

不同轴压比下钢筋混凝土柱 的低周疲劳性能

①
97, 1P(3)
1-6

TU375.3c1

白绍良 张友为 黄宗明

(重庆建筑大学建筑工程学院 630045)

摘要 在通过系列试验建立了中等偏低轴压比下, 矩形截面钢筋混凝土柱对称位移循环和非对称位移循环低周疲劳寿命表达式之后, 本文再利用一个试验系列对中等偏高轴压比下对称位移循环和非对称位移循环钢筋混凝土柱在不同延性系数下的低周疲劳寿命进行了试验研究。根据研究结果给出了较高轴压比下的低周疲劳寿命表达式, 并在此基础上建议了适用于一定范围轴压比的钢筋混凝土柱低周疲劳寿命表达式。

关键词 钢筋混凝土, 抗震框架, 破坏准则, 低周疲劳寿命, 轴压比

中图分类号 TU375.3 钢筋混凝土柱, 低周疲劳寿命

引言

以往的试验已经表明, 在使结构产生多次屈服后往复振动的地震激励下, 钢筋混凝土结构构件的破坏既与结构构件所达到的位移延性有关, 又与在某个量级的延性系数下的循环次数有关。其中的后一个因素表明, 每个未达到首次超越破坏变形界限的屈服后位移, 都将在构件控制部位, 例如塑性铰部位, 引起一定的损伤增量。如果各种不同延性水准的屈服后位移多次重复, 构件也完全可能因损伤累积而破坏。

每个屈服后位移循环引起的相对损伤增量, 也就是以百分比表示的损伤增量, 与诸多因素有关。其中首先是该循环的最大位移延性系数 μ_{\max} 和非对称循环中最大和最小位移延性系数 (或正向和反向位移延性系数) 的比值, 即 $\gamma = \mu_{\min} / \mu_{\max}$, 和柱的轴压比 n ($n = N / f_c b_c h_c$, 在本文中取 $f_c = 0.76 f_{cu(50)}$)。

在尚未寻找到能更好地反映每个循环造成的相对损伤增量的估算方法之前, 只能取由一个循环引起的相对损伤增量 ΔD 为低周疲劳寿命 N_f 的倒数, 即

$$\Delta D = 1/N_f \quad (1)$$

为了建立更加符合钢筋混凝土结构性能的抗震破坏准则, 在本文所属的研究项目中, 首先根据对称位移循环低周疲劳寿命试验系列得出了 $n = 0.2$ 时位移延性系数 μ 与低周疲劳寿命 N_f 之间的关系式为^[1]:

收稿日期: 1996-05-30

白绍良, 男, 1935年生, 教授

建设部与国家自然科学基金联合资助项目

$$\mu N_f^0 \lg 2 = 4.60 \quad (2)$$

以此为基础,再通过两组最大位移延性系数分别为 $\mu = 2.5$ 和 $\mu = 3.0$,且最小位移-最大位移延性系数比 γ 不同的非对称位移循环系列试验,得出了 $n = 0.20$ 时非对称位移循环下低周疲劳寿命的 N_f 的表达式为^[2]

$$\log N_f = \log N_f^0 + (1 + \gamma)(\mu_{\max} - 1) \quad (3)$$

其中 N_f^0 为最大位移与非对称位移循环中的最大位移相同时对称位移下的低周疲劳寿命,按公式(2)计算; $\gamma = \mu_{\min} / \mu_{\max}$,其中 μ_{\max} 为非对称位移循环中的最大位移延性系数, μ_{\min} 为最小位移延性系数或反向最大位移延性系数。在计算 γ 时,如 μ_{\max} 和 μ_{\min} 反向,则以负值代入,反之则以正值代入。

本文的目的是探索较高轴压比对低周疲劳寿命的影响。具体做法是首先完成一个偏高的轴压比下的对称位移循环低周疲劳试验系列,试验轴压比选定为 $n = 0.353$,共由五个试件组成,各试件的基本参数见附表。

附表 较高轴压比下对称位移循环试件主要参数

试件编号	$f_{c,150}$ (N/mm ²)	f (N/mm ²)	N (kN)	μ^a	$\Delta_1(+)$ (mm)	$\Delta_2(-)$ (mm)	N_f
CF-24	24.1	18.32	323.0	± 1.0	12.5	13.7	3 878
CF-25	31.2	23.71	418.0	± 1.5	12.5	13.5	378
CF-26	29.9	22.72	400.6	± 2.0	11.5	13.3	132
CF-11	40.7	30.93	545.3	± 2.0	12.0	12.3	21
CF-27	27.6	20.98	369.9	± 2.5	13.4	14.0	5

注:①取 $f = 0.76 f_{c,150}$;②试件 CF-24、CF-25、CF-26 和 CF-27 的主筋实测

屈服强度 378.7 N/mm²,试件 CF-11 的主筋实测屈服强度为 374.9 N/mm²。

这一试验系列的试件外形、尺寸、配筋及加载方式与前两个试验系列所用试件完全相同^{[1][2]},即柱截面 $h_c b_c = 250 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$,柱长 2 190 mm,柱截面为对称配筋,每侧主筋为 2 Φ 22。在柱高中部 350 mm 长度范围内柱截面加大为 300 mm \times 300 mm,以便与水平作动器可靠连接,并引导柱塑性铰出在紧邻加粗段的上、下柱段中。轴压力由一台 1 000 kN MTS 电液伺服式作动器施加,并在整个试验过程中直到试件破坏始终保持恒定;柱高中点水平位移由另一台 250 kN MTS 电液伺服式作动器施加,位移及位移变化速率自动控制。在循环次数偏少的试件中,每个循环的速度为 20-30 s。在循环次数较多的试件中,每个循环加快到 5-10 s。

1 偏高轴压比对称位移循环试件的受力特征及累积损伤发育规律

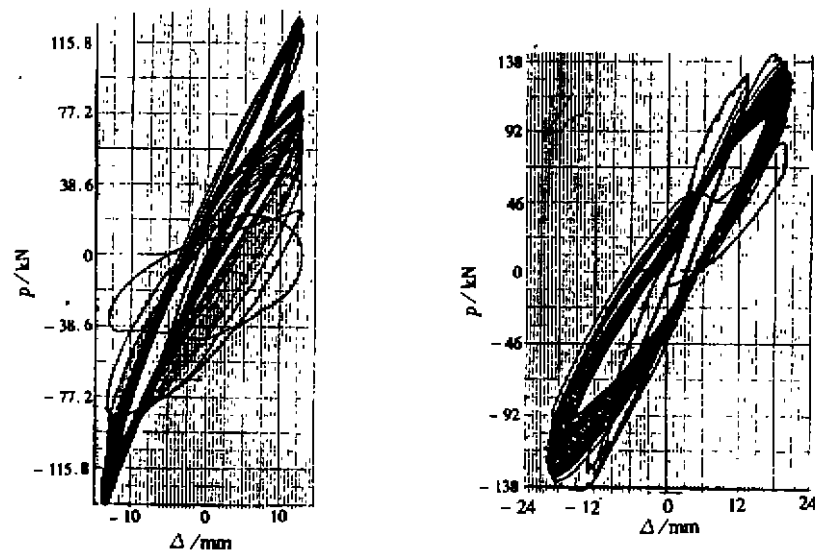
在图 1、3、4 中分别给出了试件 CF-24 和 CF-25、试件 CF-26 和 CF-11 以及试件 CF-27 的柱中点水平力-水平位移滞回曲线。这些试件由于轴压比偏大,相同位移延性系数下受压区混凝土的压应变相对偏大,受拉区裂缝开展宽度偏小,故不论位移延性系数大

小,滞回曲线的捏缩现象均不如较低轴压比下的试件那样明显,滞回环呈较饱满的梭形。

柱加粗段上、下塑性铰区的损伤累积过程与低轴压比时相似,大致也可以划分为以下三种类型,即 $\mu = 1.0$ 时的数千次多周数低周疲劳过程, $1.0 < \mu < 2.5$ 时的一般多周数低周疲劳过程和 $\mu \geq 2.5$ 时的少周数低周疲劳过程。这三种情况下的损伤发育速度及各阶段损伤特征详见文献[1]。

在表1所列的五个试件中,大部分试件正、反两侧的累积损伤均发育得比较均衡,只有 $\mu = \pm 1.0$ 的试件 CF-24, 其一侧的损伤发育明显快于另一侧,这看来是由于混凝土质量不均匀所致。

总的来看,由于各试件轴压比偏大,在相同位移延性系数下受压区混凝土的压应变明显大于轴压比较小的试件,从而导致较高轴压比试件疲劳寿命相对偏低。正因为如此,偏高轴压比试件所能达到的最大对称位移也随轴压比的增大而逐步减小,这与不同轴压比试件在一般低周交变加载试验中所表现出的规律是一致的^[3]。



a) 试件 CF-24 ($\mu = \pm 1.0$)

b) 试件 CF-25 ($\mu = \pm 1.5$)

(从 1 200 周到 3 800 周之间的滞回圈未画出)

图1 试件 CF-24、CF-25 柱中点水平力-水平位移滞回曲线

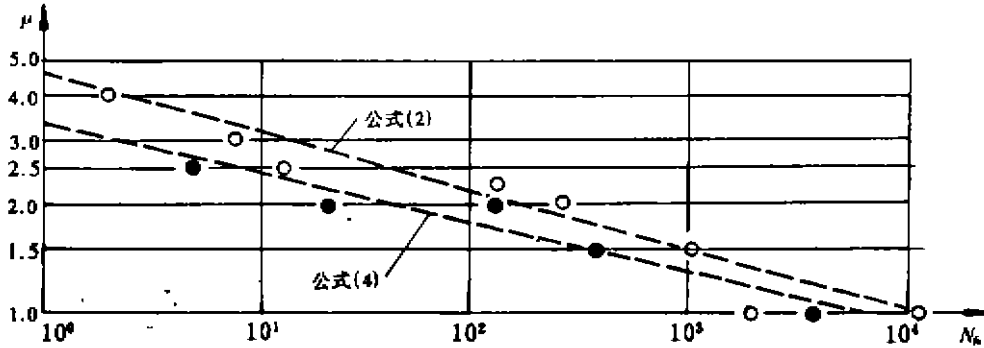
2 不同轴压比下对称位移循环钢筋混凝土柱的寿命曲线

将从以上试验获得的不同位移延性系数试件的低周疲劳寿命 N_f (即到破坏为止的循环次数) 标在图2的 $\log \mu - \log N_f$ 坐标中, 则可看出, 在双对数坐标中, $\mu - N_f$ 规律大致呈线性。在图2中还同时给出了 $n = 0.20$ 试验系列的试验结果, 以及依照该批结果拟合出的前文公式(2)。对于 $n = 0.353$ 的这一偏高轴压比试验系列可拟合出 $\mu - N_f$ 关系为:

$$\mu N_f^{0.139} = 3.40 \quad (4)$$

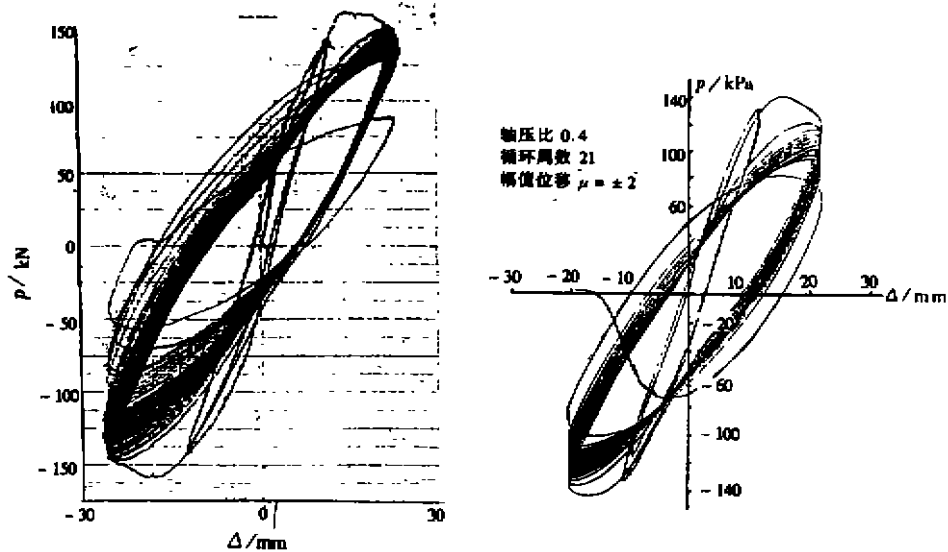
根据公式(2)、(4)又可进一步拟合出适用于不同轴压比钢筋混凝土柱的 $\mu - N_k$ 关系通用表达式为:

$$\mu N_k^{10 \cdot 192 - 0.15n} = 6.855(0.137)^n \quad (5)$$



(图中实心圆点为 $n = 0.353$ 的试验结果,空心圆点为 $n = 0.20$ 的试验结果)

图 2 钢筋混凝土矩形截面柱 $\log \mu - \log N_k$ 关系



a) 试件 CF-26 ($\mu = \pm 2.0$)

b) 试件 CF-11 ($\mu = \pm 2.0$)

图 3 试件 CF-26、CF-11 柱中点水平力-水平位移滞回曲线

在未经更小轴压比和更大轴压比钢筋混凝土柱的低周疲劳试验验证之前,大致可以认为上式的适用范围为 $n = 0.1 \sim 0.4$ 。

3 不同轴压比下非对称位移循环钢筋混凝土柱的低周疲劳寿命

本文还用了一个试件 CF-28 对较高轴压比下非对称位移循环柱的低周疲劳性能进行了

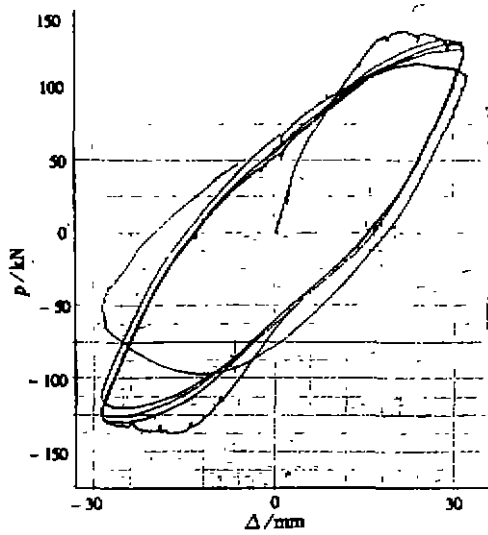


图4 试件CF-27($\mu = \pm 2.5$)柱中点
水平力-水平位移滞回曲线

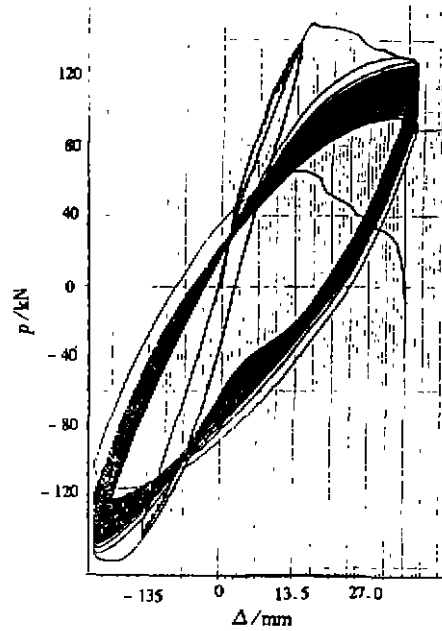


图5 非对称位移循环试件CF-28的柱中
点水平力-水平位移滞回曲线
($\mu_{max} = 2.5, \mu_{min} = -1.5$)

抽检。试件形状、尺寸及配筋同前,实测轴压比为 $n = 0.353$ 。正向屈服位移 $\Delta_1(+)$ = 140 mm,反向屈服位移 $\Delta_1(-)$ = 135 mm。正向位移延性系数为 $\mu = 2.5$,反方向为 $\mu = -1.5$ 。 $\gamma = \mu_{min}/\mu_{max} = -1.5/2.5 = -0.6$ 。试件 $f_{a,150} = 29.9 \text{ N/mm}^2, f_c = 22.72 \text{ N/mm}^2$,主筋实测屈服强度为 378.7 N/mm^2 ,轴向压力 $N = 406 \text{ kN}$ 。试件疲劳寿命为 $N_0 = 30$ 。

由于试件轴压比偏大,正向位移($\mu = 2.5$)下的受压区混凝土压应变较大,故试件低周疲劳属性由该处混凝土控制。在这一试件中未出现在较低轴压比试验中观察到的受拉钢筋发生低周疲劳拉断并控制试件疲劳寿命的现象。

从物理规律性角度推断,可以肯定,在 μ_{max} 和 γ 均相同的情况下,较高轴压比试件在非对称位移循环时其疲劳寿命高出对称位移循环下疲劳寿命的幅度将比偏低轴压比时为小,也就是由前文公式(3)等式右侧第二项所表示的增量,即 $(1 + \gamma)(\mu_{max} - 1)$ 将偏小。而且下降的幅度将随轴压比的升高而增大。参照上述试验结果,本文建议,对于不同轴压比下的非对称位移循环试件可取其低周疲劳寿命 N_0 的计算公式为:

$$\log N_0 = \log N_0 + (1.1 - 0.5n)(1 + \gamma)(\mu_{max} - 1) \quad (6)$$

式中 N_0 为对称位移循环时的低周疲劳寿命,可按本文公式(5)计算; n 为试验实测轴压比,取 $n = N/f_c b_c h_c$,其中 N 为柱轴压力, b_c, h_c 分别为柱截面垂直于受力方向和沿受力方向的边长, $f_c = 0.76f_{a,150}$; $\gamma = \mu_{min}/\mu_{max}$,当 μ_{max} 与 μ_{min} 反向时,取 μ_{min} 为负值代入,即 γ 亦为负值,否则 μ_{min} 取正值。 μ_{max}, μ_{min} 分别为正向和反向(或正向较小)位移延性系数,即该方向实际位移与沿该方向加载受拉钢筋首次屈服时位移的比值。

参 考 文 献

- 1 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. 重庆建筑大学学报,1996,18(2)
- 2 刘伯权,黄宗明,张友为,白绍良. 非对称位移循环下钢筋混凝土柱的低周疲劳性能. 重庆建筑大学学报,1996,18(2)
- 3 黄行松,钟树生,黄宗明,白绍良. 恒定轴力作用下钢筋混凝土框架柱的抗震性能. 混凝土结构节点连接与抗震构造研究与应用. 北京:中国建筑工业出版社,1996 3

Cyclic Fatigue Behaviors of Reinforced Concrete Columns With Various Axial Force Ratios

Bai Shaoliang Zhang Youwei Huang Zongming

(Faculty of Civil Engineering, Chongqing Jianzhu University, 630045)

Abstract Through a series of tests, after the establishment of a cyclic fatigue life formula for symmetric and unsymmetric cyclic displacements of rectangular reinforced concrete columns with lower axial force ratios, another series of tests are carried out to investigate the cyclic fatigue life at various coefficients of displacement ductility of reinforced concrete columns with higher axial force ratios. A cyclic fatigue life formula is put forward according to the test results and on the basis, a cyclic fatigue life formula which is applicable to reinforced concrete columns at a range of axial force ratios is suggested.

Key Words reinforced concrete, earthquake resistant frame, failure criterion, cyclic fatigue life, axial force ratio

(编辑:刘家凯)