

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S1.006

钢筋混凝土梁的弯曲性能尺寸效应试验研究

车 轶¹, 陈志鑫^{1,2}, 宋玉普¹, 黄治宇^{1,3}

(1. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024; 2. 大连城建设计研究院有限公司, 辽宁 大连 116021;

3. 大连民族学院 土木建筑工程学院, 辽宁 大连 116600)

摘要:进行了抗压强度为 46.5~50.6 MPa, 截面高度为 250~1 000 mm 的钢筋混凝土试件弯曲性能试验。与相同尺寸和配筋的高强混凝土试件($f_{cu} = 72.1 \sim 72.4$ MPa) 的试验结果进行了对比分析, 从受弯承载力和变形能力两个方面研究了钢筋混凝土试件的受弯性能尺寸效应。研究表明, 截面尺寸的变化对钢筋混凝土构件的名义开裂弯矩、屈服弯矩和极限弯矩没有明显影响, 对位移延性和塑性铰区塑性转动能力有显著影响, 试件的位移延性系数和塑性铰转动能力随截面高度的减小而减小, 并且普通混凝土试件和高强混凝土试件的尺寸效应规律基本相同, 与混凝土强度无关。试验结果表明, 不同混凝土强度和截面高度试件的塑性铰区长度均为 1 倍截面有效高度。

关键词:钢筋混凝土梁; 尺寸效应; 弯曲性能; 延性; 转动能力

中图分类号: TU375.1; TU317.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2013)S1-0022-05

Experimental Study on Size Effect of Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams

Che Yi¹, Chen Zhixin^{1,2}, Song Yupu¹, Huang Zhiyu^{1,3}

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, P. R. China;

2. Dalian Institute of Urban and Architecture Design Co., Ltd, Dalian 116021, Liaoning, P. R. China;

3. School of Civil Engineering, Dalian Nationalities University, Dalian 116600, Liaoning, P. R. China)

Abstract: Reinforced concrete specimens with concrete compressive strength varied from 46.5 to 50.6 MPa and with depth of cross section from 250 mm to 1 000 mm subjected to bending were tested. Size effects of flexural behavior with respect to bending capacity and deformation capacity were investigated based on the analysis of the test results and those of high-strength specimens ($f_{cu} = 72.1 \sim 72.4$ MPa) of which the geometry and reinforcement layouts were identical to those of specimens tested in this study. It is shown that beam depth does not have any apparent influence on nominal cracking moment, nominal yield moment and nominal ultimate moment, and that it has significant influence on displacement ductility and plastic rotation capacity of plastic hinges of members. For normal-strength concrete specimens and high-strength concrete specimens, both the displacement ductility and the plastic rotation capacity decrease with the increasing of depth in the similar ways, and are independent of concrete strength. It is also demonstrated that the lengths of plastic hinges of members with different depth and concrete strength are approximately equal to the depth.

Key words: reinforced concrete beam; size effect; flexural behavior; ductility; rotation capacity

研究表明, 混凝土作为一种准脆性材料的力学性能存在尺寸效应, 相应地混凝土构件的一些力学和变形性能也存在尺寸效应, 因此在某些特定的情况下根据小尺寸试件试验结果建立的构件性能计算方法应用到大尺寸构件设计时, 往往不够准确也不科学^[1-4]。近年来, 各国学者对无腹筋和配置少量箍筋混凝土梁, 以及厚板等构件的受弯承载力尺寸效应进行了较深入的研究, 并取得了较大进展^[5-8]。相比之下, 人们对钢筋混凝土构件受弯性能尺寸效应研究相对较少, 并且得出的结论尚不统一。

对于受弯承载力, 多数研究认为不存在明显的尺寸效

应^[9-11], 但少数研究者^[12-13]认为存在尺寸效应; 而对于位移延性和塑性铰区转动能力, 大部分研究表明试件的尺寸效应很明显^[14-17], 但 Alca 等^[9]的研究认为无明显尺寸效应。车轶等^[18]采用中间带有短柱的梁式试件模拟框架梁梁端的受力特征, 进行了梁高 250~1 000 mm 的高强混凝土(C70)梁的弯曲性能试验。试验研究结果表明, 截面高度对构件的名义开裂弯矩、名义屈服弯矩和名义极限弯矩没有明显影响, 而构件的位移延性系数和塑性铰的塑性转角则存在明显的尺寸效应。

文章在文献[18]研究基础上, 进一步开展了普通混凝土

收稿日期: 2012-10-16

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50838001)

作者简介: 车轶(1970-), 男, 博士, 副教授, 主要从事混凝土基本理论、结构抗震和非线性分析研究, (E-mail) cheyi@dlut.edu.cn。

梁的弯曲性能尺寸效应试验研究。根据本文和文献[18]的试验结果,分析了截面高度对钢筋混凝土构件的受弯力学特性(开裂弯矩、屈服弯矩、极限弯矩)和变形能力(位移延性、塑性转动能力)的影响。

1 试验概况

除混凝土强度外,试件形式与参数与文献[18]相同。试件形式和具体几何参数分别见图 1 和表 1,其中 b 、 h 分别为截面宽度和高度, h_0 为截面有效高度, a 为计算长度, ρ_s 、 ρ'_s 和 ρ_{sv} 分别为受拉、受压纵筋和箍筋的配筋率。试件截面尺寸分别为 $100\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ 、 $200\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 、 $300\text{ mm} \times$

750 mm 和 $400\text{ mm} \times 1\,000\text{ mm}$,截面高宽比和剪跨比分别为 $b/h=1:2.5$ 和 $a/h_0=3.5$ 。所有试件的受拉纵筋配筋率均为 1.08% ,在混凝土设计规范[19]规定的适筋梁范围内,配箍率为 0.52% ,受压纵筋配筋率分为两种,分别为 1.08% 和 0.69% 。

采用 C40 普通商品混凝土浇筑试件,同时每个试件预留 3 个混凝土标准试块,与试件同条件养护,试件试验前进行立方体试件强度试验,确定试件混凝土强度 f_{cu} 。纵筋采用 HRB400 级钢筋,箍筋采用 HPB235 级钢筋。混凝土组分量及钢筋力学性能分别见表 2 和表 3。试件配筋及混凝土强度实测值见表 1。

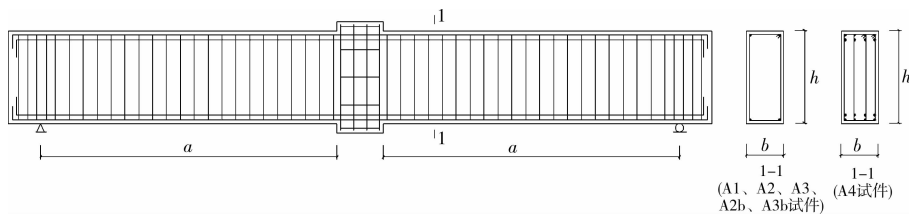


图 1 试件形式及尺寸

表 1 试件参数

试件编号	b/mm	h/mm	h_0/mm	a/mm	f_{cu}/MPa	受拉钢筋	$\rho_s/\%$	受压钢筋	$\rho'_s/\%$	箍筋	$\rho_{sv}/\%$
A1	100	250	210	740	46.5	2C12	1.08	2C12	1.08	B 6.5@130	0.52
A2	200	500	456	1 600	47.3	2C25	1.08	2C25	1.08	B 8@100	0.52
A3	300	750	688	2 400	50.6	3C25+2C22	1.08	3C25+2C22	1.08	B 10@100	0.52
A4	400	1 000	913	3 200	46.7	8C25	1.08	8C25	1.08	B 10@150	0.52
A2b	200	500	456	1 600	49.1	2C25	1.08	2C20	0.69	B 8@100	0.52
A3b	300	750	688	2 400	49.1	3C25+2C22	1.08	3C25	0.69	B10@100	0.52

表 2 混凝土各组分用量

水泥/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	石子/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	砂/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	水/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	外加剂/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	掺合料/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
300	768	1 035	195	3.7	65

表 3 钢筋力学性能

钢筋直径/mm	等级	f_y/MPa	f_u/MPa
6	HPB235	743	877
8	HPB235	671	732
10	HPB235	454	598
12	HRB400	497	718
20	HRB400	501	746
22	HRB400	445	654
25	HRB400	467	652

试验加载装置如图 2 所示。千斤顶作用于试件中部短柱处施加竖向荷载,并用荷载传感器测量荷载值。在梁端和支座处布置电子位移计和 LVDT 测量试件的挠度,纵筋和箍筋主要位置处布置电阻应变片测量钢筋应变,梁端顶部布置混凝土应变片以测量混凝土压应变。试验加载程序参照《混凝土结构试验方法标准》[20]进行。



图 2 加载装置

2 试验现象与试验结果

2.1 试验现象与荷载-挠度曲线

图 3 为各试件的弯矩-挠度曲线。各试件由加载至最终破坏的过程大体相近。在开裂之前,曲线为直线,试件处于线弹性阶段;开裂之后,构件刚度有所下降,曲线斜率增大;当达到屈服荷载时,曲线出现明显的拐点,挠度增加较快;当受压区混凝土出现明显的压碎现象时,荷载迅速下降,试件破坏。以试件 A4 为例,加载至 122.2 kN 时,短柱左右两侧

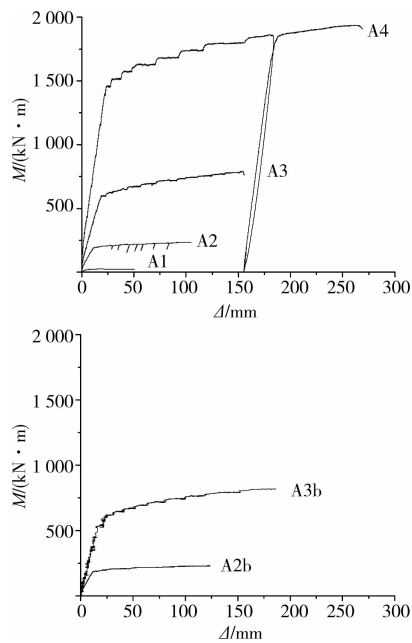


图 3 试件的弯矩-挠度曲线

梁端出现竖向弯曲裂缝,两侧裂缝位置和高度基本对称。加载至 909.1 kN 时,受拉纵筋屈服,弯矩-挠度曲线出现明显拐点,此时短柱左侧梁的主要裂缝发展至距梁顶约 150 mm 处,右侧发展至约 200 mm 处,此外在主裂缝附近还出现许多短斜裂缝,最大裂缝宽度为 0.34 mm。在这一级荷载阶段,短柱左侧梁端压区保护层混凝土出现水平裂缝,加

载至 945.9 kN·m 时,短柱右侧梁也出现水平裂缝。加载至 1 166.8 kN 时,靠近梁端的主要裂缝斜向延伸向梁端顶部,最大裂缝宽度大于 3 mm,梁顶混凝土出现明显的压碎迹象,试件破坏。各试件的破坏形态和裂缝分布图 4,破坏时各试件短柱两侧在的裂缝形态基本对称。

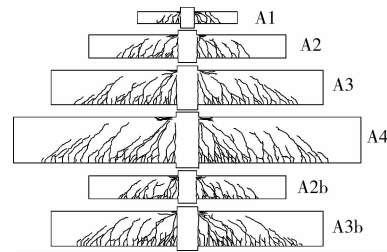


图 4 各试件裂缝形态

2.2 试验结果

各试件的开裂、屈服和极限弯矩,以及相应的位移试验结果见表 4。混凝土受拉区内出现第一条弯曲裂缝时的弯矩为开裂弯矩;最大弯矩截面纵向受拉钢筋应变达到屈服应变时的弯矩为构件的屈服弯矩;当梁顶受压区混凝土出现破碎时,认为试件发生最终破坏,此时的弯矩为极限弯矩。

各试件的塑性铰区长度可根据受拉纵筋上的应变测量结果确定。表 5 给出各试件梁端塑性铰区长度 l_p 。试验结果。由结果可得,塑性铰区长度 l_p 约为 1 倍的截面有效高度。文献[18]的试验结果表明,高强混凝土梁的塑性铰区长度为 0.95~1.15 h_0 ,与文章结论十分接近,由此可见混凝土强度对梁的塑性铰区长度没有明显影响。

表 4 试件试验结果

试件编号	$M_{cr}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_y/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_u/(\text{kN}\cdot\text{m})$	Δ_y/mm	Δ_u/mm	Δ_u/Δ_y
A1	3.20	17.30	22.41	4.65	57.66	12.40
2A	27.80	193.00	235.25	9.87	104.75	10.61
3A	94.08	593.51	786.76	15.78	152.28	9.65
4A	195.46	1454.56	1866.88	22.07	187.98	8.52
b2A	25.60	190.38	229.83	10.89	107.73	9.89
b3A	84.48	608.77	828.13	20.27	179.71	8.87

表 5 梁端塑性铰区长度实测结果

试件编号	h_0/mm	l_p/mm	l_p/h_0
1A	210	215	1.02
2A	457	460	1.01
3A	688	790	1.15
4A	913	900	0.99
b2A	457	460	1.01
b3A	688	865	1.25

3 截面高度对弯曲性能影响

3.1 名义受弯承载力

为了考察试件截面高度对受弯承载力的影响,试件的开裂弯矩 M_{cr} 、屈服弯矩 M_y 和极限弯矩 M_u 分别用名义弯矩

M_{cr}/bh_0^2 、 M_y/bh_0^2 和 M_u/bh_0^2 表示,并绘于图 5。图中还同时给出了文献[18]的试验结果,以便比较混凝土强度的影响。可以看出,文中试件与文献[18]试件的开裂弯矩、屈服弯矩和极限弯矩均未表现出明显的尺寸效应。

相同尺寸和配筋条件下,文中试件的开裂弯矩明显小于文献[18]中高强混凝土试件的开裂弯矩,而相应的屈服弯矩和极限弯矩则相差不大。原因是开裂弯矩主要由混凝土抗拉强度控制,屈服和极限弯矩则主要与纵向钢筋强度有关,文献[18]中高强混凝土试件的混凝土强度为 72.1~72.4 MPa,明显高于文中试件,而纵向钢筋的屈服强度相差不大。

3.2 位移延性

构件的变形能力可用位移延性系数 μ 来描述,由下式计算:

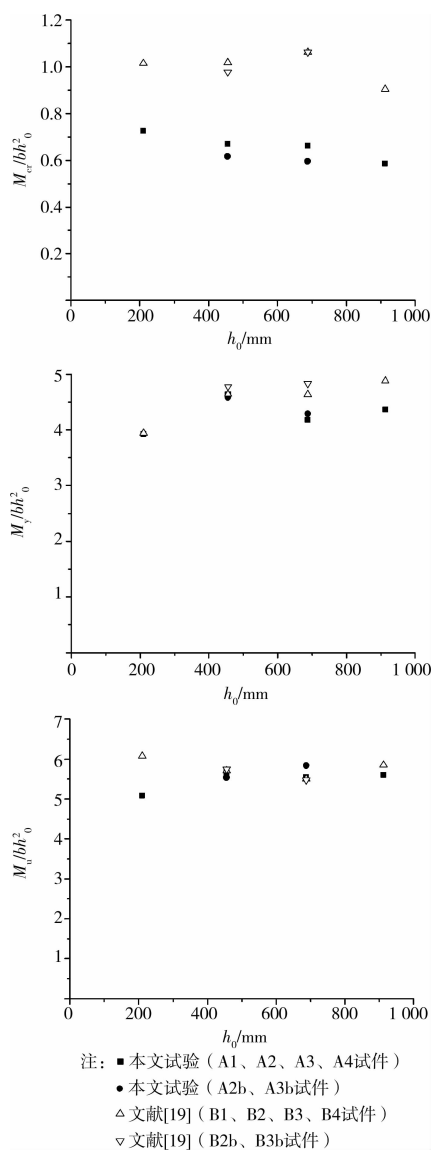


图 5 梁高对试件名义弯矩随梁高的影响

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

式中: Δ_u 、 Δ_y 分别为极限荷载和屈服荷载下的竖向极限位移和屈服位移。

图 6 同时给出了本文和文献[18]中各试件的位移延性系数结果随梁高变化情况。由图可见,本文和文献[18]各试件的位移延性系数均随试件高度增加有明显下降趋势,并且二者下降规律相近。因此可以认为钢筋混凝土适筋梁的位移延性系数存在明显的尺寸效应,随梁高的增加而减小,并且这种减小规律不受混凝土强度影响。

对比文献[18]的试验结果可以发现,其他参数相同的情况下,混凝土强度低的试件位移延性系数较高,主要原因是尽管文中试件与文献[18]试件配筋相同,但文中试件的箍筋屈服强度实测值要明显高于文献[18]试件,临近构件破坏时对梁端受压区混凝土的约束能力更强,有利于提高构件的延性。此外,由文章的试验结果还可以发现,纵向受压钢筋配筋率较低的试件 A2b 和 A3b 的延性系数分别为试件 A2 和 A3 的 93% 和 92%,说明增加受压钢筋配筋率可提高构件的延性。

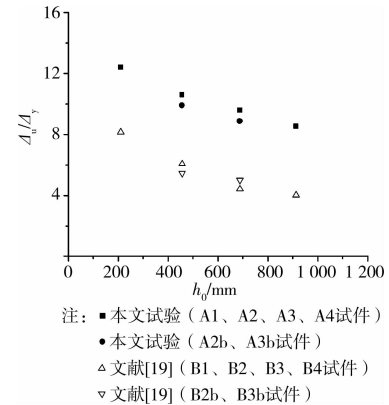


图 6 梁高对试件延性系数随梁高的影响

3.3 塑性铰转角

塑性铰区的塑性转动能力是描述钢筋混凝土构件弹塑性变形能力的重要参数。由于试验中直接测量塑性铰区的转动能力难度较大,文章利用挠度测量结果间接确定试件的塑性铰区塑性转角。由于纵向受拉钢筋屈服后,试件的竖向变形主要集中在塑性铰区,塑性铰区以外区域的变形相对较小,因此,可以利用试件挠度试验结果计算塑性铰区的塑性转角:

$$\theta_p = \theta_u - \theta_y = \frac{\Delta_u - \Delta_y}{a} \quad (2)$$

式中: θ_u 、 θ_y 分别为极限荷载和屈服荷载时的塑性铰区两端截面的相对转角; Δ_u 、 Δ_y 分别为极限荷载和屈服荷载时的梁端极限位移和屈服位移; a 为梁端到支座处距离。

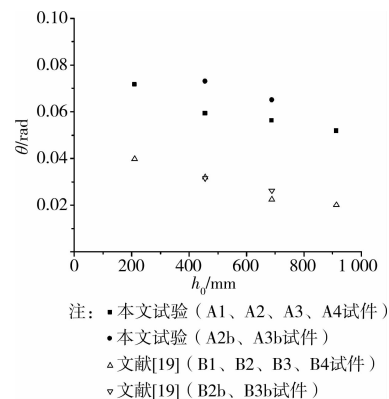


图 7 梁高对塑性铰转动能力的影响

图 7 为此文和文献[18]试件的试验结果。可以看出,文中的普通混凝土试件和文献[18]的高强混凝土试件的塑性铰转角均表现出明显的尺寸效应,塑性转角随梁高的增大而减小,并且相同条件下普通混凝土和高强混凝土试件的塑性转动能力随截面高度的下降趋势大体相同。

4 结 论

文章进行了强度为 46.5~50.6 MPa 的混凝土试件弯曲性能尺寸效应试验研究,并与文献[18]中相同尺寸和配筋的高强混凝土试件的试验结果进行了对比分析,得出结论如下:

1) 对于混凝土试件的弯曲性能是否存在尺寸效应问题,文章试验结论与高强混凝土试验结论一致,即试件的名义开裂弯矩、屈服弯矩和极限弯矩不存在明显的尺寸效应,即不

受截面高度影响;试件的变形指标,如位移延性系数和塑性铰区的塑性转动能力则存在明显尺寸效应,随截面高度的增加而减小,并且普通混凝土和高强混凝土试件的位移延性系数和强度尺寸效应规律大致相同。

2)其他参数相同的情况下,混凝土强度低的试件位移延性系数较高,原因是文中试件的箍筋屈服强度实测值要明显高于文献[18]试件,对梁端受压区混凝土的约束更强,有利于提高构件的延性。

3)文章和文献[18]的试验结果均表明,混凝土试件的塑性铰区长度约为 1 倍的截面有效高度。

参考文献:

- [1] Bazant Z P, Ozbolt J, Eligehausen R. Fracture size effect: Review of evidence for concrete structures [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1994, 120(8): 2377-2398.
- [2] Bazant Z P, Gettu R, Jirasek M, et al. Quasibrittle fracture scaling and size effect-Final report [J]. *Materials and Structures*, 2004, 37: 547-568.
- [3] Viso J R D, Carmona J R, Ruiz G. Shape and size effects on the compressive strength of high-strength concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38: 386-395.
- [4] 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(3): 14-18.
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(3): 14-18.
- [5] Shioya T, Iguro M, Nojiri Y, et al. Shear strength of large reinforced concrete beams[C] // *Live*, Bazant Z P. *Fracture Mechanics; Applications to Concrete*. Detroit: ACI, 1989: 259-279.
- [6] Che Y, Yu L, Song Y P. Shear strength of reinforced concrete beams without web reinforcement[C] // *Advances and Trends in Structural Engineering, Mechanics and Computation*. London, UK: CRC Press, 2010: 195.
- [7] Collins M P, Kuchma D. How safe are our large, lightly reinforced concrete beams, slabs, and footings? [J]. *ACI Structural Journal*, 1999, 96(4): 482-490.
- [8] Yu Q, Bazant Z P. Can stirrups suppress size effect on shear strength of RC beams? [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2011, 137(5): 607-617.
- [9] Alca N, Alexander S D B, Macgregor J G. Effect of size on flexural behavior of high-strength concrete beams [J]. *ACI Structural Journal*, 1997, 94(1): 59-67.
- [10] Ozbolt J, Mestrovic D, Li Y J, et al. Compression failure of beams made of different concrete types and sizes [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2000, 126(2): 200-209.
- [11] Corley G W. Rotational capacity of reinforced concrete beams [J]. *Journal of the Structural Division, ASCE*, 1966, 92(5): 121-146.
- [12] Appa R G, Vijayanand I, Eligehausen R. Studies on ductility and evaluation of minimum flexural reinforcement in RC beams [J]. *Materials and Structures* 2008, 41(4): 759-771.
- [13] Belgin C M, Sener S. Size effect on failure of over reinforced concrete beams [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75: 2308-2319.
- [14] Carpinteri A, Corrado M, Paggi M, et al. New model for the analysis of size-scale effects on the ductility of reinforced concrete elements in bending [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2009, 135(3): 221-229.
- [15] Hillerborg A. Rotational capacity of reinforced concrete beams [J]. *Norwegian Concrete Research*, 1988, 7: 121-134.
- [16] Bigaj A J, Walraven J C. Size effect on rotational capacity of plastic hinges in reinforced concrete beams [J]. *CEB Bulletin d'Information*, 1993, 218: 7-23.
- [17] Bigaj A J, Walraven J C. Size effects in plastic hinges of reinforced concrete members [J]. *Heron*, 2002, 47(1): 53-75.
- [18] 车轶,郑新丰,王金金,等. 单调荷载作用下高强混凝土梁弯曲线性能尺寸效应研究[J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(6): 96-102.
Che Y, Zheng X F, Wang J J, et al. Size effect on flexural behavior of reinforced high-strength concrete beams subjected to monotonic loading [J]. *Journal of Building Structures*, 2012, 33(6): 96-102.
- [19] 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.
- [20] 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.

(编辑 周沫)