

文章编号:1673-2049(2019)05-0021-10

考虑初始荷载的火灾后 RC 柱抗震性能

霍静思^{1,2}, 杨鑫鑫¹, 李 智¹

(1. 湖南大学 建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082;
2. 华侨大学 福建省智慧基础设施与监测重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要:为研究初始荷载作用对火灾后钢筋混凝土(RC)柱抗震性能的影响,分别对 3 根高温后 RC 柱和 2 根常温对比试件进行滞回加载试验。比较分析了不同初始荷载作用下试件的温度场变化、滞回曲线、骨架曲线和破坏模式,重点研究了不同初始荷载与高温冷却全过程对钢筋混凝土柱的破坏模式、剩余变形、剩余承载力、抗弯刚度与延性以及耗能能力的影响。结果表明:初始荷载作用对钢筋混凝土柱高温后的抗震性能影响显著,且存在一定尺寸效应;初始荷载作用时,随着轴压比增大,高温后试件的破坏模式由弯曲破坏变为压溃破坏;初始荷载的作用不仅影响柱截面温度场,而且使得高温后试件产生剩余压缩变形,轴压比越大,剩余压缩变形越大,剩余承载力和抗弯刚度均呈增大趋势,而延性和耗能能力呈下降趋势;高温冷却作用使得试件的承载力、抗弯刚度、延性以及耗能能力总体呈现不同程度的退化;建议在对受火后钢筋混凝土柱进行损伤评估和抗震性能研究时,应合理考虑初始荷载作用和尺寸效应的影响。

关键词:钢筋混凝土柱;高温;抗震性能;初始荷载;尺寸效应;轴压比

中图分类号:TU375.3

文献标志码:A

Seismic Performance of Post-fire RC Columns with Pre-load

HUO jing-si^{1,2}, YANG Xin-xin¹, LI Zhi¹

(1. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory of Intelligent Infrastructure and Monitoring, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China)

Abstract: In order to study the effects of pre-loads on the seismic performance of post-fire reinforced concrete (RC) columns, the cyclic loading tests were carried out on three RC columns after high temperature and two specimens at room temperature, respectively. By comparing and analyzing the variation of temperature field, hysteresis curve, skeleton curve and failure mode of specimens under different pre-loads, the effects of different pre-loads and high temperature cooling process on failure mode, residual deformation, residual bearing capacity, flexural stiffness and ductility, and energy dissipation capacity of reinforced concrete columns were emphatically studied. The results show that the effect of pre-load on seismic behavior of reinforced concrete columns after high temperature is significant, and there is a certain size effect. When the pre-load is applied, with the increase of the axial compression ratio, the failure modes of specimens change from bending failure to crushing failure after high temperature. The pre-load not only affects the temperature field of the column section, but also causes the residual

收稿日期:2018-11-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51378200);上海市工程结构安全重点实验室开放课题(2016-KF09)

作者简介:霍静思(1970-),男,吉林梨树人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:huojingsi@hqu.edu.cn。

compressive deformation of the specimen after high temperature. The larger the axial compression ratio is, the larger the residual compression deformation is, the larger the residual bearing capacity and flexural rigidity are, while the ductility and energy dissipation capacity show a downward trend. High temperature cooling makes the bearing capacity, flexural rigidity, ductility and energy dissipation capacity of the specimens degenerate to varying degrees. It is suggested that the influence of pre-load and size effect should be reasonably considered in damage assessment and seismic performance study of reinforced concrete columns after fire.

Key words: RC column; high temperature; seismic performance; pre-load; size effect; axial compression ratio

0 引言

火灾不仅导致材料的力学性能和钢筋-混凝土之间的黏结性能劣化^[1-2],而且使结构遭受显著的温度内力及内力重分布^[3],尤其是火灾后钢筋混凝土(RC)框架易形成“强梁弱柱”的不利机制^[4]。因此,钢筋混凝土结构火灾后剩余承载力评估,尤其是抗震性能评估对于合理评估结构的安全性与制定灾后修复加固策略至关重要。

国内外已经展开了大量火灾(高温)后钢筋混凝土构件轴压力学性能^[5-7]与抗震性能^[8-12]研究,由于受试验条件限制,大部分试件截面尺寸较小或未考虑初始荷载的影响。近年来,部分学者开始研究初始荷载作用对火灾全过程的轴压力学性能影响,如 Jau 等^[13]研究了轴压比 0.2 作用下单向和双向偏心受压钢筋混凝土柱高温后的力学性能,提出冷却过程中试件轴向变形恢复是因温度降低而非轴向荷载。Chen 等^[14]进行了轴压比 0.1 作用下火灾后钢筋混凝土角柱的轴压试验和双向偏心受压力学性能的试验研究。上述文献轴压比较小,Huo 等^[15-16]进行了大轴压比的有约束应力标准棱柱体 RC 短柱高温后轴压力学性能研究,发现轴压荷载影响显著,一定水平的约束应力能抑制温度裂缝的开展,提高残余承载力。陈俊等^[17]进一步研究了截面尺寸为 300 mm×300 mm 的高温后 RC 短柱轴压力学性能,试验结果与以往小尺寸试件试验结果^[15-16]差异显著,随着等效温度升高,承载力损伤系数离散程度变小,说明尺寸效应显著。另外,张家铭等^[18]的研究也发现了类似现象。同时,考虑初始荷载影响的火灾后 RC 柱抗震性能也开始得到关注,张家广^[19]研究了火灾后足尺圆 RC 柱的滞回性能,发现随着升温时间的延长,出现了保护层大面积剥落、纵筋屈曲的破坏模式。徐玉野等^[20]通过试验研究发现轴压比、受火时间对火灾后 RC 短柱抗剪承载力影响显著,破

坏模式与常温下类似。

综上所述,目前缺乏大轴压比下足尺方形截面火灾后 RC 柱抗震性能的研究。因此,本文进行大轴压比的方形钢筋混凝土柱抗震性能研究,设计了 5 根钢筋混凝土柱,分别进行高温后和常温下的低周往复滞回试验,重点研究了不同轴压比的初始荷载对高温后钢筋混凝土柱破坏模式和剩余力学性能的影响。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

共设计 5 个钢筋混凝土柱试件,其中 3 个进行高温后低周往复滞回试验,2 个为常温对比试件。试验参数为轴压比、受火时间,试件概况如表 1 所示。柱的有效高度(从底座顶面到水平力加载点的距离)为 1 200 mm,柱截面尺寸均为 254 mm×254 mm,底部基础尺寸为长 1 850 mm、宽 500 mm、高 350 mm,为避免试件在端部连接处发生局部破坏,在其顶部设置截面为 300 mm×300 mm、高 400 mm 的扩大头,且配置 2 层钢筋网片,间距为 60 mm。试件纵向钢筋对称配置,每侧配置 3 根直径为 14 mm 的 HRB400 钢筋,截面纵筋配筋率为 1.91%。箍筋采用普通封闭式箍筋,配置直径为 8 mm 的 HRB400 钢筋,间距 80 mm,体积配筋率为 1.18%。试件尺寸和截面配筋、试件实物如图 1 所示。

试件制作分 2 次浇筑,先浇筑底座混凝土,后浇筑试件柱身混凝土。为消除二次浇筑对柱底部截面的影响,在基础混凝土凝固前清除沿柱身尺寸向下 120 mm 深度内的混凝土。浇筑完成后浇水养护 7 d,自然养护 28 d,6 个月后进行高温和往复加载拟静力试验。

1.2 材料性能

试件采用自拌 C40 混凝土,其中水泥为 42.5R 普通硅酸盐水泥,砂为河砂,石子为碎石,粒径为

表 1 试件参数
Tab. 1 Parameters of Specimens

试件编号	f_{cu}/MPa	f'_{cu}/MPa	轴压比 n	受火时间 t/min
E-0.3	45.1	49.5	0.3	
E-0.6	45.1	49.5	0.6	
FE-0	36.8	40.2	0.0	90
FE-0.3	36.8	40.2	0.3	90
FE-0.6	48.0	50.0	0.6	90

注:试件编号中,“E”表示试件经地震作用,“F”表示试件经受高温作用,数字代表试件的试验轴压比,如“0.3”代表轴压比为 0.3; f_{cu} 、 f'_{cu} 分别为自然养护 28 d 和试验时的试件立方体抗压强度;轴压比 $n=N/(Af_c)$,其中, $f_c=0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f'_{cu}=0.67f'_{cu}$ ^[21], α_{c1} 为棱柱体强度与立方体强度之比, α_{c2} 为混凝土脆性折减系数, A 为截面面积, N 为初始荷载。

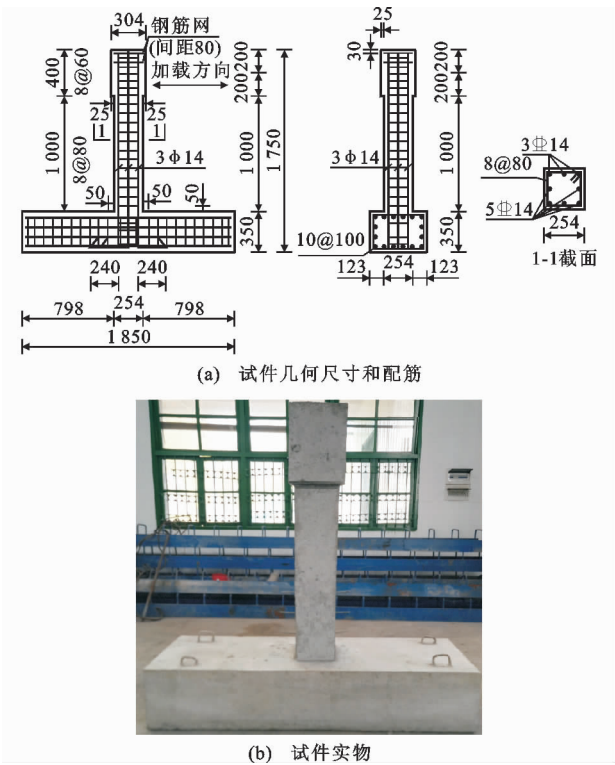


图 1 试件设计(单位:mm)
Fig. 1 Design of Specimen (Unit:mm)

5~20 mm,拌合水用自来水。水泥、水、砂、石子用量分别为 513,205,513,1 144 kg·m⁻³,根据 GB 50081—2002^[22]得到各批混凝土立方体标准试块 28 d 和试验时的实测强度见表 1。

柱身配筋均采用 HRB400 级钢筋,按照规范 GB/T 228—2010^[23]实测纵筋的屈服强度和抗拉强度分别为 473.4 MPa 和 606.2 MPa,箍筋的屈服强度和抗拉强度分别为 433.3 MPa 和 575 MPa。

1.3 试验装置与方法

试验装置如图 2 所示。采用由 4 块平板电加热

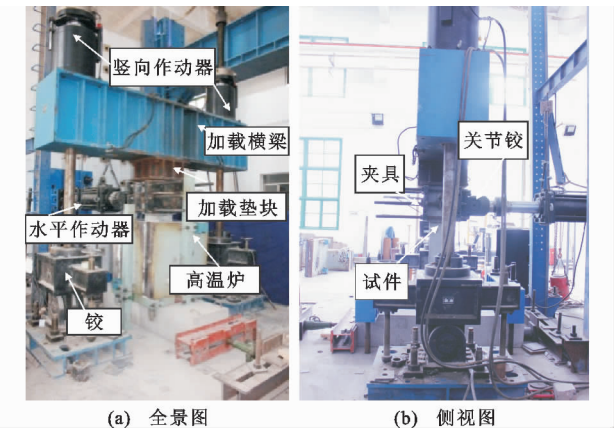


图 2 试验装置
Fig. 2 Test Setup

模块装配组成的箱式高温炉^[24-29]进行升温,控制系统采用 RSY 型智能温度柜。加载系统包括竖向加载装置和水平电液伺服作动器。竖向加载装置由 2 个球铰、2 个竖向电液伺服作动器及 1 个加载横梁组成,作动器的量程为 2 000 kN,铰的转动量程为 ±35(x),0(y);水平电液伺服作动器用于低周往复加载,行程为 500 mm,量程为 1 000 kN。

试验包括升降温与低周往复加载 2 个部分。试验前,进行几何对中并通过两侧压梁固定底座。同时,将柱顶放置加载垫块并通过两侧竖向作动器施加恒定初始荷载。升降温过程中,采用 ISO 834 标准升降温曲线,升温至 90 min 时,降温冷却。为控制降温曲线,在炉内降温到 500 ℃时采用风扇辅助散热,当轴向变形不再变化时卸载^[15-16]。低周往复加载时,通过关节铰和夹具与柱头水平连接,且用自平衡装置消除水平作动器和夹具自重对水平力的影响;在柱顶施加竖向恒载;最后,对试件施加水平往复荷载,先推后拉(以推为正向)。

水平低周循环往复加载制度根据 JGJ 101—2015^[30]和文献[31],[32],并结合试验条件来制定,见图 3。试验采用荷载和位移混合控制加载制度:试件屈服前,采用荷载控制,以 20 kN 为级差,分级加载,每级循环 1 次;试件屈服后,采用位移 Δ 控制,以 0.5 倍屈服位移 Δ_y 为级差,分级加载,每级循环 3 次。取试件底部纵筋应变达到屈服时对应的位移作为屈服位移。当第 1 次循环的水平荷载下降至峰值荷载的 85% 以下时,认为试件发生破坏并停止加载。

1.4 试验测量

高温试验中,采用热电偶测量各测点温度变化,温度测点布置在距柱底部 500 mm 截面处,具体测

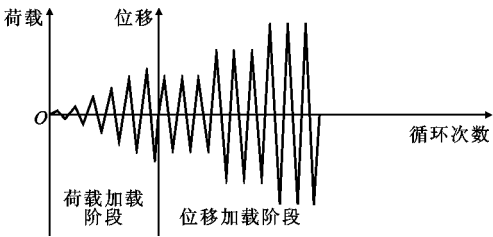


图 3 加载制度

Fig. 3 Loading System

点位置如图 4(a)所示。同时,通过竖向作动器测量竖向荷载和轴向变形。

低周往复试验中,钢筋应变测点均布置于侧面纵筋和箍筋,如图 4(b)所示;分别通过竖向作动器和水平作动器测量轴力、竖向位移以及水平力、横向位移。同时,将位移计与锚固在混凝土柱中的螺杆相连,以测量试验中的位移变化,其布置与实物分别如图 4(c),(d)所示。

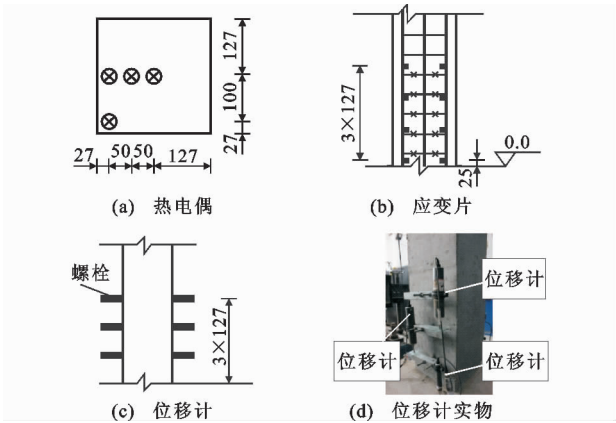


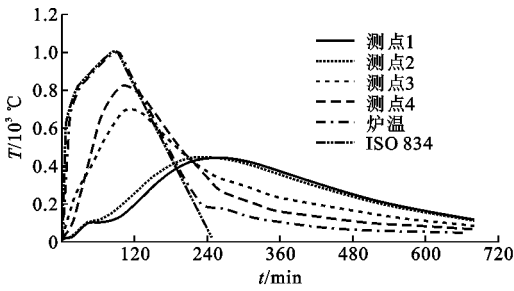
图 4 测点布置(单位:mm)

Fig. 4 Locations of Measuring Points (Unit:mm)

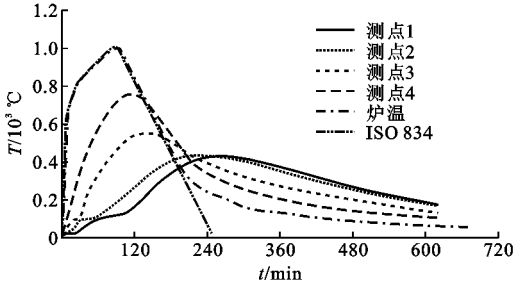
2 试验结果与分析

2.1 温度场

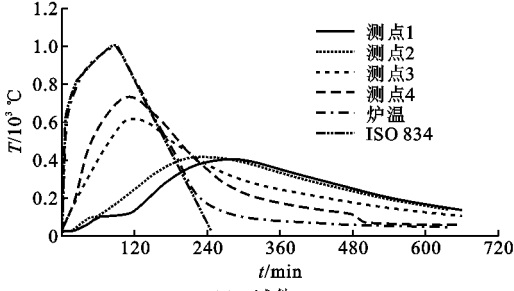
图 5 给出了高温后试件的炉膛温度、测点温度及 ISO 834 标准升降温-时间($T-t$)关系曲线。由图 5 可见:随着炉膛温度的升高,各测点温度升高,且角部测点 4、表面测点 3、测点 2 以及截面中心测点 1 的升温速率依次降低;炉膛温度开始下降时(120 min),表面测点 3 和角部测点 4 的温度迅速下降,而由于混凝土的热惰性,内部测点 1 和测点 2 的温度继续升高,约在 240 min 后才开始缓慢下降。测点 1 和测点 2 在 100 °C 时形成平台,主要因为试件混凝土内水分的蒸发和迁移。随着轴压比的增大,高温后试件各测点的最高温度依次下降,且外部测点 3 和测点 4 比核心区测点下降明显,但试件 FE-0.3



(a) 试件 FE-0



(b) 试件 FE-0.3



(c) 试件 FE-0.6

图 5 实测温度-时间曲线

Fig. 5 Measured Temperature-time Curves

和 FE-0.6 的测点最高温度差别较小,这表明初始荷载的存在对温度场有影响,但轴压比为 0.3 和 0.6 的初始荷载影响差别不大。

2.2 温度变形

升降温全过程中,柱顶部轴向位移-时间($\delta-t$)关系曲线见图 6,变形以膨胀为正。由图 6 可以看出:各试件均呈现先膨胀后压缩的变化趋势;随轴压比的增大,试件产生的最大轴向膨胀变形变小,且达到最大轴向膨胀变形的时间变短;轴压比越大,试件产生的轴向压缩变形越大,且在变形趋于稳定前的压缩变形速率越大。完全冷却后,无初始荷载作用的试件 FE-0 残余膨胀变形最小,而有初始荷载的试件 FE-0.3,FE-0.6 分别产生了不同程度的残余压缩变形,且轴压大的试件残余压缩变形大。

2.3 破坏形态

各试件的最终破坏形态如图 7 所示。对于常温试件,当试验轴压比为 0.3 时,试件 E-0.3 发生了弯曲破坏形态,两侧裂缝近似平行且对称开展,裂缝数

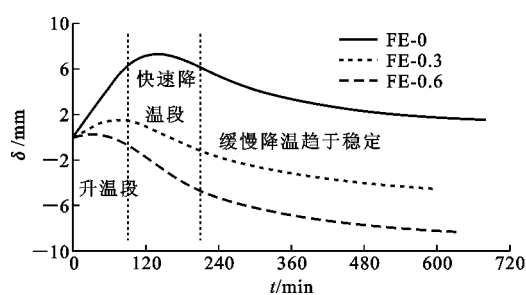


图 6 轴向变形-时间曲线

Fig. 6 Axial Deformation-time Curves

量多、宽度窄;轴压比较大时,试件 E-0.6 发生剪切破坏,变形集中于柱脚区域,约 1.5 倍柱截面高度范围内,1 条主斜裂缝将柱上下断开并错动,裂缝数量少,纵筋曲折且箍筋屈曲。高温后试件 FE-0 发生了弯曲破坏形态,裂缝数量多、宽度小,且水平向发展;高温后试件 FE-0.3 发生典型的弯曲破坏,裂缝开展形式与试件 E-0.3 类似,但塑性区域扩大,底部箍筋松开;高温后试件 FE-0.6 中部发生压溃破坏,裂缝竖向开展并部分剥落。



图 7 试件破坏形态

Fig. 7 Failure Modes of Specimens

比较各试件的破坏形态可以得出:随着轴压比增大,常温试件的破坏形态由弯曲破坏变为剪切破坏,高温后试件的破坏形态由弯曲破坏变为压溃破坏,这说明试件性能随轴压比增大而变差;轴压比为 0.6 时,试件由常温时剪切破坏变为高温后压溃破坏,这说明轴压比越大,高温后试件抗震性能越差;常温和高温后试件的塑性铰区域均随轴压比的增大而增大;高温后破坏的位置相对于常温试件均有所上升,即塑性铰上移,轴压比越大上移越多。

本文试验中破坏形态的变化规律与文献[19]试验存在差异,文献[19]中钢筋混凝土圆柱在轴压比 0.3,0.5 下经受 1 h 高温和在轴压比 0,0.2 下经受 2 h 高温后均呈现表面混凝土大面积剥落且两侧纵筋压屈的破坏形态。

2.4 滞回曲线

各试件顶部水平荷载-位移($P-\Delta$)滞回曲线如图 8 所示。加载初期,试件处于弹性阶段,曲线斜率均基本不变,残余变形较小;随着水平加载位移增大到屈服位移 Δ_y 后,试件屈服且残余变形开始增大,滞回环水平倾斜且包络面积增大;水平荷载达到峰值后,同级循环的刚度退化随循环次数增加而增大,且水平位移越大,同级循环刚度退化越多。无论常温或高温后试件,轴压比越小,破坏时极限位移越大,滞回环越饱满。相同轴压比下,高温后试件残余变形比常温试件大;高温后试件各级滞回环所包络面积比常温试件大;高温后试件破坏时水平位移均不大于常温试件。

2.5 $P-\Delta$ 骨架曲线

图 9 为各试件的水平荷载-位移($P-\Delta$)骨架曲线。由图 9 可知:常温与高温后试件峰值荷载均随着轴压比的增大而增大,且对应的位移减小;轴压比越小,骨架曲线越平缓,且极限位移越大。轴压比对高温后试件的峰值荷载及对应位移的影响比对常温试件的影响大。相同轴压比下,高温后试件的峰值荷载比常温试件的大,骨架曲线下降段更平缓,且轴压比越大,高温对平缓程度的影响越明显。

2.6 剩余承载力

表 2 给出了各试件的屈服荷载 P_y 、屈服位移 Δ_y 、峰值荷载 P_m 、峰值位移 Δ_m 、极限荷载 P_u 、极限位移 Δ_u 、延性系数 μ 等骨架曲线特征值。表 2 中屈服位移 Δ_y 定义为 $\Delta_y = P_u / K_{re}$,其中 K_{re} 为 $P-\Delta$ 骨架曲线荷载为 70% P_u 时对应的割线刚度^[31],极限荷载 P_u 按峰值荷载 P_m 的 85% 确定,骨架曲线下降段不明显时按实测极限值确定。

从表 2 可以看出:常温和高温后试件的屈服荷载、峰值荷载和极限荷载均随轴压比的增大而增大;高温后试件与相同轴压比常温试件相比,其屈服荷载、峰值荷载和极限荷载均呈现出不同程度的降低,试件 FE-0.3 与 E-0.3 相比,屈服荷载、峰值荷载和极限荷载分别下降了 30.0%,33.6%,29.0%。试件 FE-0.6 与 E-0.6 相比,屈服荷载、峰值荷载和极限荷载分别下降了 42.4%,32.6%,26.5%;轴压比变化对高温后试件峰值荷载影响比常温试件略大,

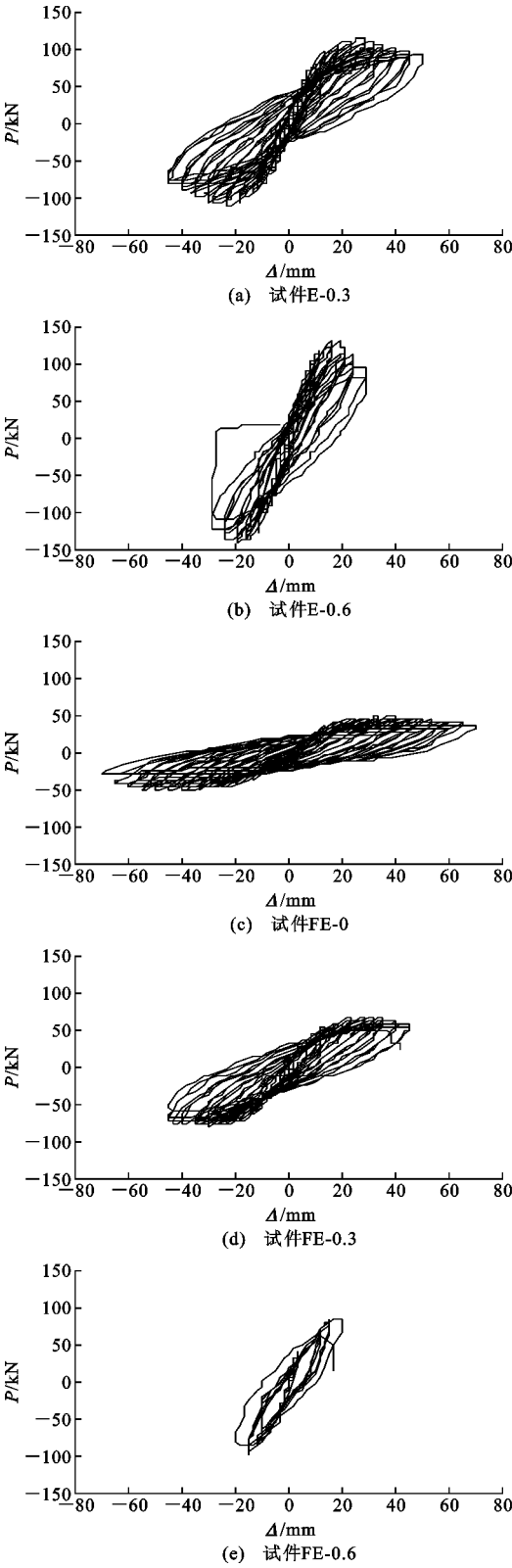


图8 试件 $P-\Delta$ 滞回曲线

Fig. 8 $P-\Delta$ Hysteretic Curves of Specimens

试件 FE-0.6 的峰值荷载比试件 FE-0.3 增大了 23.2%，试件 E-0.6 的峰值荷载比试件 E-0.3 增大了 21.5%。

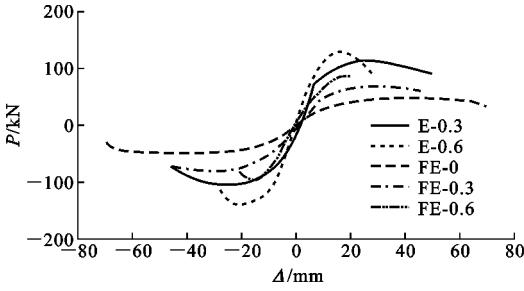


图9 试件 $P-\Delta$ 骨架曲线

Fig. 9 $P-\Delta$ Skeleton Curves of Specimens

2.7 抗弯刚度

图 10 为试件弯矩-曲率($M-\phi$)骨架曲线。从图 10 可以看出:随着轴压比的增大,高温后试件和常温试件的弯矩-曲率骨架曲线均表现出强化特性,且刚度有所提高。表 2 也给出了各试件的初始抗弯刚度 K_{ie} 和使用阶段抗弯刚度 K_{se} ,在弯矩-曲率曲线上取 $0.2M_{ue}$ (M_{ue} 为极限抗弯承载力)对应的割线刚度均值为初始抗弯刚度 K_{ie} ,即 $K_{ie} = 0.2M_{ue}/\phi_{0.2}$,取 $0.6M_{ue}$ 对应的割线刚度均值为使用阶段抗弯刚度 K_{se} , $0.6M_{ue}$ 为试件最大抗弯承载力, $\phi_{0.2}$ 、 $\phi_{0.6}$ 分别为 $0.2M_{ue}$ 、 $0.6M_{ue}$ 对应的曲率值^[33]。

从表 2 初始抗弯刚度 K_{ie} 和使用阶段抗弯刚度 K_{se} 可以看出:常温试件和高温后试件的 K_{ie} 、 K_{se} 均随轴压比的增大而增大;高温后试件与常温试件相比, K_{ie} 、 K_{se} 均降低, K_{se} 受损程度随轴压比增大而降低, K_{ie} 却没有明显变化,试件 FE-0.3 与试件 E-0.3 相比, K_{ie} 、 K_{se} 分别下降了 26.8%、51.9%,试件 FE-0.6 与试件 E-0.6 相比, K_{ie} 、 K_{se} 分别下降了 26.3%、34.0%;轴压比变化对高温后试件的 K_{se} 影响比常温试件大,对 K_{ie} 影响与常温试件相比无明显变化,试件 FE-0.6 的 K_{ie} 、 K_{se} 比试件 FE-0.3 分别增大 67.8%、85.9%,试件 E-0.6 的 K_{ie} 、 K_{se} 比试件 E-0.3 分别增大 66.4%、46.5%。

2.8 延性

从表 2 中延性系数 μ 可以看出:高温后和常温试件的延性系数 μ 均随轴压比的增大而减小;相同轴压比高温后试件比常温试件的延性系数小,且轴压比越小,降低越多,轴压比 0.3 时,试件 FE-0.3 延性系数比 E-0.3 下降 25.6%,轴压比 0.6 时,试件 FE-0.6 延性系数比 E-0.6 下降 21.4%;轴压比增大对高温后试件延性系数的影响比常温试件小,试件 FE-0.6 的延性系数比试件 FE-0.3 降低 27.5%,试件 E-0.6 的延性系数比试件 E-0.3 降低 31.4%。

2.9 耗能能力

采用循环加载滞回环与位移轴所包围面积 S

表 2 试件骨架曲线特征值

Tab. 2 Characteristic Values of Skeleton Curves of Specimens

试件编号	P_y/kN	Δ_y/mm	P_m/kN	Δ_m/mm	P_u/kN	Δ_u/mm	μ	$K_{ie}/(\text{kN} \cdot \text{m}^2)$	$K_{se}/(\text{kN} \cdot \text{m}^2)$
E-0.3	78.2	9.2	110.8	22.5	94.1	41.0	4.49	10 396	5 296
E-0.6	102.1	8.4	134.5	18.0	114.3	25.8	3.08	17 304	7 758
FE-0	35.0	13.2	48.4	39.8	41.1	64.6	4.89	2 069	1 410
FE-0.3	57.9	13.5	73.6	27.1	66.8	45.1	3.34	7 606	2 753
FE-0.6	58.8	8.5	90.6	18.2	84.0	20.5	2.42	12 759	5 117

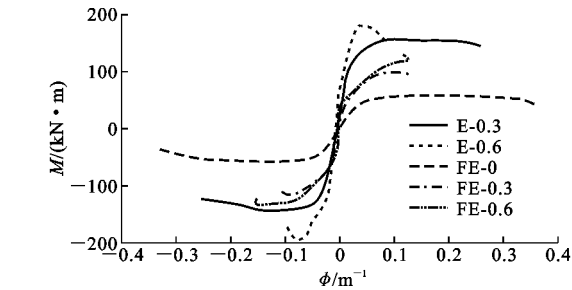


图 10 试件 $M-\phi$ 骨架曲线

Fig. 10 $M-\phi$ Skeleton Curves of Specimens

来表征试件在低周反复荷载作用下的耗能。各试件的滞回环面积随柱顶部位移的变化曲线如图 11 所示。由图 11 可以看出:各试件滞回环面积随柱顶部位移的增大而增大;相同加载位移下,滞回环面积随循环次数的增大而减小,但随着加载位移的增大,循环次数的影响越来越不明显;相同位移下高温后和常温试件滞回环面积均随轴压比增大而增大,表明大轴压比的试件弹性阶段短,在加载初期较早进入塑性;相同轴压比的试件,轴压比为 0.3 的高温后试件各滞回环面积比常温试件小,轴压比为 0.6 的每级面积差别不大,但破坏时位移和耗能面积均较常温小,这表明高温作用使得钢筋混凝土柱的耗能性能降低;高温后试件随轴压比的减小,极限位移和破坏时滞回环面积增大,且曲线趋于平缓,这表明高温后钢筋混凝土柱的耗能能力随轴压比增大而减小。

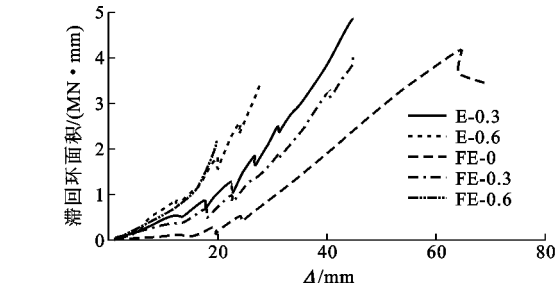
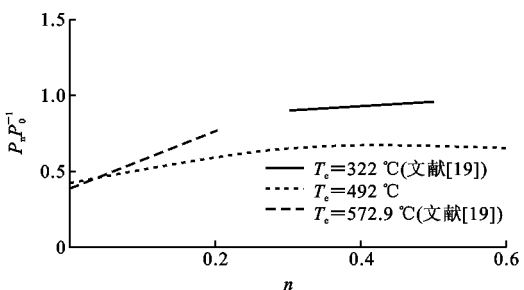


图 11 滞回环面积

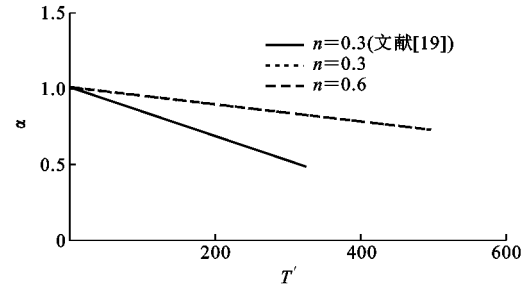
Fig. 11 Area of Hysteretic Loops

2.10 尺寸效应分析

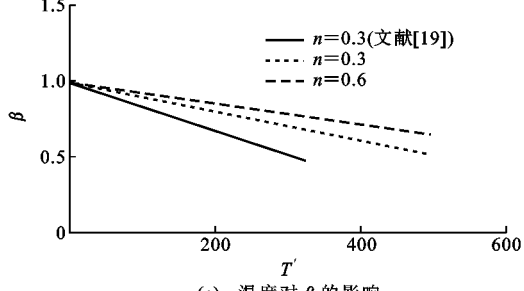
图 12 统计了本文试验(柱截面为 254 mm ×



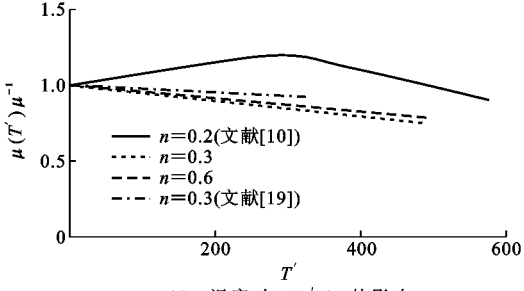
(a) 轴压比对 P_n/P_0 的影响



(b) 温度对 α 的影响



(c) 温度对 β 的影响



(d) 温度对 $\mu(T')/\mu$ 的影响

图 12 试件损伤系数

Fig. 12 Damage Coefficients of Specimens

254 mm)和文献[19]中钢筋混凝土足尺圆柱(柱直径 320 mm),以及文献[10]中试件(柱截面为 200 mm × 200 mm)的承载力损伤系数 P_n/P_0 、初始抗弯

刚度损伤系数 α 、使用阶段抗弯刚度损伤系数 β 和延性损伤系数 $\mu(T')/\mu$ 的变化规律,其中 P_n, P_0 分别为高温后试件水平力峰值与常温试件的水平力峰值, α 为高温后试件初始抗弯刚度与常温试件的比值, β 为高温后试件使用抗弯刚度与常温试件的比值, $\mu(T')/\mu$ 为高温后试件延性系数与常温试件的比值, T_e 为截面等效温度, T' 为高温时温度。

轴压比对高温后钢筋混凝土柱承载力损伤系数 P_n/P_0 的影响规律如图 12(a)所示,可见,初始荷载对承载力损伤影响显著。本文高温后试件承载力损伤系数在轴压比 0~0.3 内随轴压比的增大而增大,轴压比 0.3~0.6 内则变化不明显。文献[19]中 2 个等温系列承载力损伤系数均随轴压比增大而增大。截面尺寸增大、配筋率减小、受火时间变长均导致高温后承载力损伤增大,而文献[19]中轴压比 0~0.3 的试件损伤仍比本文试件小。

图 12(b),(c)分别给出了截面温度对初始抗弯刚度损伤系数 α 和使用阶段抗弯刚度损伤系数 β 的影响规律。 α, β 均随等效温度的升高而减小。本文中轴压比 0.3 和 0.6 的试件,轴压比对 α 影响不大,但 β 随轴压比的增大稍有减小。文献[19]中等效温度低于本文试验, α, β 均较小于本文试件,原因可能为其试件混凝土发生了显著爆裂现象。

图 12(d)给出了截面等效温度对延性损伤系数影响的规律。不同轴压比下,高温后试件延性损伤系数均随等效温度的升高而减小。本文试验延性损伤系数随轴压比(0.3~0.6)的增大稍有增大。文献[10]由于在高温过程中未施加初始荷载,其延性损伤系数随等效温度的增大呈先增大后减小的趋势,说明初始荷载使得钢筋混凝土柱产生显著延性损伤,但随着轴压比的增大,延性损伤有所降低。

对比不同尺寸的试件可知,文献[15],[16]的小尺寸柱高温后轴压试验中,高温后试件承载力未见明显损失,认为是因为小尺寸试件在升降温全过程中产生更显著的瞬态热应变,以致其内部应力松弛和释放,缓解了水泥浆和骨料间的黏结破坏过程;然而,文献[17]的大尺寸试验中并未出现此现象,这可能是由于更大的截面尺寸造成更大的温度梯度,其不利影响比初始荷载有利影响更明显。此外,比较本文试验和文献[19]中高温后 RC 柱抗弯试验,初始荷载对剩余承载力的影响规律存在一定差异,其原因可能是不同截面尺寸下影响温度梯度分布。因此,有初始荷载作用的高温后钢筋混凝土柱力学性能的尺寸效应不可忽略。

3 结 语

(1)常温试验中,小轴压比试件发生弯曲破坏,而大轴压比时呈现剪切破坏形态。高温后试验中,小轴压比试件呈现弯曲破坏,而大轴压比下却为压溃破坏形态。这表明轴压比对高温后试件的破坏模式影响显著。

(2)初始荷载的作用对升降温全过程后试件的剩余承载力、抗弯刚度和延性均有较大影响,且对剩余承载力的影响程度明显大于对延性的影响。初始荷载作用时,其尺寸效应影响应该引起关注。

(3)相比小轴压比情况下,大轴压比试件在经历高温后,不仅延性系数和耗能能力相对较小,而且其温度场也偏低,轴向残余压缩变形相对较大。

参考文献:

References:

- [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.
WU Bo. Mechanical Properties of Reinforced Concrete Structures After Fire [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [2] 张智梅, 叶志明, 刘涛. 钢筋混凝土结构抗火研究进展[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(1): 127-135.
ZHANG Zhi-mei, YE Zhi-ming, LIU Tao. Research Progress in Fire Resistance of Reinforced Concrete Structures[J]. Journal of Natural Disasters, 2007, 16(1): 127-135.
- [3] 吴波, 何喜洋. 高温下钢筋混凝土框架的内力重分布研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(9): 54-61.
WU Bo, HE Xi-yang. A Study on the Redistribution of Internal Forces in Reinforced Concrete Frames Under High Temperature [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(9): 54-61.
- [4] 肖建庄, 谢猛. 高性能混凝土框架火灾后抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(8): 36-42.
XIAO Jian-zhuang, XIE Meng. An Experimental Study on the Seismic Behavior of HPC Frames After Fire [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(8): 36-42.
- [5] LIN C H, CHEN S T, HWANG T L. Residual Strength of Reinforced Concrete Columns Exposed to Fire[J]. Journal of Chinese Institute of Engineers, 1989, 12(5): 557-566.
- [6] LIN C H, TSAY C S. Deterioration of Strength and Stiffness of Reinforced Concrete Columns After Fire [J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers,

- 1990,13(3):273-283.
- [7] LIN C H, CHEN S T, YANG C A. Repair of Fire-damaged Reinforced Concrete Columns [J]. ACI Structural Journal, 1995, 92(4): 406-411.
- [8] 马忠诚, 吴波, 欧进萍. 四面受火后钢筋砼柱抗震性能研究[J]. 计算力学学报, 1997, 14(4): 443-453.
MA Zhong-cheng, WU Bo, OU Jin-ping. Seismic Characteristics of R. C. Columns After Fire in All Sides[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 1997, 14(4): 443-453.
- [9] 吴波, 马忠诚, 欧进萍. 火灾后钢筋混凝土结构的抗震性能研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1996, 29(1): 9-16.
WU Bo, MA Zhong-cheng, OU Jin-ping. Study on the Aseismic Characteristics of RC Structures After Fire [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1996, 29(1): 9-16.
- [10] 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.
WU Bo, MA Zhong-cheng, OU Jin-ping. Experimental Study on Seismic Properties of R. C. Columns After High Temperature[J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(2): 53-58.
- [11] NI S, BIRELY A C. Post-fire Seismic Behavior of Reinforced Concrete Structural Walls [J]. Engineering Structures, 2018, 168: 163-178.
- [12] 徐玉野, 杨清文, 吴波, 等. 高温后钢筋混凝土短柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(8): 12-19.
XU Yu-ye, YANG Qing-wen, WU Bo, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Reinforced Concrete Short Columns After Fire [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(8): 12-19.
- [13] JAU W C, HUANG K L. A Study of Reinforced Concrete Corner Columns After Fire[J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30(7): 622-638.
- [14] CHEN Y H, CHANG Y F, YAO G C, et al. Experimental Research on Post-fire Behaviour of Reinforced Concrete Columns [J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(5): 741-748.
- [15] HUO J S, ZHANG J G, WANG Z W, et al. Effects of Sustained Axial Load and Cooling Phase on Post-fire Behaviour of Reinforced Concrete Stub Columns [J]. Fire Safety Journal, 2013, 59: 76-87.
- [16] 张家广, 霍静思, 肖岩. 高温作用后钢筋混凝土短柱轴压力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(4): 117-124.
- ZHANG Jia-guang, HUO Jing-si, XIAO Yan. Experimental Study on Axial Mechanical Behavior of Reinforced Concrete Stub Columns with Pre-load After Exposure to High Temperatures [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(4): 117-124.
- [17] 陈俊, 李帅, 霍静思, 等. 标准火灾全过程作用后钢筋混凝土短柱力学性能试验研究[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2017, 39(2): 26-32.
CHEN Jun, LI Shuai, HUO Jing-si, et al. Experimental Study on Axial Mechanical Behavior of Reinforced Concrete Stub Columns After Exposed to the Entire Period of High Temperature [J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2017, 39(2): 26-32.
- [18] 张家铭, 陈俊, 霍静思, 等. 火灾升降温模式对高温后钢筋混凝土轴压力学性能影响的试验研究[J]. 实验力学, 2017, 32(1): 70-78.
ZHANG Jia-ming, CHEN Jun, HUO Jing-si, et al. Experimental Study of the Effect of Fire Mode on Axial Compression Mechanical Properties of RC After Exposure to Entire Fire Process [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(1): 70-78.
- [19] 张家广. 火灾(高温)全过程作用后钢筋混凝土柱力学性能试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
ZHANG Jia-guang. Experimental Research on Mechanical Behaviors of Reinforced Concrete Columns with Sustained Axial Load After Exposure to Fire or High Temperatures [D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [20] 徐玉野, 李丹, 林碧兰, 等. 轴向约束钢筋混凝土短柱受火后抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(6): 69-77.
XU Yu-ye, LI Dan, LIN Bi-lan, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Axially-restrained Concrete Short Columns After Fire [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(6): 69-77.
- [21] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures [S].
- [22] GB/T 50081—2002, 普通混凝土力学性能试验方法标准[S].
GB/T 50081—2002, Standard for Test Method of Mechanical Properties on Ordinary Concrete [S].
- [23] GB/T 228—2010, 金属材料拉伸试验: 室温试验方法[S].
GB/T 228—2010, Metallic Materials — Tensile Testing — Method of Test at Ambient Temperature [S].
- [24] HUO J S, XIAO Y, REN X H, et al. A New Hybrid Heating Method Used in Fire Test [J]. Experimental

- Thermal and Fluid Science, 2015, 62: 52-57.
- [25] LI Z, LIU Y Z, HUO J S, et al. Experimental Assessment of Fire-exposed RC Beam-column Connections with Varying Reinforcement Development Lengths Subjected to Column Removal[J]. Fire Safety Journal, 2018, 99: 38-48.
- [26] LI Z, LIU Y, HUO J, et al. Experimental and Analytical Assessment of RC Joints with Varying Reinforcement Detailing Under Push-down Loading Before and After Fires[J]. Engineering Structures, 2019, 189: 550-564.
- [27] 谭 炎, 李 智, 霍静思, 等. 锚固形式对火灾下边柱失效后 RC 梁柱节点受力机制影响试验研究[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2017, 39(4): 41-47.
- TAN Yan, LI Zhi, HUO Jing-si, et al. Experimental Study on Mechanical Behaviour of RC Beam-column Connections with Different Anchorage Form Under Exterior Column Removal Induced by Fire[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2017, 39(4): 41-47.
- [28] 谭 炎. 高温下钢筋混凝土梁-柱边节点竖向推覆试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- TAN Yan. Experimental Research on Push-down Test of RC Exterior Beam-column Connection at High Temperature[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [29] 荣 晃. 钢筋混凝土梁柱子结构高温抗倒塌性能试验研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2016.
- RONG Huang. Experimental Study of Reinforced Concrete Beam-column Substructures Experienced High Temperature on Collapse Resistance Performance[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2016.
- [30] JGJ/T 101—2015, 建筑抗震试验规程[S].
- JGJ/T 101—2015, Specification for Seismic Test of Buildings[S].
- [31] VARMA A H, RICLES J M, SAUSE R, et al. Seismic Behavior and Modeling of High-strength Composite Concrete-filled Steel Tube (CFT) Beam-columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58(5-8): 725-758.
- [32] 韩小雷, 戚永乐, 关柱良, 等. CRB550 级箍筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(12): 235-241.
- HAN Xiao-lei, QI Yong-le, GUAN Zhu-liang, et al. Comparative Experimental Research on Earthquake-resistant Behavior of Reinforced Concrete Columns with CRB500 Stirrups[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(12): 235-241.
- [33] 高 献, 陶 忠, 杨有福, 等. 大轴压比下 FRP 约束混凝土柱滞回性能试验研究[J]. 工业建筑, 2005, 35(9): 11-14.
- GAO Xian, TAO Zhong, YANG You-fu, et al. Hysteretic Behavior of Circular RC Columns Confined with FRP Jackets[J]. Industrial Construction, 2005, 35(9): 11-14.