

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S1.008

重复荷载下钢筋混凝土柱轴压性能的尺寸效应试验研究

李倩,符佳,杜修力,张建伟

(北京工业大学 建筑工程学院,北京 100124)

摘要:为了解重复荷载下钢筋混凝土柱轴心受压性能的尺寸效应,按照相似关系设计了 3 组正方形截面钢筋混凝土柱试件,其几何尺寸分别为:400 mm×400 mm×1 200 mm、600 mm×600 mm×1 800 mm、800 mm×800 mm×2 400 mm,并对其进行了轴压破坏试验。试验中对比分析了各试件的破坏特征、裂缝发展过程、承载力、峰值应力、峰值应变以及刚度等。结果表明,在试验的尺寸范围内,试件的轴压性能存在明显的尺寸效应。

关键词:钢筋混凝土柱;重复荷载;轴压性能;尺寸效应;试验研究

中图分类号:TU375.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)S1-0032-04

The Experimental Study on Size Effects on Axial Compression Performances of Reinforced Concrete Column under Repeated Load

Li Qian, Fu Jia, Du Xiuli, Zhang Jianwei

(The College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, P. R. China)

Abstract: The size effects on axial compression performances of reinforced concrete column under repeated load are needed. Specimens were designed and tested in accordance with the relevant similarity, whose geometric dimensions are: 400 mm×400 mm×1 200 mm, 600 mm×600 mm×1 800 mm and 800 mm×800 mm×2 400 mm. The result of the experiment, the failure characteristics, crack development process, strength, peak stress, peak strain and stiffness of various specimens were comparatively analyzed. The results show that, within size range of this test, size effect exists on performances of columns.

Key words: reinforced concrete column; repeated load; axial compression performance; size effect; experimental study

不同尺寸的钢筋混凝土构件的力学性能存在尺寸效应。钢筋混凝土柱是钢筋混凝土最基本的构件,其尺寸效应问题一直是工程界关注的问题。在钢筋混凝土柱的尺寸效应研究方面,各国进行了大量的试验研究和理论分析^[1-14]。然而在实际工程中,许多钢筋混凝土柱是在重复荷载作用下工作的,且研究表明,在重复荷载作用下,柱的受力性能与在其他荷载作用下的受力性能是不相同的^[15-17],力学性能很可能随尺寸的不同而发生变化。而重复荷载和尺寸效应引起的影响在规范的计算公式中并没有准确体现出来。因此,需要研究实际结构(尤其是大尺寸结构)在重复荷载下力学性能的尺寸效应问题。本文通过比例缩尺试验来认识重复荷载下钢筋混凝土柱的力学性能。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

试验按照相似关系设计了 3 组正方形截面钢筋混凝土柱,纵筋均采用 HRB 335 级钢筋,箍筋均采用 HPB 235 级钢筋。为防止柱端发生局部承压破坏,在试件两端各设一层钢筋网片。试件采用平卧浇筑。试件纵筋配筋率为 1.5%,非加密区体积配箍率为 0.65%,实测试验用混凝土材料轴心抗

压强度为 34.39 MPa,其他设计参数详见表 1。试件设计尺寸及配筋见图 1。其中 NM 为试件编号, b 为试件截面边长, c 为混凝土保护层厚度。

表 1 试件设计参数

试件编号	b /mm	c /mm
NM400	400	20
NM600	600	30
NM800	800	40

1.2 测试方案

1.2.1 试验装置 采用北京工业大学结构试验中心竖向 40 000 kN 多功能电液伺服加载实验系统对试件施加轴向压力。采用压力传感器采集荷载信号;在钢筋表面粘贴应变片,监测钢筋变形;在试件中间 3/4 高度范围内布置百分表,测量该范围内的变形;在上下加载钢板之间布置位移计,监测试件在荷载作用下的轴向总变形。试验加载装置及量测仪表布置见图 2。

1.2.2 加载制度 预加荷载按规范计算最大承载力 N 的 1/5 施加(N 按现行规范^[18]中钢筋混凝土轴心受压构件的正

收稿日期:2012-12-06

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50838001);北京市高校中青年骨干人才培养计划项目(PHR201108009)

作者简介:李倩(1986-),女,硕士,主要从事建筑结构研究,(E-mail)liqianchiping@126.com。

截面承载力公式 $N = f_c \cdot A_c + f_y \cdot A_s$ 计算得到,未计入安全系数 0.9),施加预加荷载后,检查并校正仪器仪表,之后卸载至零。然后,正式实施加载。该试验的加载方式为多级加载^[19],加载前期用荷载控制,按照 10% N 的荷载值分级,缓慢加载,等测试仪表读数稳定之后缓慢卸载,之后施加下一级荷载。在试件承载力到达 60% 的峰值荷载计算值之前,荷

载加卸载 1 次;在试件承载力到达 60% 的峰值荷载计算值之后,每级荷载加卸载 2 次。试验过程中详细记录荷载值和仪表数据,在柱体刚度第一次出现明显下降时,转为位移控制继续加卸载,直至试件承载力下降至实测峰值荷载的 30% 左右结束试验。试验过程中的照片见图 3。

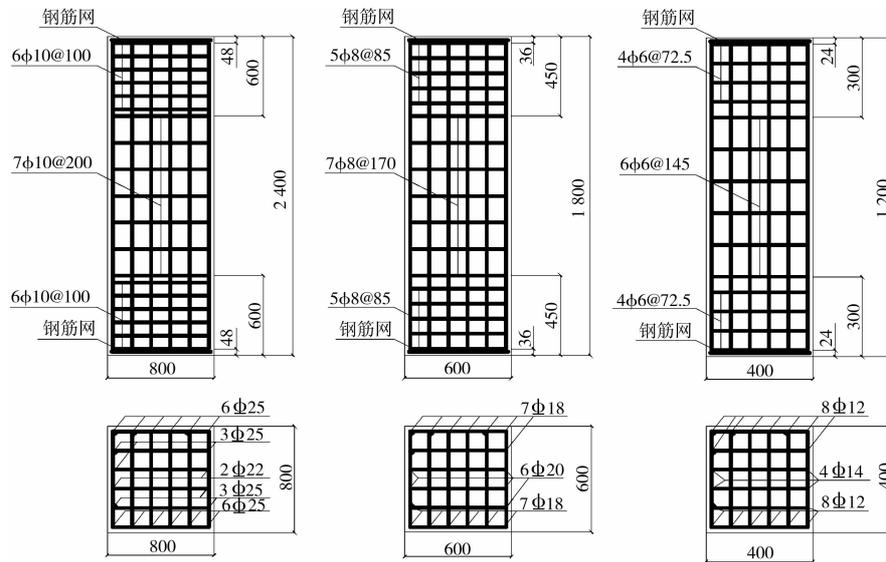


图 1 试件尺寸及配筋

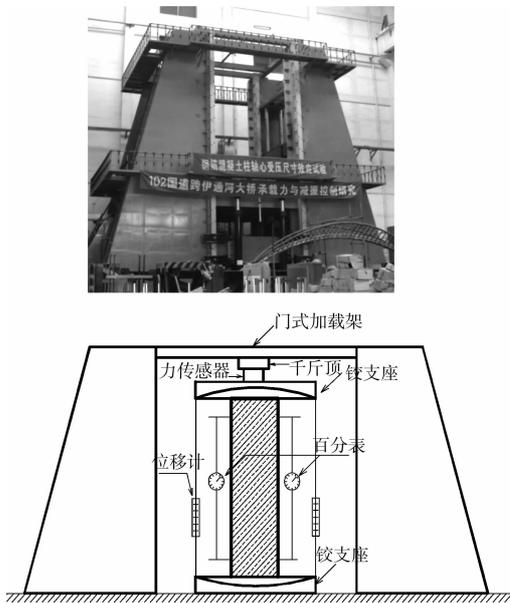


图 2 加载装置及量测仪表布置

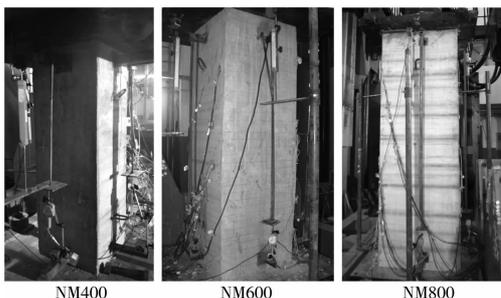


图 3 试验照片

2 试验结果及分析

2.1 荷载-位移关系曲线

试件的荷载-位移关系曲线见图 4。可以看出:各尺寸试件在重复荷载作用下荷载-位移关系曲线趋势大致相同。

2.2 破坏特征

试验过程中,当荷载增加到峰值荷载的 60%~85% 时,端部出现细微的纵向裂纹。当荷载达到峰值荷载的 90% 左右时,试件出现明显的竖向裂缝,且纵向延伸,数量逐渐增多。接近峰值荷载时,试件的中部区域成为主要的裂缝发展区,混凝土保护层破裂和剥离,端部裂缝发展不明显。超过峰值荷载后,随着荷载的继续施加,试件承载力缓慢下降,裂缝开展与保护层的剥落加快,纵筋开始外鼓。荷载下降到峰值荷载的 70%~85% 以下,中部区域的核心混凝土逐渐压碎破坏。荷载下降到峰值荷载的 50% 以下,混凝土连续碎裂脱落,纵筋外鼓严重。试件破坏照片见图 5。试件均为纵向受压破坏,破坏现象均发生在柱体中部区域范围内。试件最终破坏时,混凝土保护层严重开裂和剥落,核心混凝土内部分布着纵向裂缝;纵筋屈曲并呈灯笼状外鼓,如图 6 所示。对于较小尺寸试件(NM 400),当荷载达到峰值荷载的 95% 时,主裂缝首先在柱中部区域出现,之后延伸到端部。对于较大尺寸试件(NM 600 和 NM 800),当荷载达到峰值荷载的 80%~95% 时,主裂缝首先在柱端部区域出现,之后延伸到中部。可见,不同尺寸试件的裂缝发展在试验中呈现了不同。裂缝发展过程见图 7(数字表示加载到此级时柱体裂缝发展至此处)。

2.3 承载力

各试件实测最大承载力 F 及按规范公式计算的最大承载力 N 见表 3(计算中取材料的实测强度)。其中,承载力相

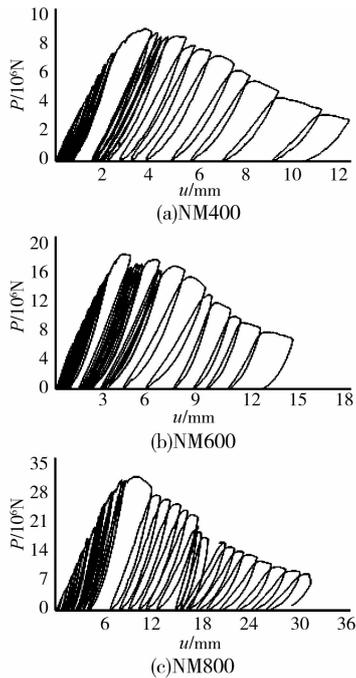


图 4 试件的荷载-位移关系曲线

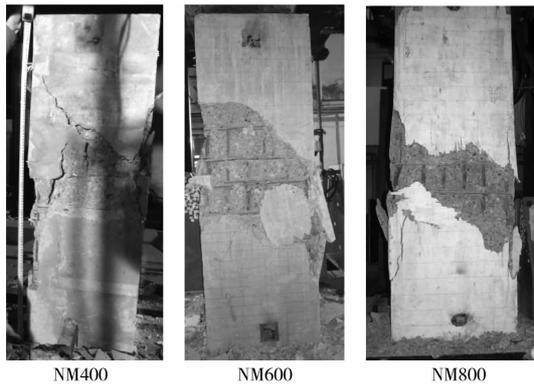


图 5 试验破坏照片

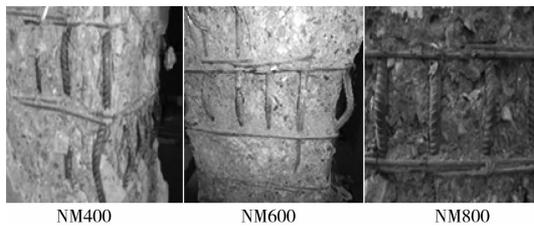


图 6 纵筋受压屈曲并外鼓

对误差 $\eta = (|N| - |F|) / |F| \times 100\%$ 。

可见,尺寸越大,试件的承载力相对误差的绝对值越低,即现行规范中钢筋混凝土轴心受压构件的正截面承载力计算不能准确体现重复荷载作用下尺寸效应对试件承载力的影响。

表 2 柱承载力计算结果和实测结果

试件编号	F/kN	N/kN	$\eta/\%$
NM400	8 667	6 573	-24.16
NM600	17 652	14 726	-16.58
NM800	30 614	26 347	-13.94

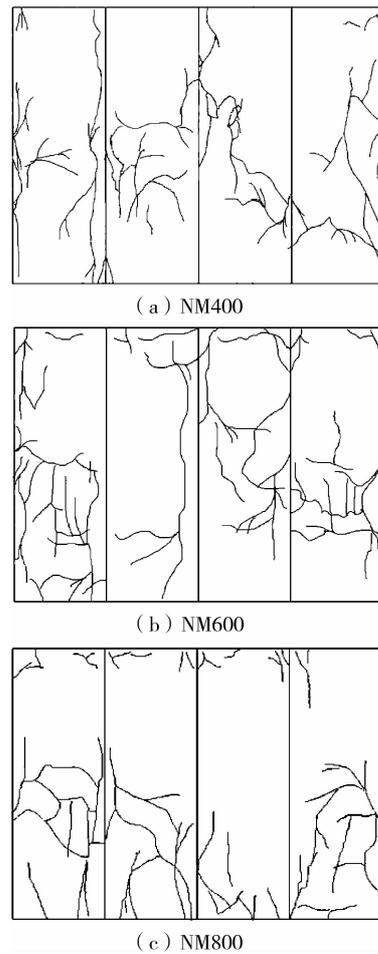


图 7 各试件裂缝发展过程

2.4 峰值应力

由实测最大承载力计算得到的试件全截面峰值名义压应力 σ_s 见表 3。

表 3 峰值名义压应力实测结果

试件编号	NM400	NM600	NM800
σ_s / MPa	54.17	49.03	47.83

可见,随试件尺寸增大,峰值名义压应力降低,存在一定程度的尺寸效应。与较小尺寸试件(NM 400 和 NM 600)相比,较大试件(NM 600 和 NM 800)峰值名义应力的降低幅度相对较小。若按照相似关系,用小尺寸试件的试验结果,外推较大尺寸试件的承载力,会较高估计大尺寸试件承载力。

2.5 峰值应变

试件的峰值变形 u_p 以及平均峰值名义压应变 ϵ_p 见表 4。

表 4 峰值变形及峰值名义压应变实测结果

试件编号	NM400	NM600	NM800
u_p / mm	3.62	4.14	4.49
ϵ_p	0.003 4	0.002 5	0.002 4

可见,随试件尺寸的增大,峰值名义压应变降低,较大的试件(NM 600 和 NM 800)峰值名义压应变比较接近,存在一

定的尺寸效应。

2.6 刚度

通过试验实测得到的试件全截面名义应力 σ -试件纵向平均应变 ε 骨架曲线见图 8。

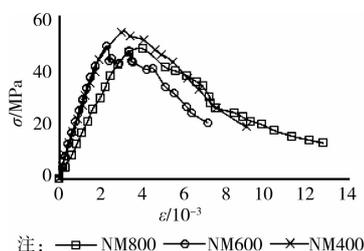


图 8 应力-应变骨架曲线

可见,随试件尺寸增加,到达峰值荷载前,大尺寸试件(NM 800)的抗压刚度明显降低;到达峰值荷载后,3 种尺寸试件的刚度退化没有明显的尺寸效应现象。

3 结 论

1)在重复荷载作用下,截面尺寸在 400~800 mm 范围内的钢筋混凝土柱的轴心受压承载力存在一定程度的尺寸效应,按现行《混凝土结构设计规范》计算,不同几何尺寸构件的承载力计算结果可靠度不同,大尺寸构件的可靠度降低。

2)不同尺寸构件破坏发生部位均在柱体的中部区域,尺寸效应不明显,构件的裂缝发展过程存在一定差异。

3)重复荷载作用下不同几何尺寸钢筋混凝土轴心受压柱的峰值应力存在一定程度的尺寸效应现象,尺寸越大,峰值应力越低,但下降幅度呈非线性变化。

4)重复荷载作用下不同几何尺寸钢筋混凝土轴心受压柱的峰值应变存在一定程度的尺寸效应现象,尺寸越大,峰值应变越小,但下降幅度呈非线性变化。

5)重复荷载作用下不同几何尺寸钢筋混凝土轴心受压柱的抗压刚度存在一定程度的尺寸效应现象,峰值荷载前,随着构件尺寸的增大,抗压刚度呈降低趋势;峰值荷载后,刚度退化规律差异不明显。

参考文献:

- [1] 王文标,黄晨光,赵红平,等. 结构破坏的尺度律[J]. 力学进展, 1999, 29(3):383-433.
Wang W B, Huang C G, Zhao H P, et al. Scaling of structural failure[J]. Advances In Mechanics, 1999, 29(3):383-433.
- [2] 黄海燕,张子明. 混凝土的尺寸效应[J]. 混凝土,2004(3): 8-9.
Huang H Y, Zhang Z M. Size effect in concrete[J]. Concrete, 2004(3): 8-9.
- [3] Bazant Z P, Planas J. Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials[J]. CRC Press LLC, 1998.
- [4] Bazant Z P, Kwon Y W. Failure of slender and stocky reinforced concrete columns: tests of size effect[J]. Materials and Structures. 1994, 27(2):79-90.
- [5] Godat Z A, Qu, Lu X Z, et al. Size effects for reinforced concrete beams strengthened in shear with CFRP strips[J]. Journal of Composites for Construction, 2010, 3(14): 260-271.

- [6] Wang X Z, Xu Z C, Bi Z, et al. Experimental investigation on size effect formulae suitable for common concrete nominal fracture toughness[J]. ICLEM, 2010; 1421-1427.
- [7] Michele B, Bazant Z P. Size effect in concrete columns: finite-element analysis with microplane model[J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(12): 1382-1390.
- [8] Sene S, Barr B I G, Abusiaf H F. Size effect in axially loaded reinforced concrete columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(4): 662-670.
- [9] 杜修力,张建伟,符佳,等. 钢筋混凝土构件的尺寸效应研究进展及展望[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(4): 14-19.
Du X L, Zhang J W, Fu J, et al. Research progress and prospect of size effect on reinforced concrete members [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(4): 14-19.
- [10] 杜修力,符佳,张建伟. 钢筋混凝土柱轴心受压性能尺寸效应的大比尺试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43:1-8.
Du X L, Fu J, Zhang J W. The experimental study on size effect of the large-size reinforced concrete column under axial loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43:1-8.
- [11] 杜修力,符佳,张建伟,等. 钢筋高强混凝土柱轴压性能尺寸效应试验[J]. 北京工业大学学报, 2012, 10(38):1491-1497.
Du X L, Fu J, Zhang J W, et al. Experiments on size effect of the reinforced high-strength concrete column under axial loading [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 10(38):1491-1497.
- [12] Nemecek J, Bittnar Z. Experimental investigation and numerical simulation of post-peak behavior and size effect of reinforced concrete columns[J]. Materials and Structures / Materiaux et Constructions, 2004, 37(267): 161-169.
- [13] 杜修力,袁健,周宏宇,等. 钢筋混凝土梁在低周反复荷载作用下受剪性能的尺寸效应试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 5(31):30-38.
Du X L, Yuan J, Zhou H Y, et al. The experimental study of size effect on shear capacity of reinforced concrete beam under low cyclic loading[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 5(31):30-38.
- [14] 冯帆,赵均,卢爱贞,等. 钢筋混凝土偏心受压短柱尺寸效应研究[J]. 防灾科技学院学报, 2011, 2(13):13-17
Feng F, Zhao J, Lu A Z, et al. The experimental study on size effect of reinforced concrete column under eccentric loading[J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2011, 2(13):13-17.
- [15] 程文灏. 混凝土结构设计原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.
- [16] 高丹盈. 重复荷载下碳纤维混凝土轴压全曲线的研究[J]. 水力发电, 1994(5):18-23.
Gao D Y. Axial compressive stress versus strain of steel fibre concrete[J]. Water Power, 1994(5):18-23.
- [17] 易美英. 重复荷载下受腐蚀钢筋混凝土梁承载力研究[D]. 上海:上海交通大学. 2008.
- [18] GB 50010-2011 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- [19] 李忠献. 工程结构试验理论与技术[M]. 天津:天津大学出版社, 2004.