

文章编号:1673-2049(2019)05-0062-09

钢筋混凝土柱轴心受压动态破坏尺寸效应

周宏宇¹,袁 慧¹,邢晓帅¹,赵晓花²,张雅然¹

(1. 北京工业大学 建筑工程学院,北京 100124; 2. 中国建筑技术集团有限公司,北京 100013)

摘要:为研究地震荷载作用下钢筋混凝土(RC)构件动态破坏的尺寸效应,对6根不同尺寸的钢筋混凝土短柱进行了不同加载速率下的轴心受压试验(应变率在 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 范围内),根据试验结果从荷载-位移曲线、延性和钢筋与混凝土应变等方面分析了应变率和尺寸效应共同影响下RC柱的轴压破坏特性。基于试验数据,提出了钢筋混凝土短柱轴心受压承载力计算修正参数。研究表明:在所研究的应变率范围内,RC短柱轴压破坏特征受加载速率变化的影响不显著,但随尺寸变化存在一定差异性;RC短柱动态破坏极限承载力依然存在尺寸效应,整体表现出承载力随尺寸增大而降低的趋势,但其降低效应显著小于应变率的提高效应,峰值承载力处的位移随加载速率的提高而降低;RC短柱延性随尺寸增大而增大,随应变率提高而降低,且尺寸的影响大于应变率;提出的钢筋混凝土短柱轴心受压承载力计算修正参数对于同类问题的定量计算和分析具有参考价值。

关键词:钢筋混凝土短柱;轴心受压;尺寸效应;应变率效应;承载力;修正参数

中图分类号:TU375.3 **文献标志码:**A

Size Effect of Dynamic Failure of Reinforced Concrete Column Under Axial Compression

ZHOU Hong-yu¹, YUAN Hui¹, XING Xiao-shuai¹, ZHAO Xiao-hua², ZHANG Ya-ran¹

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. China Building Technique Group Co., Ltd, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to study the size effect of dynamic failure of reinforced concrete (RC) member under seismic load, six reinforced concrete short columns with different sizes were subjected to axial compression tests at different loading rates (the strain rate was in the range of 1×10^{-5} to $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$). According to test results, the failure characteristics of RC axial compression columns under the influence of strain rate and size effect were analyzed from load-displacement curve, ductility, reinforcement and concrete strain and other aspects. Based on the measured data, a correction factor for calculating the bearing capacity of RC axial compression short columns was proposed. The study results show that the change of the loading velocity has no obvious effect on the failure characteristics of RC axial compression short columns in the studied range of strain rate, but there is a certain difference when size changes. The ultimate bearing capacity also has size effect, as a whole, it decreases when size increases, but its reduction effect is much smaller than that of strain rate. The displacement at peak load decreases with the

收稿日期:2018-12-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51378030,51978012);北京市自然科学基金京津冀合作专项项目(J160002);

北京市自然科学基金项目(8152004)

作者简介:周宏宇(1976-),男,黑龙江哈尔滨人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:zhouhy@emails.bjut.edu.cn。

increase of loading rate. The ductility increases when size increases but decreases when strain rate increases, and the influence of the size is greater than the strain rate. The proposed correction factor for calculating the bearing capacity of RC axial compression short columns will provide reference for quantitative calculation and analysis of similar problems.

Key words: reinforced concrete short column; axial compression; size effect; strain rate effect; bearing capacity; correction factor

0 引言

随着建筑事业的发展,钢筋混凝土(Reinforced Concrete, RC)结构的应用也愈加广泛(如房屋建筑工程、桥梁工程、大坝建造工程等),结构的跨度、高度不断增加的同时,其形式也呈多样性。随着钢筋混凝土结构向大尺寸发展,钢筋混凝土构件与结构的尺寸效应逐渐得到研究者的重视,抗震性能方面尤为突出。近年来,中国地震频发,汶川地震、玉树地震等使人们更加关注建筑结构的抗震性能。钢筋混凝土结构在承受地震作用时,动荷载施加到结构上,不只受力变大,建筑材料包括钢筋与混凝土的力学性能也会改变,从而影响构件及结构的受力性能。动荷载作用下的钢筋混凝土结构力学性能必然与静荷载作用下存在差异。王钧等^[1]通过多种抗拉强度试验对不同尺寸的短切玄武岩纤维混凝土进行了尺寸效应规律探索;诸多研究者已通过轴压、偏压试验研究了 RC 构件的尺寸效应^[2-7];不少学者还发现不同种类混凝土及其构件存在着明显的应变率效应^[8-11],李忠献等^[12]对应变率效应下混凝土的动态本构模型作了系统介绍,张皓等^[13]利用有限元软件对比分析了钢筋混凝土框架考虑应变率和未考虑应变率效应下弹塑性地震反应的差别,王文明等^[14]依据结构动力学原理提出了考虑应变率效应的 Push-over 分析方法,许斌等^[15]模拟分析了钢筋混凝土柱在应变率效应下的动力滞回性能。这些研究多将尺寸效应和应变率效应分开进行,因此,研究动态加载下不同尺寸钢筋混凝土构件的尺寸效应的必要性显而易见,这将为准确判断地震作用下结构的反应打好基础。

以往研究表明,地震作用下钢筋混凝土结构材料的应变率范围通常在 $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 之间^[16],而学者们多取 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 范围内的应变率完成混凝土材料的抗压试验^[17-19]。本文在前人研究基础上,取同样的应变率范围,对 2 组不同尺寸的 RC 柱进行不同加载速率下的轴心受压试验,在同时考虑尺寸效应与应变率效应的情况下,研

究不同加载速率下轴心受压短柱的受力性能,包括承载力、延性、材料应变等内容,并提出了应变率效应和尺寸效应共同影响下的钢筋混凝土受压短柱承载力修正参数的计算公式。

1 试验概况

1.1 试件设计

图 1 为试件配筋。试验按照相似关系共设计 2 组不同尺寸的矩形钢筋混凝土柱,试件编号为 ZX1-1~ZX1-3, ZX2-1~ZX2-3,长细比为 4。ZX1 类试件边长为 150 mm,高度为 600 mm;ZX2 类试件边长为 210 mm,高度为 840 mm。

柱子纵向受力钢筋强度等级为 HRB335,直径为 8 mm,配筋率均约为 0.9%,其中,箍筋强度等级为 HRB300,直径为 6 mm,非加密区箍筋体积配箍率为 1.2%;为了防止柱端局部破坏,设置箍筋加密区,加密区长度为竖向柱高的 1/4,并在柱子两端设钢筋网片;混凝土强度等级为 C30。

钢筋的材料力学性能按照国家《金属材料:室温拉伸试验方法》(GB/T 228—2010)的有关规定进行测量,钢筋的实测力学性能见表 1。

混凝土的材料力学性能测试在万能试验机上进行,具体试验结果如表 2 所示。

1.2 测试方案

1.2.1 试验加载方案

试验设备采用北京工业大学工程结构试验中心的 3 000 kN 电液伺服阻尼器试验系统。加载按位移控制,以恒定加载速率对柱子匀速加压,直到柱子破坏。加载前估算出柱子在地震作用下的应变率范围,同一试件加载速率保持不变。ZX1 类试件 ZX1-1~ZX1-3 的加载速率分别为 0.06, 12, 24 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$, ZX2 类试件 ZX2-1~ZX2-3 加载速率分别为 0.06, 15, 30 $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$; ZX1-1, ZX2-1 采用准静态加载,其他试件采用动态加载。对比小试件 ZX1 和大试件 ZX2 的试验结果,可以得到尺寸效应和应变率效应对 RC 轴心受压试件性能的相互影响。具体加载方案如表 3 所示。承载力按照《混凝土设计

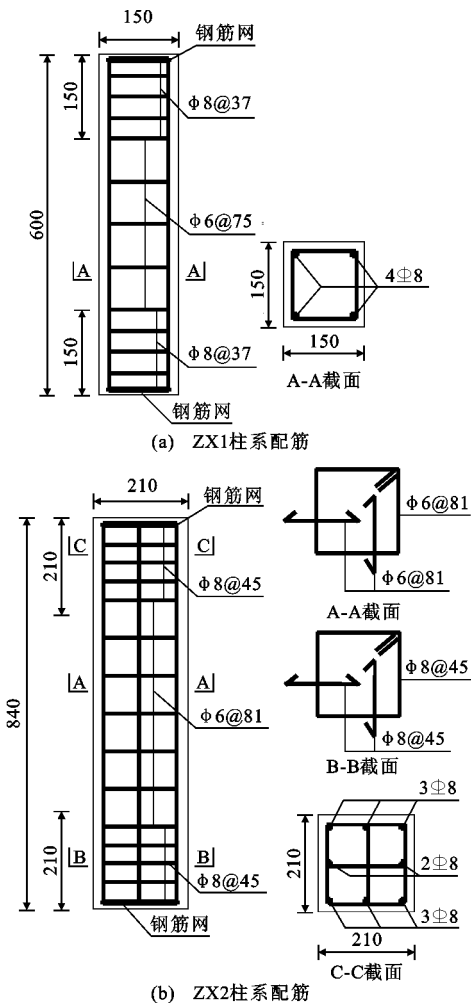


图 1 轴心受压柱配筋 (单位:mm)

Fig. 1 Reinforcement of Axial Compression Column (Unit:mm)

表 1 钢筋实测力学性能

Tab. 1 Measured Mechanical Properties of Steel Bars

钢筋类型	钢筋直径/ mm	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	弹性模量/ GPa	延伸 率/%
HRB335	8	402.1	606.2	200	29
HRB300	6	385.3	601.5	210	31
HRB300	8	355.7	532.3	210	28

表 2 混凝土实测力学性能

Tab. 2 Measured Mechanical Properties of Concrete

混凝土强度 等级	立方体抗压 强度/MPa	轴心抗压 强度/MPa	劈裂抗拉 强度/MPa
C30	30.12	23.02	1.75

规范》的公式 $N_u = \varphi(f_c A + f_y A_s)$ 计算得到,其中, N_u 为轴向压力设计值, f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值, f_y 为纵向钢筋抗压强度设计值, A 为构件截面面积, A_s 为全部纵向钢筋截面面积, φ 为钢筋混凝土受压构件稳定系数, φ 取为 1,并且去掉了 0.9

表 3 柱加载试验方案

Tab. 3 Loading Test Scheme of Column

试件编号	应变率/ s^{-1}	估算承载力/kN	加载距离/mm	加载频率/Hz
ZX1-1	0.000 1	598.4	12	0.005
ZX1-2	0.005 0	598.4	15	0.200
ZX1-3	0.050 0	598.4	12	2.500
ZX2-1	0.000 1	1 176.1	15	0.004
ZX2-2	0.020 0	1 176.1	15	1.000
ZX2-3	0.040 0	1 176.1	15	2.000

的安全系数^[20],该公式中的材料强度均代入了实测材料强度。

1.2.2 主要测点及采集方案

采用力传感器测量试件的轴向承载力,位移计沿竖向柱高布置,以测量柱子整体变形;同时在柱中间布置位移计来测量研究段柱子的变形;在柱中钢筋处、距钢筋中点 $d/2$ 处 (d 为柱子边长) 分别布置应变片。钢筋和混凝土应变片布置及具体编号见图 2 和图 3,其中, Z1~Z12 代表试件纵筋不同部位的应变片, G1 和 G2 代表箍筋的应变片, L 为柱高。

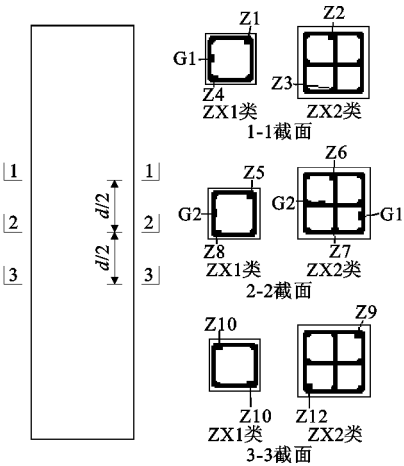


图 2 钢筋应变片布置

Fig. 2 Layout of Steel Strain Gauges

试验采集内容主要包括:轴压承载力、轴向变形、钢筋应变、混凝土应变发展等,并且记录下试件破坏特征。

2 试验结果及分析

2.1 试件最终破坏形态

图 4 为 ZX1 类试件的最终破坏形态。该组试件破坏时均是端部混凝土先出现裂纹并向中部扩展,之后端部保护层混凝土剥离掉落,在中部形成交叉斜裂缝且数量增加,最后中部混凝土被压碎,纵筋弯曲鼓出。ZX1-3 由于加载速率很快,裂缝基本是

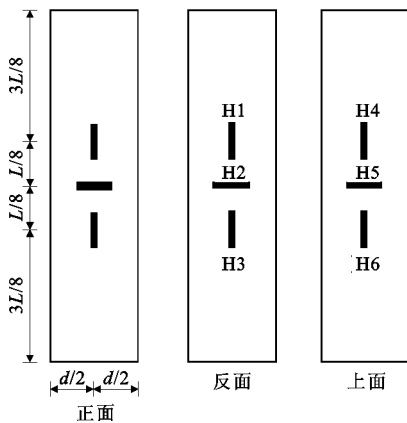


图 3 混凝土应变片布置

Fig. 3 Layout of Concrete Strain Gauges

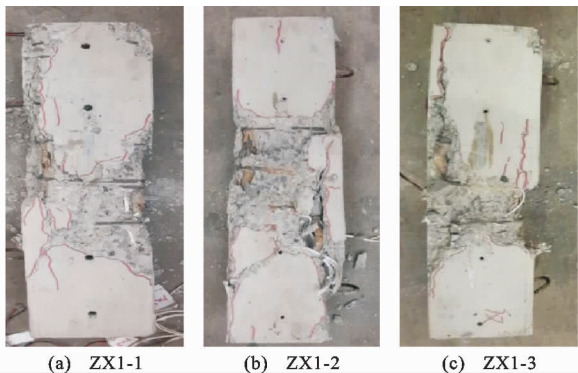


图 4 ZX1 的最终破坏形态

Fig. 4 Final Failure Form of ZX1

在一瞬间展开,通过最终的试验结果也可看出,该试件右端混凝土呈现粉碎性破坏。

图 5 为 ZX2 类试件的最终破坏形态,其破坏特征与 ZX1 试件类似。该组试件的破坏情况大致相同,即一端混凝土呈现粉碎性破坏,另一端混凝土则出现竖向裂纹,且混凝土保护层剥离纵筋,此现象的产生可能归因于加载过程中的受力不均。

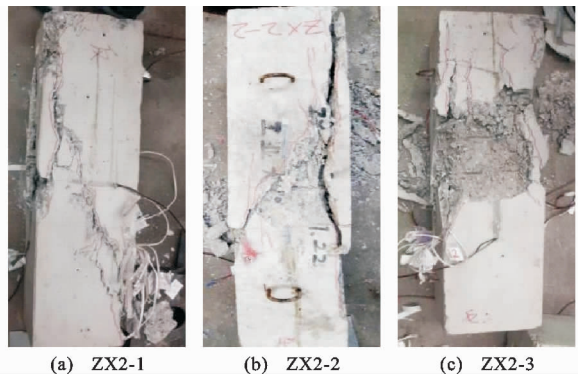


图 5 ZX2 的最终破坏形态

Fig. 5 Final Failure Form of ZX2

由试件破坏形态可知:加载速率对破坏特征的

影响不大,而尺寸效应会影响混凝土的破坏程度,即小尺寸试件相比大尺寸试件而言,破坏程度更大且范围更广。

2.2 荷载-位移关系的应变率效应分析

图 6,7 分别为 ZX1 类、ZX2 类试件的实测荷载-位移曲线,其中, P 为试件轴心受压承载力, S 为对应荷载下产生的位移, $\dot{\epsilon}$ 为平均应变率, ZX1-1 ~ ZX1-3 试件对应的加载速率依次增大。

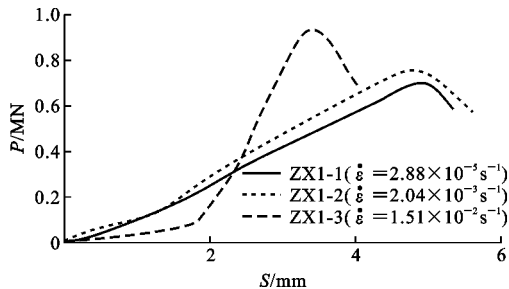


图 6 ZX1 试件荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement Curves of Specimen ZX1

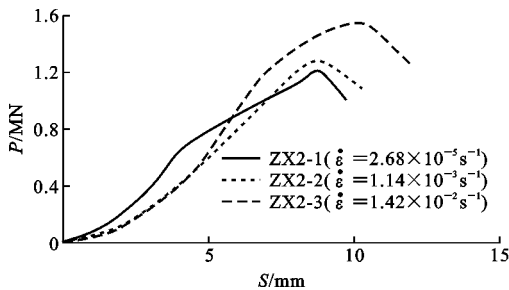


图 7 ZX2 试件荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement Curves of Specimen ZX2

加载过程中, ZX1-1 ~ ZX1-3 峰值荷载对应的峰值位移分别为 4.89, 4.86, 3.40 mm。随着加载速率的增大,轴心受压承载力逐渐增大,峰值位移逐渐减小,且峰值荷载后试件荷载-位移曲线变陡。把 ZX1-1 准静态加载的承载力作为标准承载力,将所测得的 ZX1-2 和 ZX1-3 承载力与 ZX1-1 承载力作比值,得到 ZX1-2 和 ZX1-3 的承载力提高比率分别为 1.07, 1.33;同理, ZX2-2 和 ZX2-3 的承载力提高比率分别为 1.05, 1.27。可见,随着加载速率的增大, ZX1 类、ZX2 类试件的实测承载力都逐步增大,且大尺寸的承载力提高比率小于小尺寸的。

2.3 轴压柱延性性能的应变率效应分析

本文采用极限位移与屈服位移的比值来表示位移延性系数,极限位移取实测承载力下降到极限承载力的 85% 处所对应的位移,屈服位移取由能量等效法确定的等效屈服点对应的位移。在不同加载速率下, ZX1-1 ~ ZX1-3 的位移延性系数分别为 1.48,

1.41,1.34,ZX2-1~ZX2-3 的位移延性系数分别为 1.49,1.47,1.41。可以看出,ZX1 类试件和 ZX2 类试件的位移延性系数都随着加载速率的增加而减小,即应变率效应在一定程度上降低了试件的变形性能。

2.4 钢筋和混凝土应变的应变率效应分析

ZX1 类试件的实测钢筋荷载-应变曲线如图 8 所示,其中纵筋受压应变值为负,箍筋受拉应变值为正, ϵ 为荷载对应的钢筋应变。加载过程中,试件 ZX1-1~ZX1-3 的纵筋平均应变率分别为 $4.13 \times 10^{-5}, 8.33 \times 10^{-4}, 1.98 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$,与之对应的平均峰值应变分别为 $-3.81 \times 10^{-3}, -2.93 \times 10^{-3}, -2.29 \times 10^{-3}$,箍筋平均应变率在 $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 之间。

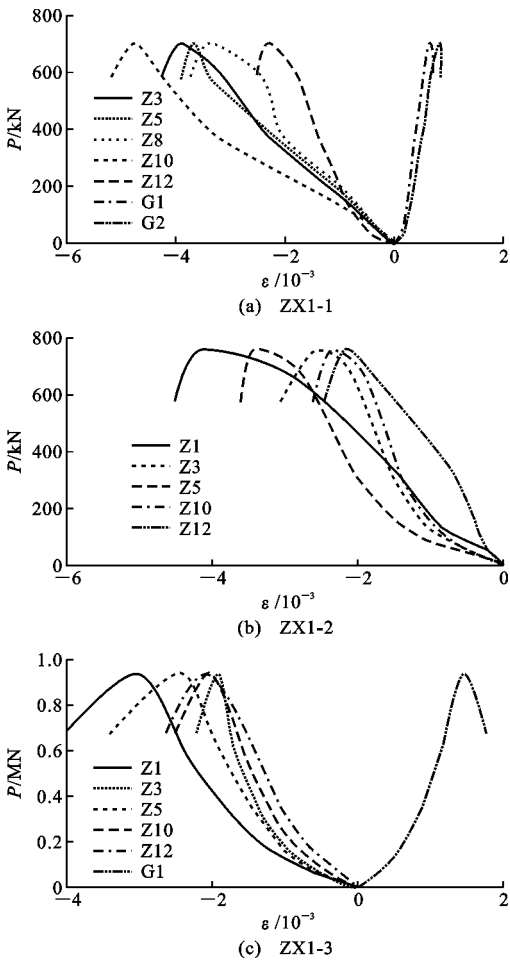


图 8 ZX1 类试件钢筋荷载-应变曲线

Fig. 8 Steel Load-strain Curves of Specimen ZX1

分析有效数据可知,ZX1 类试件纵筋峰值应变值相差比较大,这是由于测量的纵筋位置不同导致的,表明纵筋长度方向不同位置的应变是不同的。随着加载速率的增大,纵筋应变率量级增加,箍筋的

受拉程度和应变率也增大,而纵筋平均峰值应变表现出减小的规律。

ZX2 类试件的实测钢筋荷载-应变曲线如图 9 所示,其中 ZX2-1 试件混凝土平均应变率量级为 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,可以看作是准静态加载下的试验结果。ZX2-2,ZX2-3 类试件混凝土平均应变率在 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 之间,加载的应变率量级在地震应变率的范围内。加载过程中,试件 ZX2-1~ZX2-3 的纵筋平均应变率分别为 $3.81 \times 10^{-5}, 1.55 \times 10^{-2}, 1.62 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$,与应变率相对应的平均峰值应变分别为 $-3.48 \times 10^{-3}, -2.59 \times 10^{-3}, 1.75 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,箍筋平均应变率在 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 之间。

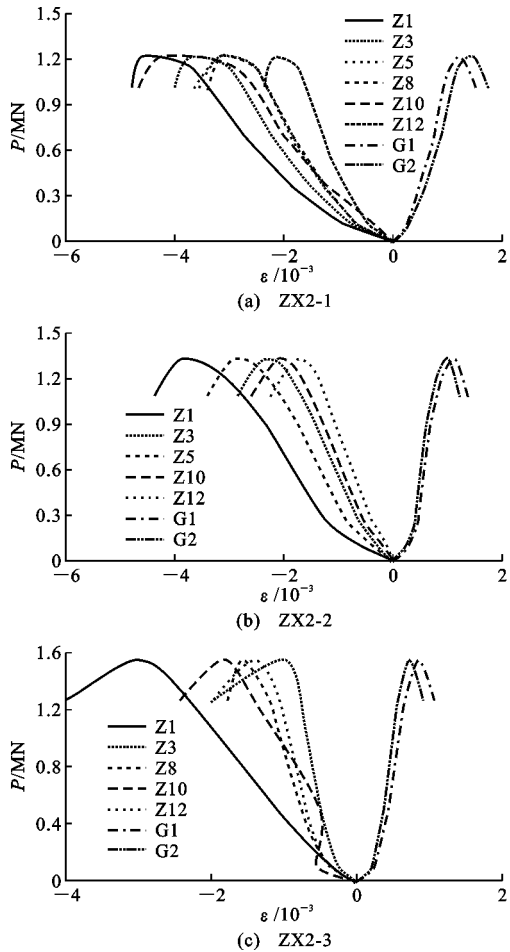


图 9 ZX2 类试件钢筋荷载-应变曲线

Fig. 9 Steel Load-strain Curves of Specimen ZX2

由图 9 可知,ZX2 类试件的钢筋应变表现出同 ZX1 类试件一样的规律,即纵筋峰值应变值相差比较大,箍筋的应变相差较小。分析数据得知,纵筋和箍筋的应变率都随着加载速率的增加而增加,且两者的平均峰值应变都随应变率增大而减小。

ZX1 类试件的混凝土应变率与峰值应变值见

表 4,其中混凝土受压应变值为负,受拉力应变值为正,本文以研究混凝土压应变为主。

表 4 ZX1 类试件混凝土应变率与峰值应变
Tab. 4 Strain Rate and Peak Strain of Specimen ZX1

试件编号	混凝土受压 平均应变 率/ s^{-1}	混凝土受压 平均峰值 应变	混凝土受拉 平均应变 率/ s^{-1}	混凝土受拉 平均峰值 应变
ZX1-1	2.88×10^{-5}	-2.66×10^{-3}	1.57×10^{-5}	1.27×10^{-3}
ZX1-2	2.04×10^{-3}	-1.85×10^{-3}	1.04×10^{-3}	1.06×10^{-3}
ZX1-3	1.51×10^{-2}	-1.84×10^{-3}	7.11×10^{-3}	8.66×10^{-4}

ZX1 类试件混凝土平均应变率在 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-2} s^{-1}$ 之间,试件 ZX1-1~ZX1-3 的混凝土平均峰值压应变分别为 2.66×10^{-3} , 1.85×10^{-3} , 1.84×10^{-3} 。可以看出,随着加载速率的增加,受压混凝土的应变率也随之增加,且出现了明显的阶差,而平均压应变随应变率量级的增大而减小。

ZX2 类试件的混凝土应变率与峰值应变值见表 5,试件 ZX2-1~ZX2-3 的混凝土平均应变率在 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-2} s^{-1}$ 之间,其对应的平均峰值压应变分别为 2.4×10^{-3} , 1.78×10^{-3} , 1.51×10^{-3} , ZX2 类试件的混凝土应变率和应变呈现了同 ZX1 类试件相似的规律。

表 5 ZX2 类试件混凝土应变率与峰值应变
Tab. 5 Strain Rate and Peak Strain of Specimen ZX2

试件编号	混凝土受压 平均应变 率/ s^{-1}	混凝土受压 平均峰值 应变	混凝土受拉 平均应变 率/ s^{-1}	混凝土受拉 平均峰值 应变
ZX2-1	2.68×10^{-5}	-2.40×10^{-3}		
ZX2-2	1.14×10^{-3}	-1.78×10^{-3}	1.51×10^{-3}	2.58×10^{-3}
ZX2-3	1.42×10^{-2}	-1.51×10^{-3}	2.72×10^{-2}	1.48×10^{-3}

3 动态破坏尺寸效应

3.1 名义应力-应变分析

图 10 为实测的钢筋混凝土柱轴心受压过程的名义应力-应变曲线,其中,纵坐标 σ 为试件全截面平均应力,横坐标 ϵ' 为试件纵向平均应变。从图 10 可以看出,3 种应变率量级下试件的名义峰值应力都随着尺寸增加而降低,存在较为明显的尺寸效应,名义应变随着尺寸的增加而增加。研究结果表明,混凝土的抗压强度越高,尺寸效应越明显。当试件的尺寸增大时,由于尺寸效应的影响,混凝土的强度降低,当试件同时承受动态荷载时,混凝土强度又会由于应变率效应的提高而提高;当加载速率增大时,混凝土的强度会提高,由于尺寸效应影响,大尺寸试件强度的折减系数会变大,导致混凝土强度随之降

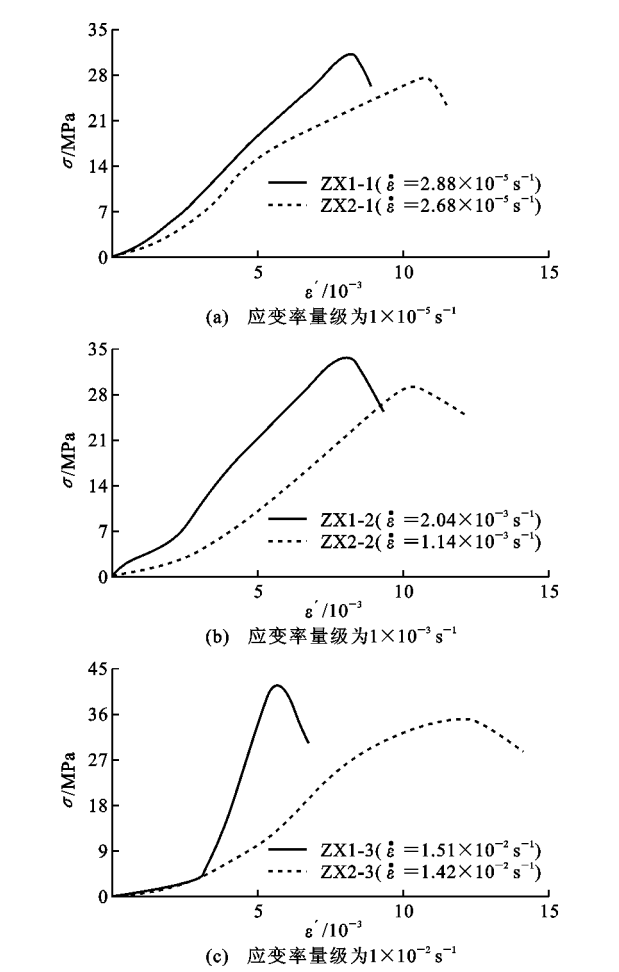


图 10 名义应力-应变曲线
Fig. 10 Nominal Stress-nominal Strain Curves

低。综合 2 种效应的影响,可以发现 2 种作用存在相互抵消部分。

可见,当一个钢筋混凝土试件承受着较高的动态荷载作用时,其承载能力是由尺寸与试件上应变率的大小共同决定的。

3.2 轴压承载性能的尺寸效应分析

图 11 为不同应变率作用下尺寸与承载力提高比率关系,其中, h 为试件边长。

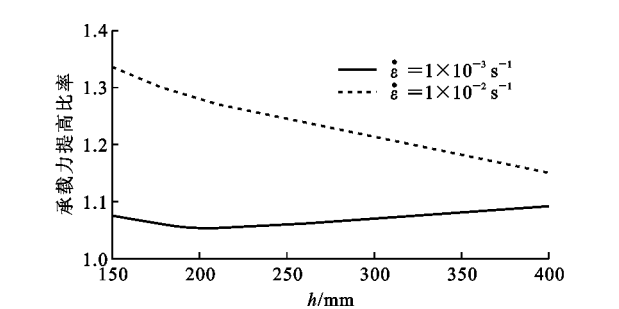


图 11 不同应变率作用下尺寸与承载力提高比率关系
Fig. 11 Relationship Between Size and Increase Ratio of Bearing Capacity Under Different Strain Rates

本文以承载力提高比率来度量按规范设计的承载力可靠度,以 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 应变率下的承载力为参考数据,图 11 引入了文献[21]中对边长为 400 mm 的 RC 柱考虑应变率效应时的数值模拟。由图 11 可知:当应变率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 和 $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 两个量级时,承载力提高比率随着试件尺寸的增大基本减小,但小应变率下降得略缓慢;总体来看,承载力提高比率随着应变率量级的提高都在提高,且均大于 0,表明按照规范^[20]计算得到的承载力是安全的。

3.3 轴压延性性能的尺寸效应分析

2 组试件的位移延性系数如图 12 所示,并与文献[22]中另一尺寸试件相同量级应变率下的延性系数进行对比。由图 12 可知,在应变率 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 范围内,ZX1 类、ZX2 类试件的延性系数均随着尺寸的增大而增大,随着应变率的升高而降低,最大降低幅度仅为 10%。因此,延性受应变率影响远低于尺寸的变化。

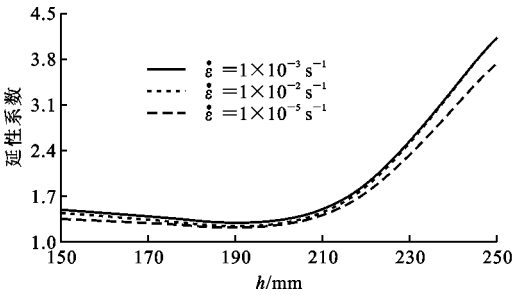


图 12 不同应变率作用下尺寸与延性关系
Fig. 12 Relationship Between Size and Ductility Under Different Strain Rates

3.4 钢筋与混凝土应变的尺寸效应分析

图 13 为在应变率 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 范围内 ZX1 类、ZX2 类试件的纵筋、箍筋和混凝土受压三者的峰值应变数据对比,其中纵坐标 $\epsilon_{ym}, \epsilon_{cm}, \epsilon_{yvm}$ 分别为纵筋峰值应变、混凝土受压峰值应变和箍筋峰值应变。

由图 13 可知:相同应变率下,试件的纵筋峰值应变 ϵ_{ym} 、混凝土受压峰值应变 ϵ_{cm} 均随着尺寸的增大而减小,而箍筋则呈现相反趋势;相同尺寸试件的纵筋峰值应变 ϵ_{ym} 、混凝土受压峰值应变 ϵ_{cm} 和箍筋峰值应变 ϵ_{yvm} 都随着应变率的增大而减小,且三者均无明显的尺寸效应与应变率效应共同作用下的耦合效应。

4 轴压短柱承载力修正参数公式

图 14 为承载力修正参数计算的拟合过程。基

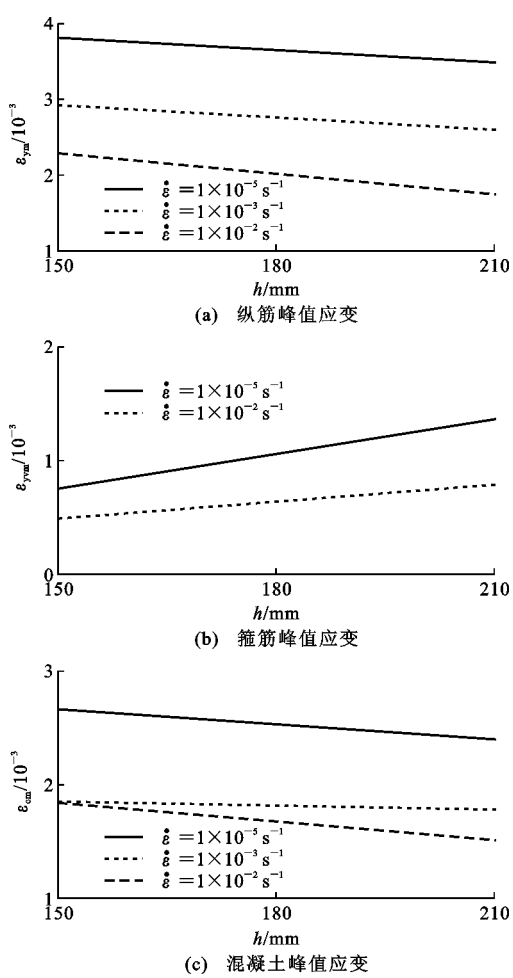


图 13 尺寸效应参数对比

Fig. 13 Comparison of Size Effect Parameters

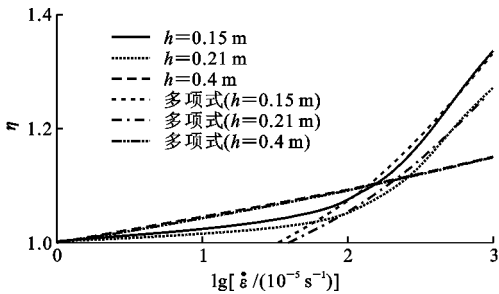


图 14 承载力修正参数拟合

Fig. 14 Fitting Correction Factor for Bearing Capacity

于试验数据和文献[21]中的研究结果,对修正参数进行拟合,提出考虑应变率效应和尺寸效应共同影响的 RC 柱轴心受压承载力修正参数计算公式,即

$$\eta = a \left[\lg \left(\frac{\dot{\epsilon}}{10^{-5}} \right) \right]^2 + b \lg \left(\frac{\dot{\epsilon}}{10^{-5}} \right) + c \quad (1)$$

式中: η 为大于 1 的 RC 柱轴心受压承载力修正参数; a, b 为计算参数; c 为常数。

以应变率为 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时的承载力为基础对比数据; h' 为与试件尺寸相关的几何参数,此处为

RC柱的柱高, $h' \in [0, 1]$; 计算参数 $a = 8.0568e^{-19.58h'}$, $b = 0.6303h' - 0.2171$, 其随着试件尺寸的变化而变化, $c = 1$ 时则为常量。

5 结 语

(1) RC短柱轴压破坏特征受加载速率变化的影响不显著, 但随尺寸变化存在一定差异性, 大尺寸试件混凝土破碎的程度要小于小尺寸试件的破坏程度; 两者都不改变轴心受压钢筋混凝土试件的基本破坏特征, 即混凝土被压碎, 纵筋屈曲鼓出。

(2) RC短柱轴压动态破坏极限承载力依然存在尺寸效应, 整体表现为承载力随尺寸的增大而降低, 但其降低效应明显小于应变率的提高效应; 尺寸效应和应变率效应在承载力效果上存在部分抵消; 峰值承载力处的位移随加载速率的提高而降低。

(3) RC柱延性随尺寸增大而增大, 随应变率提高而降低, 且尺寸的影响大于应变率。

(4) 基于试验数据, 在综合考虑尺寸效应与应变率效应这2项影响因素下, 提出了钢筋混凝土短柱轴心受压承载力计算修正参数公式, 该公式对于同类问题的定量计算和分析具有积极参考价值。

参考文献:

References:

- [1] 王 钧, 任靖豪, 郭大鹏. 短切玄武岩纤维混凝土基本力学性能的尺寸效应[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(5): 96-103.
WANG Jun, REN Jing-hao, GUO Da-peng. Size Effect of Basic Mechanical Properties of Chopped Basalt Fiber Reinforced Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(5): 96-103.
- [2] JEONG C Y, KIM H G, KIM S W, et al. Size Effect on Shear Strength of Reinforced Concrete Beams with Tension Reinforcement Ratio[J]. Advances in Structural Engineering, 2016, 20(4): 582-594.
- [3] 周宏宇, 杨聪昆, 杜修力, 等. 钢筋混凝土梁受弯抗震性能尺寸效应试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(2): 346-356.
ZHOU Hong-yu, YANG Cong-kun, DU Xiu-li, et al. Experimental Study on Size Effect of Seismic Behavior of RC Beams[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(2): 346-356.
- [4] 袁非凡. FRP加固钢筋混凝土柱偏心受压性能的尺寸效应研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2017.
YUAN Fei-fan. Research of Size Effect on Eccentric Compressive Behavior of FRP Reinforced Concrete

Column[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2017.

- [5] 周胤呈. 基于尺寸效应的有腹筋钢筋混凝土梁的剪切强度研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
ZHOU Yin-cheng. Shear Strength Study for Reinforced Concrete Beams with Web Reinforcements Against Size Effect[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [6] 杜修力, 卢爱贞, 赵 均. 小偏心钢筋混凝土柱受压性能的尺寸效应试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(1): 1-7.
DU Xiu-li, LU Ai-zhen, ZHAO Jun. Experiment on Size Effect of Small Eccentric Reinforced Concrete Columns Under Compressive Loads[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(1): 1-7.
- [7] 王作虎, 刘晶波, 杜修力. 单调轴压荷载下考虑尺寸效应的FRP加固混凝土圆柱应力-应变关系[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(4): 78-83.
WANG Zuo-hu, LIU Jing-bo, DU Xiu-li. Stress-strain Relation of Circular Concrete Columns Strengthened with FRP Considering Size Effect Under Monotonic Axial Loading[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(4): 78-83.
- [8] JIA B, TAO J L, LI Z L, et al. Effects of Temperature and Strain Rate on Dynamic Properties of Concrete[J]. Transactions of Tianjin University, 2008, 14(1): 511-513.
- [9] 王德斌, 范国玺, 刘 军, 等. 应变率对钢筋混凝土柱动态性能影响的研究[J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36(3): 76-83.
WANG De-bin, FAN Guo-xi, LIU Jun, et al. Study of the Influence of Strain Rate on the Dynamic Behavior of RC Columns[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2016, 36(3): 76-83.
- [10] 李 杰, 晏小欢, 任晓丹. 不同加载速率下混凝土单轴受压性能大样本试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(8): 66-75.
LI Jie, YAN Xiao-huan, REN Xiao-dan. Large-sample Experimental Study on Uniaxial Compressive Behavior of Concrete Under Different Loading Rates[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(8): 66-75.
- [11] 吴 俊, 杜修力, 李 亮. 中高应变率下沥青混凝土动力增长系数研究[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2017, 50(9): 921-930.
WU Jun, DU Xiu-li, LI Liang. Dynamic Increase Factor of Asphalt Concrete Under Middle to High Strain Rates[J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2017, 50(9): 921-930.

- [12] 李忠献,刘泽锋. 混凝土动态本构模型综述[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2015, 48(10): 853-863.
LI Zhong-xian, LIU Ze-feng. Review of Concrete Dynamic Constitutive Model[J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2015, 48(10): 853-863.
- [13] 张 皓,李宏男. 考虑应变率效应的钢筋混凝土框架结构弹塑性地震反应分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(3): 74-82.
ZHANG Hao, LI Hong-nan. Elastic-plastic Seismic Response Analysis of Reinforced Concrete Frame Structure with Strain Rate Effect[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(3): 74-82.
- [14] 王文明,李宏男. 考虑应变率效应的 Pushover 分析方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(2): 69-74.
WANG Wen-ming, LI Hong-nan. Pushover Analysis Method Considering Strain Rate Effect[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(2): 69-74.
- [15] 许 斌,王治原,陈洪兵. 钢筋混凝土柱动力滞回性能两尺度数值模拟[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(3): 16-23.
XU Bin, WANG Zhi-yuan, CHEN Hong-bing. Numerical Simulation on Dynamic Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Columns with Two-scale Model[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(3): 16-23.
- [16] 林 皋,闫东明,肖诗云,等. 应变速率对混凝土特性及工程结构地震响应的影响[J]. 土木工程学报, 2005, 38(11): 1-8, 63.
LIN Gao, YAN Dong-ming, XIAO Shi-yun, et al. Strain Rate Effects on the Behavior of Concrete and the Seismic Response of Concrete Structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(11): 1-8, 63.
- [17] 王 敏,彭 刚,田 为,等. 混凝土尺寸效应的动态率相关性试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2014(6): 176-179.
WANG Min, PENG Gang, TIAN Wei, et al. Experimental Research on the Concrete Size Effect on Dynamic Rate Dependent Characteristics [J]. China Rural Water and Hydropower, 2014(6): 176-179.
- [18] SUN J S, MA L J, DOU Y M, et al. Effect of Strain Rate on the Compressive Mechanical Properties of Concrete [J]. Advanced Materials Research, 2012, 450-451: 244-247.
- [19] 李 敏,李宏男,张 皓,等. 中强混凝土应变率效应的试验研究与数值模拟[J]. 混凝土, 2014(4): 34-37.
LI Min, LI Hong-nan, ZHANG Hao, et al. Experimental and Numerical Study on the Effects of Strain Rate of Middle Strength Concrete [J]. Concrete, 2014(4): 34-37.
- [20] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [21] 王德斌,李宏男. 应变率对钢筋混凝土柱动态特性的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(6): 67-72.
WANG De-bin, LI Hong-nan. Effects of Strain Rate on Dynamic Behavior of Reinforced Concrete Column [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2011, 31(6): 67-72.
- [22] 江 洲. 钢筋混凝土柱动力性能试验及数值模拟研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
JIANG Zhou. Experimental and Numerical Study on Dynamic Behavior of Reinforced Concrete Columns [D]. Changsha: Hunan University, 2012.