

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.04.001

# 高强混凝土柱小偏心受压性能尺寸效应试验研究

杜修力, 张海芳, 张建伟

(北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

**摘要:**为了解高强混凝土柱小偏心受压性能的尺寸效应,进行了 3 组不同几何尺寸的高强混凝土柱小偏心受压破坏试验,其截面几何尺寸分别为 200 mm×200 mm、400 mm×400 mm、800 mm×800 mm,对比分析了其破坏形态、承载力、变形能力及截面应变分布规律,揭示了其尺寸效应规律。研究表明,高强混凝土柱的小偏心受压破坏形态和横截面应变分布规律基本相同,其尺寸效应不明显;高强混凝土柱的小偏心受压承载力和变形能力存在明显尺寸效应,随着截面尺寸的增大,其极限承载力的安全储备量减小,变形能力减弱。

**关键词:**高强混凝土;钢筋混凝土柱,小偏心受压;力学性能;尺寸效应

**中图分类号:**TU375 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)04-0001-06

## Experimental Analysis of Size Effect of High-strength Concrete Column Under Small Eccentric Loading

Du Xiuli, Zhang haifang, Zhang Jianwei

(Beijing Key Lab of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education,  
Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China)

**Abstract:** To analyse size effect of high-strength concrete column under small eccentric loading, experimental analysis was carried out on 3 categories of different sizes of high-strength concrete columns under small eccentric loading. The columns' section size was 200 mm × 200 mm, 400 mm × 400 mm and 800 mm × 800 mm, respectively. Failure mode, ultimate strength, deformation capacity and cross-sectional strain distributing rules were compared to get the size effect law. The results show that the compressive failure mode and cross-sectional strain distributing rules of HSC column under small eccentric loading are basically the same, and the size effect isn't obvious. Ultimate strength and deformation capacity of HSC column under small eccentric loading have size effect obviously. With increase of section size, safety reservation of ultimate strength is reduced and deformation capacity also reduces.

**Key words:** high-strength concrete; reinforced concrete column; small eccentric loading; mechanical properties; size effect

混凝土作为土木、水利等工程结构的主要材料,在工程结构中得到广泛应用。随着工程结构向大跨度、超高层及超大型方向发展,对混凝土性能提出了更高的要求。随着水泥品种的改善以及外加剂的使用,工程中使用的混凝土强度越来越高。混凝土属

于准脆性材料的范畴,试验研究表明<sup>[1-5]</sup>,试件尺寸对其强度和韧性都有一定影响,即混凝土的力学性能存在随着几何尺寸的变化而变化的尺寸效应。钢筋混凝土构件是由混凝土和钢筋 2 种材料组成的,其力学性能直接取决于混凝土和钢筋的力学性能,

收稿日期:2012-12-26

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:杜修力(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事岩土工程和工程结构研究,(E-mail)duxili@bjut.edu.cn。

混凝土材料的尺寸效应必然直接反映到钢筋混凝土构件的力学性能中。另外,钢筋混凝土构件中钢筋和混凝土共同工作的基础是它们之间存在的粘结力,而钢筋和混凝土之间粘结力的大小受钢筋直径和外形、钢筋间距、混凝土强度、混凝土保护层厚度及混凝土浇筑时钢筋所处的位置等影响,这些因素的影响程度都会随构件尺寸的不同而变化,进而其力学性能随构件尺寸不同发生变化,加剧钢筋混凝土构件力学性能受尺寸效应的影响。因此,开展大尺寸钢筋混凝土构件破坏试验,研究其破坏机理和力学性能,基于此开展钢筋混凝土构件尺寸效应研究<sup>[6-10]</sup>,是建立更为科学、合理、可靠的钢筋混凝土结构设计方法的需要。本文进行不同几何尺寸的高强混凝土柱小偏心受压性能试验,分析其力学性能的尺寸效应规律。

## 1 试验方案

### 1.1 试件设计

共设计 6 个试件,其截面尺寸分别为 200 mm×200 mm、400 mm×400 mm、800 mm×800 mm,试件相应编号为 DZ200、DZ400、DZ800,每种截面 2 个试件,试件长细比均为 4.5。试件初始偏心距设为  $0.25 h_0$ ,为小偏心受压。为保证试件在受压加载过程中不发生柱端加载点处破坏,以及便于试验加载,将柱端设计成牛腿形式,并按照牛腿的设计方法加密箍筋。柱中部不设箍筋,以保证试验结果不受箍筋对混凝土的约束作用影响,柱中受力纵筋采用对称配筋方式<sup>[11-13]</sup>。各试件的具体配筋情况如图 1 所示。

试件制作所用混凝土为商品混凝土,强度等级为 C60,混凝土实测立方体抗压强度为 63.7 MPa,弹性模量为 44.5 GPa。钢筋的实测力学性能见表 1。

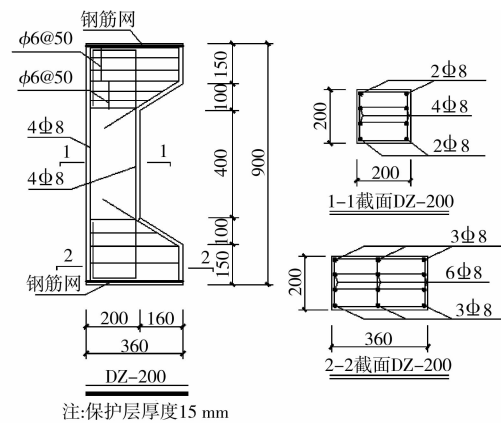
表 1 钢筋力学性能

钢筋直径/mm	钢筋等级	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
8	HRB335	560	624
16	HRB335	383	565
32	HRB335	379	517
6	HPB235	435	467
8	HPB235	332	440
10	HPB235	456	498

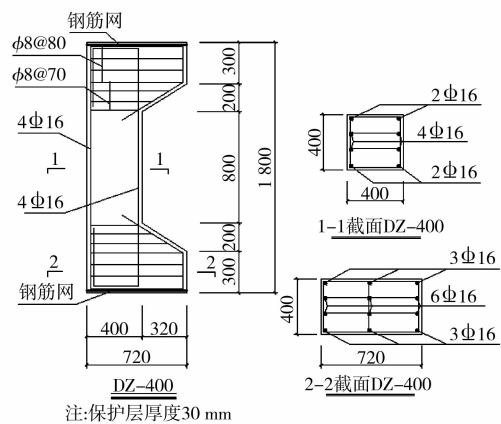
### 1.2 加载方案

试验在北京工业大学工程结构试验中心的 4 000 t 多功能电液伺服加载系统上进行,试验加载

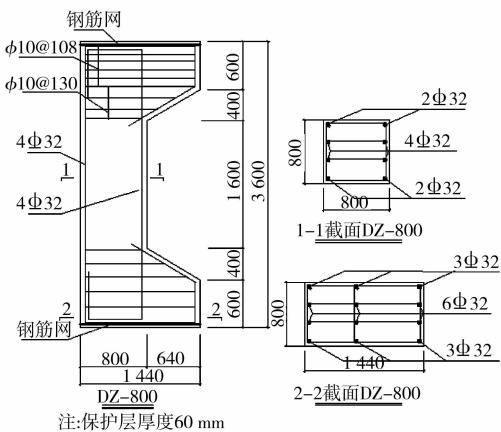
装置及位移、材料应变测点布置如图 2 所示。试验采用力与位移混合控制加载。加载前进行预加载<sup>[14]</sup>,以检查各仪表是否工作正常,以及消除试件的非结构性变形。正式加载时,每级加荷增量为计算极限荷载的 10%,加载的时间间隔为 10 min,加荷至计算极限荷载的 60%后,每级加荷增量调整为计算极限荷载的 5%,加荷至其 90%后,加荷由力控制改为位移控制,并加荷直至试件破坏。人工观测裂缝。



(a) DZ200配筋图



(b) DZ400配筋图



(c) DZ800配筋图

图 1 试件配筋图

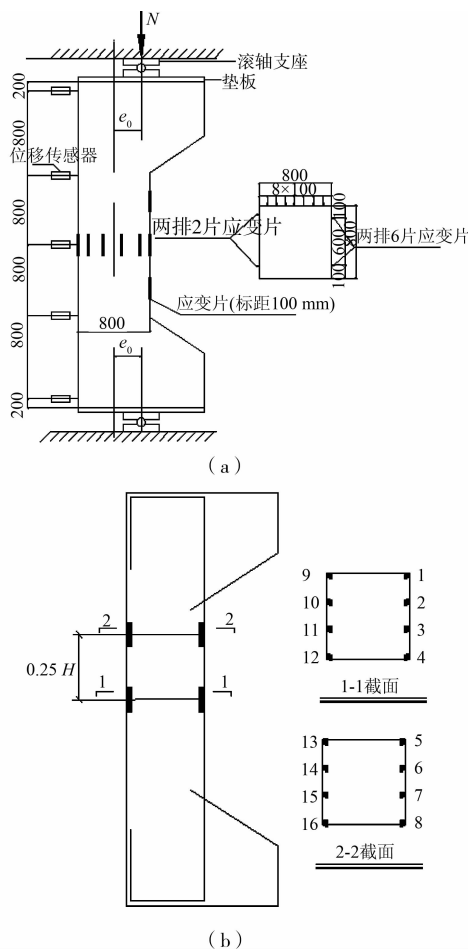


图2 加载装置及测点布置图

## 2 试验结果及分析

### 2.1 破坏形态

各试件的破坏形态如图3所示。由图3可见,3种不同几何尺寸的试件受拉侧均出现较少的弯曲横向裂缝,且裂缝发展较缓慢,加载至接近极限荷载时,压区混凝土应变达到极限压应变,保护层混凝土开裂,并发出“噼啪”的响声,几秒钟后,试件发出很大的“砰”的响声,试件受压区混凝土均被严重压碎,破坏区域成锥体,部分混凝土碎块崩出,受压钢筋屈曲并对外鼓出,试件受拉侧弯曲横向裂缝向内开展至截面中部。各尺寸试件均在受压区混凝土压碎后,因有效截面面积减小严重,导致试件突然出现一条破坏斜裂缝,将试件混凝土完全剪开,试件抗压承载力突然完全丧失,并导致受拉侧保护层混凝土大片脱落,受拉钢筋外露。由此可见,各组试件均表现为混凝土首先压碎的脆性破坏形态,没有明显预兆,属于典型的小偏心受压破坏形态。

DZ200-1试件在加荷至第5级荷载时,试件受拉侧下部出现1条初始弯曲横向裂缝,DZ200-2试

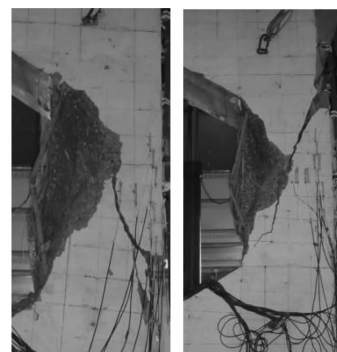
件在加荷至第4级荷载时,试件受拉侧上部出现1条初始弯曲横向裂缝,试件破坏时,2个试件的混凝土压碎区域长度分别为320、350 mm,深度为150、140 mm,2个试件破坏后形成的斜裂缝与其竖向纵轴夹角约为 $36^\circ$ 和 $38^\circ$ 。DZ400的2个试件在加荷至第4级荷载时,在试件受拉侧分别出现4条和2条初始弯曲横向裂缝,试件破坏时,2个试件的混凝土压碎区域长度分别为750、700 mm,深度为280、260 mm,破坏后形成的斜裂缝与其竖向纵轴角约为 $30^\circ$ 和 $33^\circ$ 。DZ800的2个试件分别在加荷至第9级和第10级荷载时,在试件受拉侧中部出现1条弯曲横向初始裂缝,试件破坏时,2个试件的混凝土压碎区域长度均为1600 mm,深度分别为420、500 mm,2个试件破坏后形成的斜裂缝与其竖向纵轴夹角约为 $27^\circ$ 。



(a) DZ200



(b) DZ400



(c) DZ800

图3 各试件破坏照片

由不同几何尺寸的试件破坏形态比较可知,在研究的尺度范围内,大尺寸试件的受压区破坏区域略大些,大尺寸试件与小尺寸试件的破坏形态基本相同,没有表现出明显的尺寸效应,只是截面尺寸越大,试件从出现“噼啪”的混凝土破坏声音到完全破坏的持续时间越短,试件破坏脆性越显严重些。

## 2.2 承载力

各试件极限荷载的实测值和规范值列于表 2,其中实测值为试验过程中的最大荷载值,规范值为按我国现行混凝土结构设计规范<sup>[15]</sup>中相应公式计算所得(材料强度按实测值代入),将实测值与规范值的比值称为安全储备系数。

由表 2 可知,使用规范公式计算所得试件极限荷载与其实测值相比,不同几何尺寸的试件其差异不同。当截面尺寸较小时,计算值低于实测值,试件有较大的安全储备。随着截面尺寸的增大,试件的安全储备系数逐渐减小,与试件 DZ200 相比,试件 DZ400 降低了 19.5%,试件 DZ800 降低了 40.5%,且试件 DZ800 已没有安全储备,实测值低于计算值。因此,使用基于小尺寸试件试验研究成果所建立的混凝土柱小偏心受压设计计算公式设计大尺寸实际构件,会过高的估计柱的承载力,使设计结果偏于不安全。

表 2 极限承载力实测值与计算值

试件编号	实测值/kN	规范值/kN	安全储备系数
DZ200-1	1 373	997	1.38
DZ200-2	1 254	997	1.26
DZ400-1	4 864	4 267	1.14
DZ400-2	4 735	4 267	1.11
DZ800-1	16 507	17 812	0.93
DZ800-2	16 089	17 812	0.90

图 4 为各试件的相对弯矩-曲率关系曲线。其中弯矩实测值考虑试验过程中试件挠度的变化,取每级荷载的实测偏心距与竖向荷载的乘积;弯矩规范值为按规范公式计算所得的极限弯矩值;曲率  $\phi$  值是根据柱中 4 根受拉钢筋和 4 根受压钢筋的应变差值求得,取 4 对数据的平均值作为该试件的曲率。为便于比较,对变量进行无量纲化,将各试件的实测弯矩值与按规范计算所得弯矩值的比值作为纵坐标,将  $\phi \cdot h_0$  作为横坐标( $h_0$  为截面有效高度),得到图 4 中的曲线。

由图 4 可见,3 组曲线的峰值随着尺寸的增大

而降低,即按规范公式计算大尺寸构件极限弯矩值,其结果的安全性逐渐降低;峰值点所对应的相对曲率也随着尺寸的增大而减小,即随着尺寸的增大,小偏心受压构件的变形能力逐渐减弱。图 5 为不同尺寸的准脆性结构的名义强度与相对挠度关系曲线<sup>[1]</sup>,该图表明,小尺寸的准脆性结构有较大的韧性,而大尺寸的准脆性结构的韧性较小,这与试验所得结果相符。

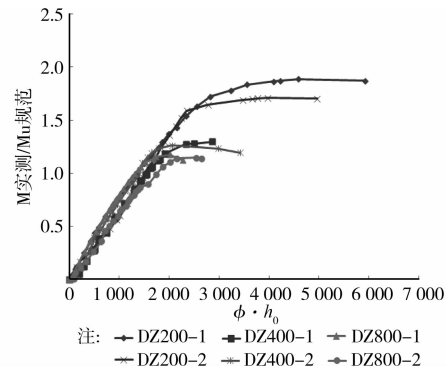


图 4 试件的相对弯矩-曲率图

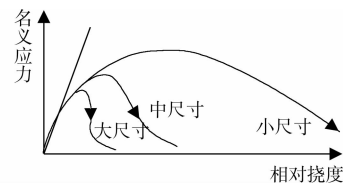


图 5 不同尺寸的结构的名义强度与相对挠度关系曲线

## 2.3 截面应变规律

3 种不同几何尺寸试件的截面实测应变分布如图 6 所示。由图 6 可见,不同几何尺寸试件的截面应变发展变化规律基本相同,荷载较低时,截面应变分布线性规律较好;随着荷载增大,裂缝出现并开展、延伸,中和轴向受压边移动,受压区高度逐渐减小,截面应变分布的线性规律有所减弱,但直至试件破坏,截面应变分布规律仍均可近似为线性。因此,混凝土柱的截面应变规律不存在明显的尺寸效应问题,平截面假定对大尺寸混凝土柱仍适用。

## 2.4 侧向挠度

各试件的荷载-跨中挠度曲线见图 7。由图 7 可见,随竖向荷载增大,不同尺寸试件的挠度曲线变化规律基本相同。各试件在极限荷载作用下的柱中挠度值列于表 3。由表 3 可知,随着截面尺寸的增大,试件 DZ200 的相对挠度(柱中挠度/柱高)较大,试件 DZ400 和 DZ800 的相对挠度接近,且明显小于试件 DZ200,即大尺寸混凝土柱的侧向弯曲变形比小尺寸试件要小些。

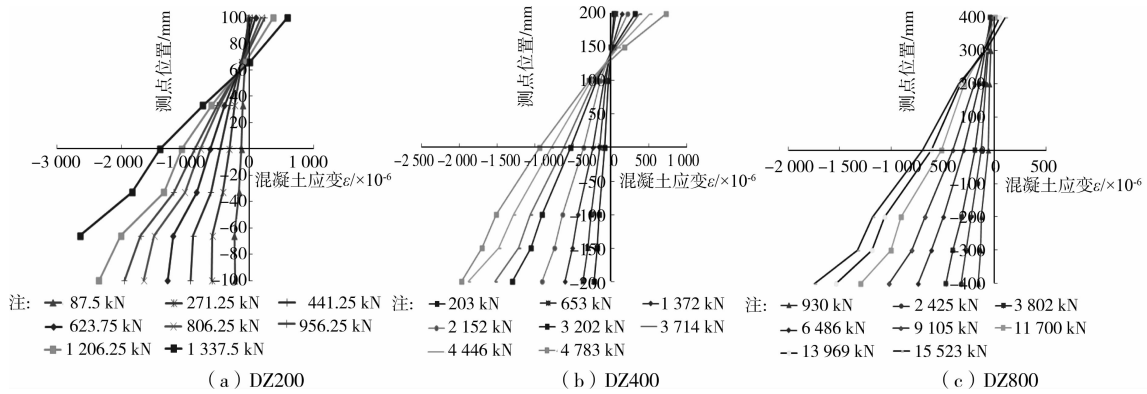


图 6 试件的实测截面应变分布

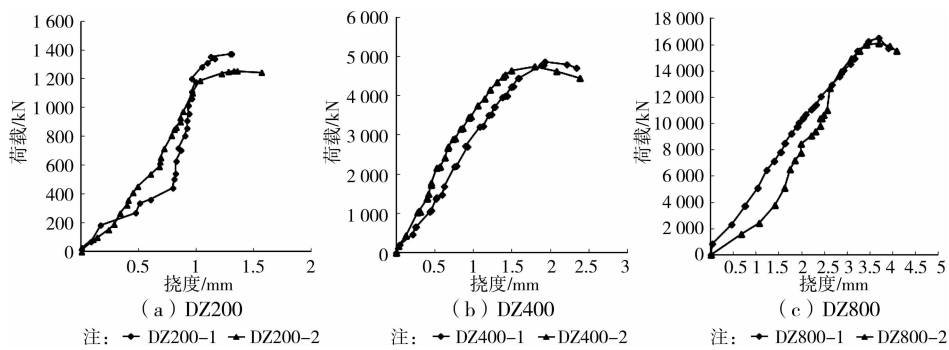


图 7 试件的荷载-跨中挠度

表 3 柱中侧向挠度

试件编号	极限荷载下的柱中挠度/mm	试件柱高/mm	相对挠度(柱中侧向挠度/柱高)/%
DZ200-1	1.405	900	0.156
DZ200-2	1.355	900	0.151
DZ400-1	1.921	1800	0.107
DZ400-2	1.797	1800	0.100
DZ800-1	3.691	3600	0.103
DZ800-2	3.694	3600	0.103

### 2.5 纵筋应变

不同几何尺寸试件在不同荷载下的钢筋应变发展规律见图 8,其中纵筋应变测点为各试件的柱中测点(即图 2 的 1-1 截面测点)。由图 8 可见,各试件达到极限荷载时均为受压钢筋先屈服,受拉钢筋未屈服,且随着几何尺寸的增大,受拉钢筋应变减小,即受拉钢筋的拉应力逐渐减小。

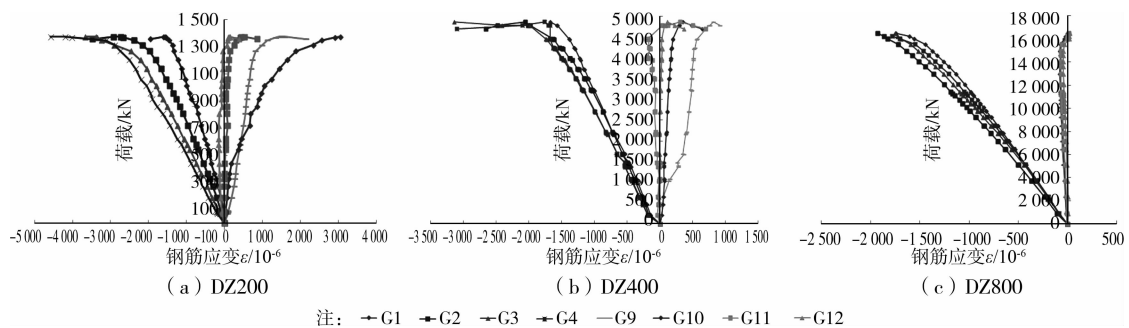


图 8 试件的荷载-钢筋应变关系

## 3 结论

1)当荷载偏心距取为  $0.25 h_0$  时,不同几何尺寸高强混凝土柱的受压破坏形态基本相同,均是典

型的小偏压脆性破坏,其尺寸效应不明显。

2)高强混凝土柱的小偏心受压承载力存在明显尺寸效应,随着截面尺寸的增大,高强混凝土柱的承载力安全储备量减小,即按现行混凝土结构设计规

范设计的大尺寸高强混凝土柱的安全性偏低。

3) 高强混凝土柱的小偏心受压变形能力存在尺寸效应, 与其极限承载力相对应的弯曲曲率随着其几何尺寸的增大而减小, 即其变形能力减弱。

4) 高强混凝土柱在小偏心受压情况下的横截面应变分布规律基本符合平截面假定, 不存在明显的尺寸效应问题。

#### 参考文献:

- [1] Bazant Z P, Chen E P. Scaling of structural failure [J]. Applied Mechanics Reviews, 1997, 50(10): 593-627.
- [2] 张明, 卢裕杰, 杨强. 准脆性材料的破坏概率与强度尺寸效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9): 1782-1879.  
Zhang M, Lu Y J, Yang Q. Failure probability and strength size effect of quasi-brittle materials [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1782-1879.
- [3] 周红, 车轶, 陈赓, 等. 混凝土立方体与圆柱体劈裂抗拉强度尺寸效应研究[J]. 混凝土, 2010(8): 13-20.  
Zhou H, Che Y, Chen G, et al. Size effect on tensile splitting strength of concrete cubes and cylinders [J]. Concrete, 2010(8): 13-20.
- [4] 钱觉时, 黄煜斌. 混凝土强度尺寸效应的研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2003(3): 1-5.  
Qian J S, Huang Y B. Review of size effect on strength of concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2003(3): 1-5.
- [5] Lessard M, Chaallal O, Aitcin P C. Testing high-strength concrete compressive strength [J]. ACI Materials Journal, 1993, 90(4): 303-308.
- [6] Sener S, Barr B, Abusiaf H F. Size-effect tests in unreinforced concrete columns [J]. Magazine of Concrete Research, 1999, 51(1): 3-11.
- [7] 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, 31(5): 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, 31(5): 30-38.
- [8] Brocca M, Bazant Z P. Size effect in concrete columns: finite-element analysis with microplane model [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(12): 1382-1390.
- [9] 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(Sup2): 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(Sup2): 1-8.
- [10] 周宏宇, 李振宝, 杜修力. RC受弯构件正截面极限承载力尺寸效应研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(1): 83-87.  
Zhou H Y, Li Z B, Du X L. Study on size effect of normal section ultimate bearing capacity of RC flexural members [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(1): 83-87.
- [11] Erdem C, Guney O, Uqur E. High-strength concrete columns under eccentric load [J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(7): 1052-1060.
- [12] 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.
- [13] 中国建筑科学研究院. 钢筋混凝土结构研究报告选集(2)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981.
- [14] GB 50152—92 混凝土结构试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.
- [15] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

(编辑 胡玲)