fig. 7 Energy dissipation of each cycle
VS displacement

图 8 为几个典型试件的单周滞回耗能 R 与循环次数的关系(图中以第一周的耗能为 100%)。由于试件在较大变位时的强度下降,斜裂缝发展、开闭,纵筋滑移等造成滞回环变窄,即捏缩效应,而使单周耗能循环次数增加而减少。进入第二阶段(相

持阶段),单周耗能相对稳定。

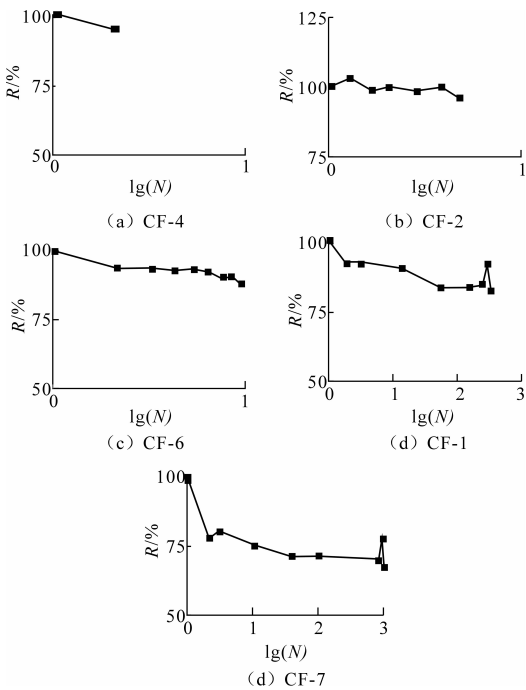


图 8 单周滞回耗能与循环次数的关系
Fig. 8 Energy dissipation of each cycle
VS cycle numbers

下页图 9 为典型试件 CF-4 总滞回耗能 E_t 与位移的关系。试验表明,试件达到破坏时的总滞回耗能随位移幅值的增大而降低。这主要是由于随位移幅值的变大,达到破坏时的循环周数大幅度下降。从试件裂缝开展的情形看,小位移幅值的试件虽然破坏区段较短,但开裂区段却比大位移幅值的试件长很多,且裂缝分布较密。如试件 CF-7 破坏时裂缝几乎布满整个试件。滞回耗能是以构件的塑性发展、裂缝开展为代价来吸收(耗散)输入能量的。小位移幅值试件同在较长区段上裂缝开展和非弹性发展吸收能量。加之,滞回环捏缩现象不明显。这样虽然单周滞回耗能量不大,但达到破坏时吸收的总能量却相当可观,大大超过了大位移幅值试件达到破坏时吸收的总能量。

由试验可以看出,构件达到破坏时吸收的总能量并不是一个稳定的值,它与加荷路径等有很大关系。绝对以吸收能量的多寡判断构件、结构的抗震性能是不妥当的。只有当加载路径一定时,才能比较滞回耗能的大小,进一步判断结构的损伤。裂缝的开展和分布状态对耗能能力有明显的影响,密布的裂缝比集中开展的裂缝更有利,它将使塑性区域扩大,构件总的滞回耗能增加。高烈度、长持时的地震作用限制结构允许位移时,应该考虑到这个因素。同时,在进行震害预测、现有房屋的抗震能力评估中,也要考虑这种结构的低周疲劳性能产生的累积

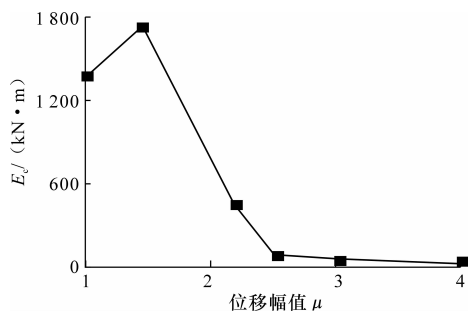


图9 CF-4 总滞回耗能 与位移幅值的关系

Fig. 9 Cumulated energy dissipation of specimen CF-4 VS cycle displacements

损伤问题。

6 结 语

(1) 试验研究表明,钢筋混凝土柱的低周疲劳破坏过程一般可分为损伤迅速发展、相持及破坏 3 个阶段;从结构抗震设计角度而言,可认为位移幅值 $\mu = \pm 1.0$ 是不发生低周疲劳破坏的安全界限。

(2) 强度退化和刚度退化与构件的损伤过程发展一致,导致其产生的根本原因是构件弹塑性性质及损伤的发展,而滞回曲线的负刚度现象是包括 $P-\Delta$ 效应在内的刚度、强度退化的综合效应。

(3) 构件破坏时滞回耗能随加载路径不同而存在显著差异,裂缝的开展和分布状态对构件耗能能力有明显的影 响。

参考文献:

References:

[1] 清华大学、西南交通大学、北京交通大学土木工程结构专家组. 汶川地震建筑震害分析[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 1-9.
Civil and Structural Groups of Tsinghua University, Xinan Jiaotong University and Beijing Jiaotong University. Analysis on seismic damage of buildings in the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 1-9. (in Chinese)

[2] Otani S R C. Building damage statistics and SDF response with design seismic forces [J]. Earthquake Spectra, 1999, 15(3): 485-501.

[3] 曹海韵, 潘 鹏, 叶列平, 等. 混凝土框架摇摆墙结构体系的抗震性能分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(1): 64-69.
CAO Hai-yun, PAN Peng, YE Lie-ping, et al. Seismic performance analysis of RC frame rocking-wall structure system[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(1): 64-67. (in Chinese)

[4] 刘伯权, 白绍良, 赖 明. 抗震结构的破坏准则评述及探讨[J]. 重庆建筑工程学院学报, 1993, 15(4): 1-8.
LIU Bo-quan, BAI Shao-liang, LAI Ming. A review and analysis of failure criteria for aseismic structures

[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1993, 15(4): 1-8. (in Chinese)

[5] 刘伯权. 抗震结构的破坏准则及可靠性分析[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1995.
LIU Bo-quan. Damage criteria and reliability analysis of earthquake resistant structures [M]. Beijing: China Building Material Press, 1995. (in Chinese)

[6] Banon H, Irvine H M, Biggs J M. Seismic damage in reinforced concrete frames [J]. Journal of the Structural Engineering, 1981, 107(9): 1713-1729.

[7] Park Y J, A H S, Wen Y K. Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings [J]. Journal of the Structural Engineering, 1985, 111(4): 740-757.

[8] 陈永祁, 龚思礼. 结构在地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.
CHEN Yong-qi, GONG Si-li. Double control damage index of structural ductility and dissipated energy during earthquake [J]. Journal of Building Structures, 1986, 7(1): 35-48. (in Chinese)

[9] 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 Di-tao, REN Li-jie. 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)

[10] 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 Dong-sheng, FENG Qi-min, WANG Guo-xin. A modified park-ang seismic damage model considering low-cycle fatigue life [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(11): 41-49. (in Chinese)

[11] 刘伯权, 徐云中, 白绍良. 钢筋混凝土柱在等幅对称位移循环加载下的低周疲劳性能[J]. 重庆建筑大学学报, 1996, 18(2): 34-42.
LIU Bo-quan, XU Yun-Zhong, BAI Shao-Liang. Low-cyclic fatigue behavior of reinforced concrete column subjected to symmetric displacement cycling [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1996, 18(2): 34-42. (in Chinese)

[12] 刘伯权, 黄宗明, 张友为, 等. 非对称位移循环下钢筋混凝土柱的低周疲劳性能[J]. 重庆建筑大学学报, 1996, 18(2): 92-99.
LIU Bo-quan, HUANG Zong-ming, ZHANG You-wei, et al. Low-cyclic fatigue behavior of reinforced concrete columns subjected to non-symmetric displacement cycling [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1996, 18(2): 92-99. (in Chinese)

[13] Banon H, Venezane D. Seismic safety of reinforced concrete members and structures [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1982, 10(2): 179-193.