

文章编号:1673-2049(2015)01-0001-07

小偏心钢筋混凝土柱受压性能的尺寸效应试验

杜修力, 卢爱贞, 赵 均

(北京工业大学 城市与工程安全减灾省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要:为分析小偏心钢筋混凝土柱受压性能的尺寸效应,对偏心距分别为 0.1 倍截面有效高度和 0.25 倍截面有效高度的 2 组几何相似的钢筋混凝土柱进行偏心受压破坏试验,柱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、截面应变分布、承载力、变形能力,揭示了其尺寸效应规律。研究表明:小偏心钢筋混凝土柱的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;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,其安全储备降低,变形能力减弱。

关键词:小偏心钢筋混凝土柱;尺寸效应;单调加载;开裂荷载;偏心距;安全储备系数

中图分类号:TU375.4 文献标志码:A

Experiment on Size Effect of Small Eccentric Reinforced Concrete Columns Under Compressive Loads

DU Xiu-li, LU Ai-zhen, ZHAO Jun

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To analyze size effect of small eccentric concrete columns under compressive loads, two groups of reinforced concrete columns, whose eccentricities were 0.1 and 0.25 times effective height of sections, were produced, and the specimen sizes were 200 mm×200 mm, 400 mm×400 mm, 800 mm×800 mm respectively. Damage mode, sectional strain distribution, bearing capacity and deformability of reinforced concrete columns were compared to reveal the size effect law. The results show that the size has less effect on damage mode and the sectional strain distribution of columns, and the size effect laws on bearing capacity and deformability of columns are obvious. The safety storage and deformability of columns decrease with the size increasing.

Key words: small eccentric reinforced concrete column; size effect; monotonic loading; crack load; eccentricity; safety storage coefficient

0 引 言

钢筋混凝土结构的力学性能主要取决于混凝土和钢筋的力学性能。钢筋具有较好的匀质性,其力学性能简单易掌握,而混凝土属于准脆性材料,试验研究表明^[1-3],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着随几何尺寸变化而变化的尺寸效应,这种尺寸效应必然直接反映到钢筋混凝土结构的力学性能上。另外,钢筋和混凝土之间粘结力的大小受混凝土保护层厚度、混凝土强度、钢筋直径以及外形、钢筋间距等影响,这些因素的影响程度都会随试件尺寸的变化而变化,其力学

收稿日期:2014-10-11

基金项目:国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(51421005)

作者简介:杜修力(1963-),男,四川广安人,教授,博士研究生导师,工学博士,博士后,E-mail:duxuli@bjut.edu.cn。

性能也会随试件尺寸不同而发生变化。因此,钢筋混凝土结构的力学性能在试件尺寸变化时,除了受混凝土材料力学性能的尺寸效应影响外,还可能存在试件层次的尺寸效应^[4]。对此,各国学者开展了相关研究^[5-10],取得了一些研究成果。受压性能的研究多是基于轴压试验,且以往的研究中,试件尺寸尚处于不超过 300 mm 的范围,对实际工程应用中更大尺寸试件的研究还不充分,其尺寸效应规律与小尺寸范围内尺寸效应规律的差异还存在疑义。因此,开展大尺寸的偏心受压试件破坏试验,研究其相应的破坏机理、力学性能和基于此开展钢筋混凝土柱尺寸效应的深入研究,是建立更为科学的钢筋混凝土结构设计方法的需要,具有重要的工程意义和科学意义。

本文在总结前人研究成果^[11-13]的前提下,对 2 组不同偏心距、不同尺寸的钢筋混凝土受压柱进行偏压破坏试验研究。

1 试验概况

1.1 试件设计

本文考虑了试件尺寸、受荷方式等因素的影响,对 2 组不同偏心距 e_0 ($e_0=0.1h_0, 0.25h_0$, h_0 为截面有效高度)下的钢筋混凝土受压柱进行尺寸效应研

究,本文试验中研究对象均为短柱,确定柱的长细比为 4.5。试件均采用对称配筋,所有的纵筋采用 HRB335 级钢筋,荷载一侧纵筋截面面积为 A_s' ,另一侧纵筋截面面积为 A_s ,同时为了防止试件端部局部承压破坏,在每个试件端部各设 1 层钢筋网片,同时还要加强牛腿构造以防止局部破坏,在牛腿部位设置复合箍筋。箍筋和钢筋网均采用 HPB235 级钢筋,纵筋与箍筋之间均采用绑扎的方式进行连接。混凝土由商品混凝土搅拌站供应,其强度等级为 C30。为忽略箍筋对混凝土受压的约束增强影响,本文试验试件采用柱中部无箍筋的设计方案。每组偏心距下均为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$, $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$, $800\text{ mm} \times 800\text{ mm}$ 三种截面尺寸,每种截面 2 个完全相同的试件,记为 A, B, 试件总根数为 12 根。试件的具体参数见表 1。试件截面尺寸与配筋(以 PY-1 试件为例)及试件制作如图 1, 2 所示。

1.2 试验量测及加载

试验量测的内容主要包括混凝土的拉、压应变和纵筋应变以及试件的侧向挠度。本文试验因 3 种截面尺寸试件承载力相差很大,故使用 2 套试验加载设备,分别为液压试验机加载及 4 000 t 多功能电液伺服加载系统加载,数据采集均采用 DH3815 静态应变测试系统自动采集。图 3 为试验量测仪布

表 1 试件参数

Tab. 1 Specimen Parameters

| 试件编号 | e_0 | 试件尺寸/mm | | | 混凝土强度等级 | h_0 /mm | 纵筋截面面积/mm ² | 纵筋型号 | 牛腿箍筋型号 | 保护层厚度/mm | 试件根数 |
|------|------------|---------|--------|--------|---------|-----------|------------------------|-------------|---------------|----------|------|
| | | 宽度 b | 高度 h | 长度 l | | | | | | | |
| PY-1 | 0.1 h_0 | 200 | 200 | 900 | C30 | 185 | 201 | 4 Φ 8 | Φ 6@30 | 15 | 2 |
| PY-2 | | 400 | 400 | 1 800 | C30 | 370 | 804 | 4 Φ 16 | Φ 8@60 | 30 | 2 |
| PY-3 | | 800 | 800 | 3 600 | C30 | 740 | 3 217 | 4 Φ 32 | Φ 10@120 | 60 | 2 |
| PY-4 | 0.25 h_0 | 200 | 200 | 900 | C30 | 185 | 201 | 4 Φ 8 | Φ 6@30 | 15 | 2 |
| PY-5 | | 400 | 400 | 1 800 | C30 | 370 | 804 | 4 Φ 16 | Φ 8@60 | 30 | 2 |
| PY-6 | | 800 | 800 | 3 600 | C30 | 740 | 3 217 | 4 Φ 32 | Φ 10@120 | 60 | 2 |

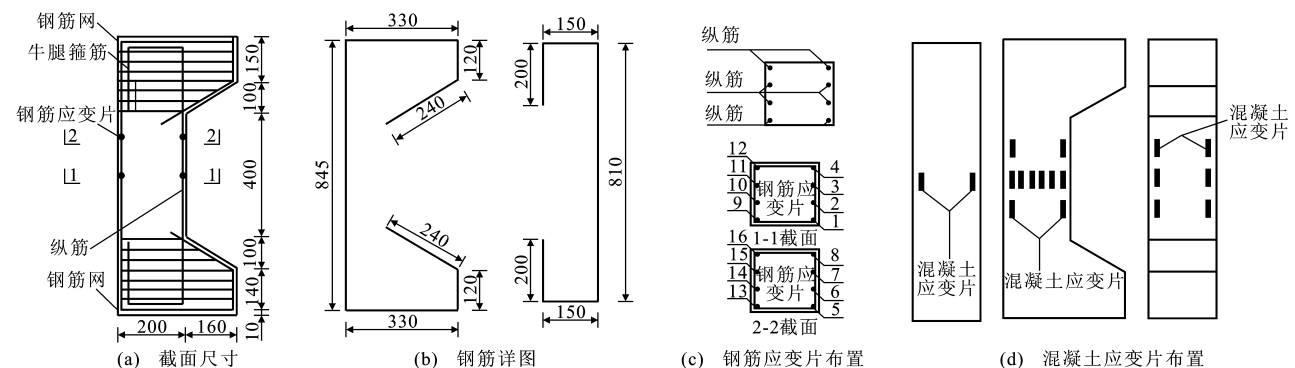


图 1 试件截面尺寸与配筋(单位:mm)

Fig. 1 Section Dimensions and Reinforcement of Specimens (Unit:mm)



(a) 混凝土浇筑前



(b) 混凝土浇筑后

图 2 试件制作

Fig. 2 Specimen Preparation

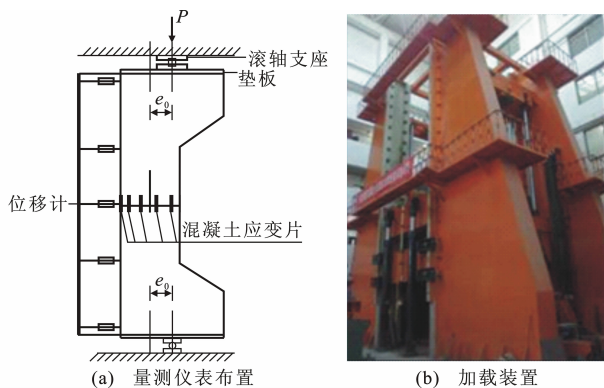


图 3 量测仪表布置及加载装置

Fig. 3 Measuring Instrument Arrangement and Loading Setup

置及加载装置,其中, P 为荷载。

本文试验是单调加载静力试验^[14],即对试件进行分级施加荷载。在正式加载前,先进行预加载,预加载值约为计算极限荷载的 10%,校正试件和仪表后,正式开始施加荷载,每级荷载约为极限荷载的 10%,并持荷约 5 min,加载达到预估极限荷载的 80%后,级差减半,加载至极限荷载 90%后,加载由力控制改为位移控制,并加载直至试件破坏,人工观测裂缝。

2 试验结果及分析

2.1 试件破坏过程与破坏形态

图 4 为试件破坏形态。对于 2 组试件,均属于小偏心受压,但 2 组试件在加载过程中的试验现象有些区别。

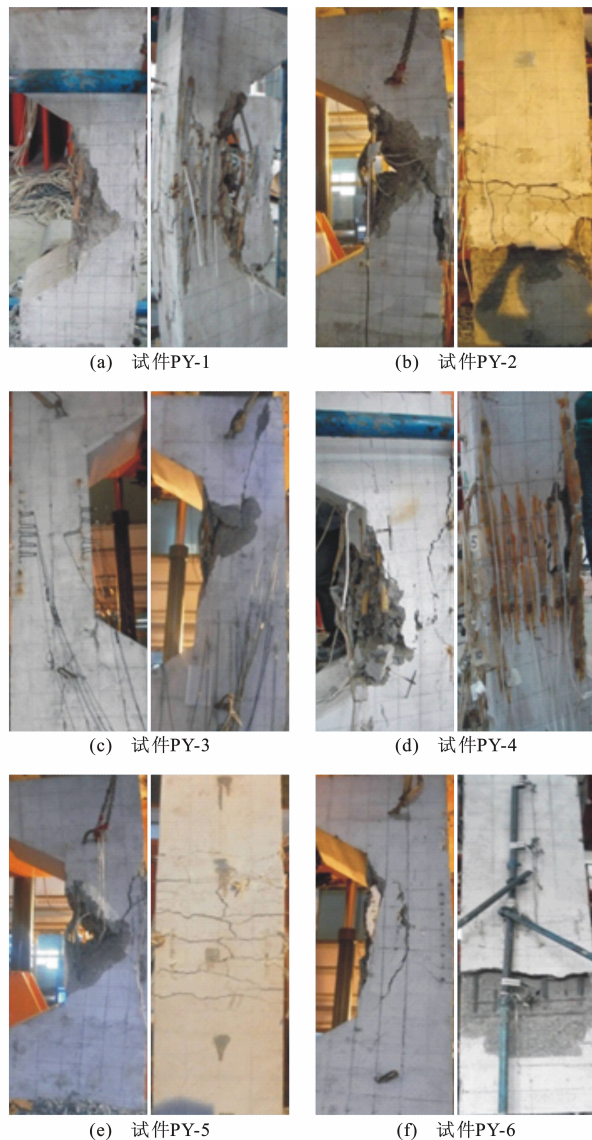


图 4 试件破坏形态

Fig. 4 Failure Modes of Specimens

对于第 1 组 $e_0 = 0.1h_0$ 的各尺寸试件,受压区边缘混凝土的压应变增长较快,出现明显纵向裂缝的荷载和极限荷载非常接近,破坏没有明显征兆,压碎区较大;破坏过程中,由于有效截面面积大幅度减小,导致在侧面形成巨大的 X 型裂缝,其中截面尺寸为 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 的试件背面下部被剪开,远离加载侧出现横向裂缝。PY-1-A 试件在加载中压区混凝土应力增长过快,试件承载力还未达到规范

计算值就破坏了,其原因可能是该试件预加载时压力太小,没有完全消除试件的构造变形,致使正式加载初期柱中部的挠度较大,导致此试件失效;PY-3-A 由于在加载过程中,刀铰尺寸相对较小(在以后的试验中进行了改进),在偏心距很小的情况下,试件出现了劈压破坏,也导致试件失效。

对于第2组 $e_0=0.25h_0$ 的各尺寸试件,加载初期均没有明显裂缝,随着荷载增加,远离加载侧钢筋开始转为受拉,同侧混凝土边缘出现横向裂缝,但裂缝发展缓慢;加载至80%极限荷载时,受压区边缘混凝土开始开裂,并伴有“噼噼啪啪”的声音,直至达到极限荷载时,混凝土剥落,柱中部混凝土被压碎,发出砰的一声巨响,试件破坏,同样由于有效截面面积大幅度减小,导致在侧面形成巨大的X型裂缝,

其中截面尺寸为 $800\text{ mm}\times 800\text{ mm}$ 的试件背面下部被剪开,侧面形成X型裂缝。

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,没有表现出明显的尺寸效应,但是截面尺寸越大,试件从出现“噼啪”的声音到混凝土完全破坏持续时间越短,试件破坏脆性越显著。

2.2 钢筋应变分析

图5为2组偏心距下各尺寸试件的钢筋荷载-应变曲线。对于偏心距为 $0.1h_0$ 的各尺寸试件,加载初期,受压钢筋应变 ε 和荷载基本呈线性增长,试件处于弹性变形阶段,两侧钢筋均为受压状态,继续加载至混凝土达到受压强度,出现纵向裂缝,受压钢筋达到屈服强度,应变快速增长直至混凝土被压碎,远离轴压力一侧钢筋逐渐向受拉转变。

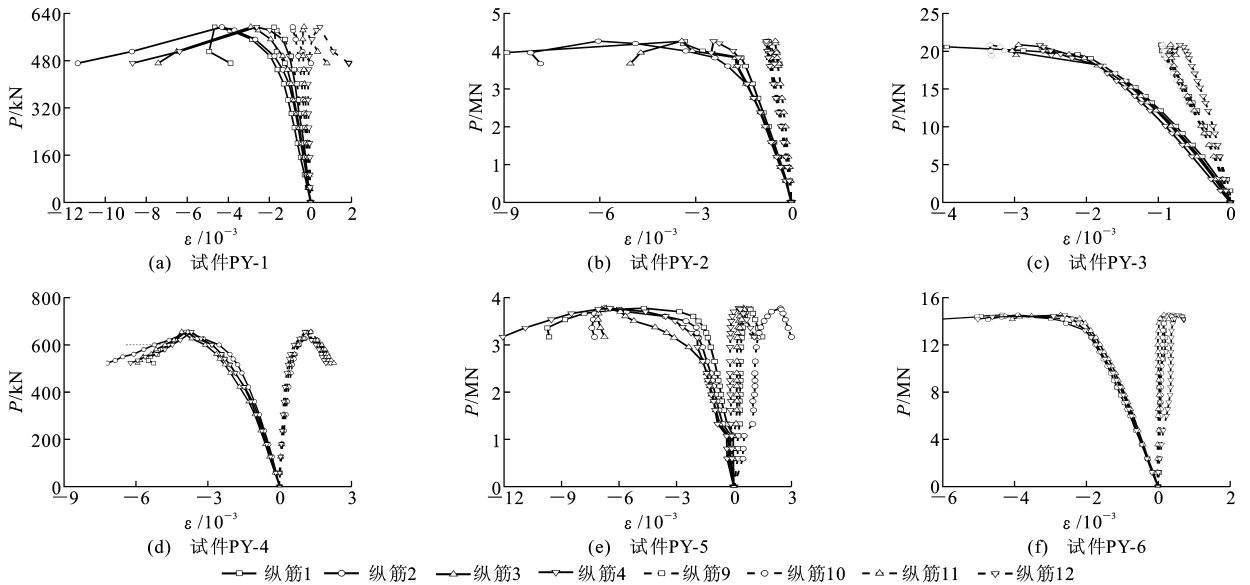


图5 钢筋荷载-应变曲线

Fig. 5 Loading-strain Curves of Reinforcement

对于偏心距为 $e_0=0.25h_0$ 的各尺寸试件,加载初期,受压钢筋应变和荷载基本呈线性增长,远离轴压力一侧钢筋处于受拉和受压界线附近,试件处于弹性变形阶段,随着荷载增加,混凝土达到受压强度,受压钢筋屈服,应变增长迅速,远离轴压力一侧钢筋逐渐都转为受拉,应变增长缓慢,且达到极限荷载时均未屈服。

对比2组偏心距下不同几何尺寸试件的钢筋荷载-应变曲线,在研究的尺度范围内,受拉钢筋的峰值应变随着尺寸的增大而减小。

2.3 截面应变分布

图6给出了2组偏心距下各尺寸试件柱中截面的实测应变分布。从图6可以看出,2组偏心距下各尺寸试件直至试件破坏,截面应变分布规律仍均

可近似为线性,且不同几何尺寸试件的截面应变变化规律基本相同,都能较好地符合中国现行《混凝土结构设计规范》^[15](GB 50010—2010)中偏压试件强度计算理论的平截面假定。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 试件开裂分析

表2为试件开裂荷载与极限荷载。由表2可知,在相同偏心距下,不同尺寸试件的相对开裂荷载(P_{cr}/P_u)随尺寸增大有相对增大的趋势。对小偏心试件来说,尺寸越大,试件的延性越差,偏心距越小,趋势越明显。

2.5 试验承载力分析

为方便与实测值进行比较,规范计算值中的混

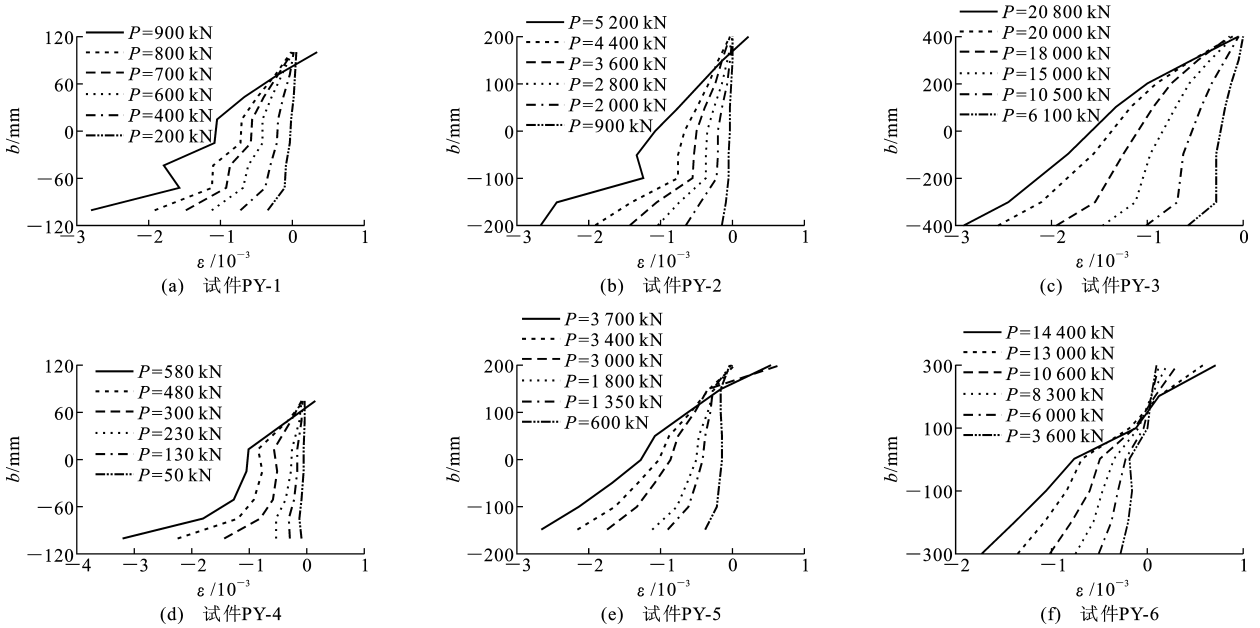


图 6 柱中截面应变分布

Fig. 6 Strain Distributions of Column Sections

表 2 试件开裂荷载与极限荷载

Tab. 2 Crack Load and Ultimate Load of Specimens

| 试件编号 | e_0 | h_0 /mm | 开裂荷载 P_{cr} /kN | 极限荷载 P_u /kN | $\frac{P_{cr}}{P_u}$ |
|--------|------------|-----------|----------------------|-------------------|----------------------|
| PY-1-B | 0.1 h_0 | 185 | 255 | 895 | 0.29 |
| PY-2-A | | 370 | 2 400 | 4 258 | 0.56 |
| PY-2-B | | 370 | 3 200 | 4 950 | 0.64 |
| PY-3-B | | 740 | 16 000 | 20 770 | 0.77 |
| PY-4-A | 0.25 h_0 | 185 | 200 | 655 | 0.31 |
| PY-4-B | | 185 | 200 | 626 | 0.32 |
| PY-5-A | | 370 | 1 350 | 3 770 | 0.36 |
| PY-5-B | | 370 | 1 350 | 3 900 | 0.35 |
| PY-6-A | | 740 | 7 800 | 14 500 | 0.53 |
| PY-6-B | | 740 | 7 800 | 14 360 | 0.54 |

表 3 试件承载力对比

Tab. 3 Comparison of Specimen Bearing Capacity

| 试件编号 | e_0 | 试验承载力/kN | 计算承载力/kN | 安全储备系数 η | 安全储备系数平均值 |
|--------|------------|----------|----------|---------------|-----------|
| PY-1-B | 0.1 h_0 | 895 | 617 | 1.45 | 1.45 |
| PY-2-A | | 4 258 | 3 277 | 1.29 | |
| PY-2-B | | 4 950 | | 1.51 | |
| PY-3-B | | 20 770 | 15 372 | 1.35 | 1.35 |
| PY-4-A | 0.25 h_0 | 655 | 464 | 1.41 | 1.38 |
| PY-4-B | | 623 | | 1.34 | |
| PY-5-A | | 3 770 | 2 850 | 1.32 | 1.34 |
| PY-5-B | | 3 900 | | 1.36 | |
| PY-6-A | | 14 500 | 11 290 | 1.28 | 1.27 |
| PY-6-B | | 14 360 | | 1.27 | |

混凝土和钢筋材料强度均采用材性试验值,计算结果见表 3,其中,安全储备系数 η 为实测值与规范计算值的比值。在《混凝土结构设计规范》中安全储备系数取为 1.4。由表 3 可知:对于偏心距为 0.1 h_0 ,截面尺寸为 200 mm×200 mm 的试件,其安全储备系数大于 1.4,而随着截面尺寸增加,安全储备系数逐渐减小,当截面尺寸为 800 mm×800 mm 时,安全储备系数已经小于 1.4;对于偏心距为 0.25 h_0 的情况,3 种截面尺寸试件的安全储备系数均小于规范的 1.4,且随着尺寸的增大而减小。因此,从本文研究来看,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计算公式设计实际大尺寸试件,会过高地估计柱的承载力,使设计结果偏于不安全,偏心距越大越不安全。

2.6 混凝土荷载-应变曲线分析

图 7 为 2 组偏心距下各尺寸试件在各级荷载下的混凝土荷载-应变($P-\epsilon$)曲线,其中,横坐标为跨中截面受压边缘处所测得的标距内的平均应变值,并对纵坐标做了量纲为 1 化处理, f_c 为混凝土棱柱体抗压强度,采用本文试验的混凝土试块材料标准值。从图 7 可以看出:相同偏心距下,各尺寸试件混凝土的峰值应变及极限应变均随着试件尺寸的增大而减小,呈现出明显的尺寸效应;相同尺寸试件的峰值应变及极限应变也随偏心距的增大而减小。另外,从图 7 还可以看出,在峰值应变后的下降段,大尺寸试件的应力-应变曲线较小尺寸陡,尺寸效应明显,但由于本文试验研究的是小偏心受压范畴,且柱中无约束箍筋,破坏时无征兆,对于个别试件无法测到其

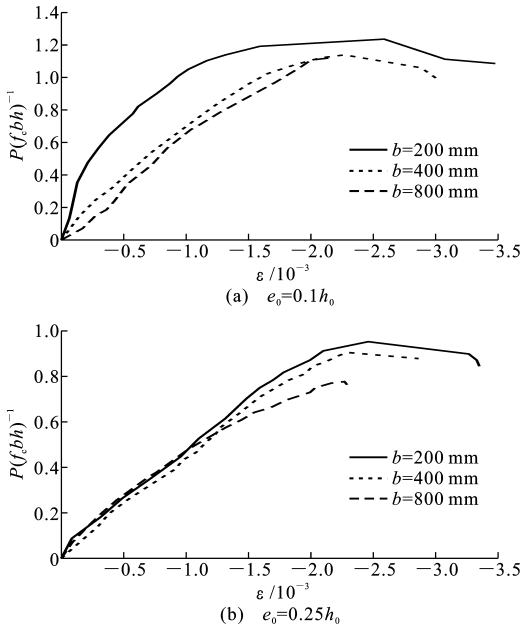


图7 混凝土荷载-应变曲线

Fig. 7 Load-strain Curves of Concrete

下降段,因此对混凝土峰值应变后的尺寸效应研究不在本文研究范围内。

2.7 荷载-挠度曲线分析

图8给出了2组偏心距下各试件的荷载-挠度($P-f$)曲线。为便于分析尺寸对试件荷载-挠度的影响,着重对各试件在极限荷载时的柱中挠度值以及试件破坏时的跨中挠度进行分析,将消除柱两端侧移的跨中挠度值汇总于表4,定义相对挠度为挠度与柱长的比值,对比不同尺寸试件的数据可知,试件峰值荷载时的相对挠度及破坏时的相对挠度均会随

表4 柱中挠度

Tab. 4 Deflections of Columns

| 试件编号 | e_0 | 柱长/mm | 峰值挠度/mm | 峰值挠度 平均值/mm | 相对峰值 挠度/% | 破坏挠度/mm | 破坏挠度 平均值/mm | 相对破坏 挠度/% |
|--------|------------|-------|---------|----------------|--------------|---------|----------------|--------------|
| PY-1-B | 0.1 h_0 | 900 | 2.98 | 2.98 | 0.33 | 5.62 | 5.62 | 0.62 |
| PY-2-A | | 1 800 | 5.41 | | | | | |
| PY-2-B | | 1 800 | 5.08 | | | | | |
| PY-3-B | | 3 600 | 7.38 | 7.38 | 0.21 | 7.89 | 7.89 | 0.22 |
| PY-4-A | 0.25 h_0 | 900 | 4.40 | 3.99 | 0.44 | 6.10 | 5.75 | 0.64 |
| PY-4-B | | 900 | 3.57 | | | | | |
| PY-5-A | | 1 800 | 5.71 | 6.73 | 0.37 | 8.11 | 8.95 | 0.50 |
| PY-5-B | | 1 800 | 7.75 | | | | | |
| PY-6-A | | 3 600 | 9.75 | 8.38 | 0.23 | 11.88 | 11.28 | 0.31 |
| PY-6-B | | 3 600 | 7.01 | | | | | |

3 结语

(1)相同偏心距不同几何尺寸的钢筋混凝土柱的受压破坏形态、截面应变分布规律基本相似,尺寸

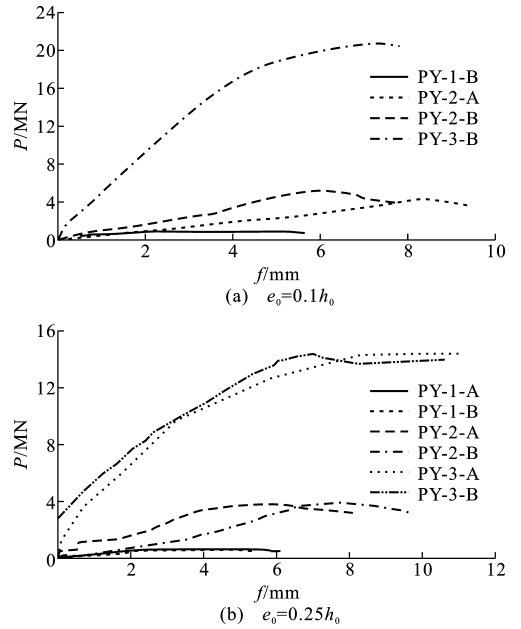


图8 各试件荷载-挠度曲线

Fig. 8 Load-displacement Curves of Specimens

着尺寸的增大而降低,即尺寸效应会对柱中变形产生影响,偏心距越小,趋势越明显,这和Bazant尺度律^[16]中关于延性随尺寸的增大而减小的规律相吻合。

2.8 弯矩-曲率分析

图9给出了2组偏心距下试件的弯矩-曲率($M-\varphi$)曲线。为了便于比较,将纵坐标做了量纲为1化处理。从图9可以看出,随着尺寸的增大,峰值曲率越小,试件的变形能力逐渐减弱,表现出了明显的尺寸效应。

效应不明显。

(2)试件的裂缝开展情况、极限承载力存在明显的尺寸效应。在相同偏心距下,相对开裂荷载随尺寸增大有增大的趋势,偏心距越小,趋势越明显;试

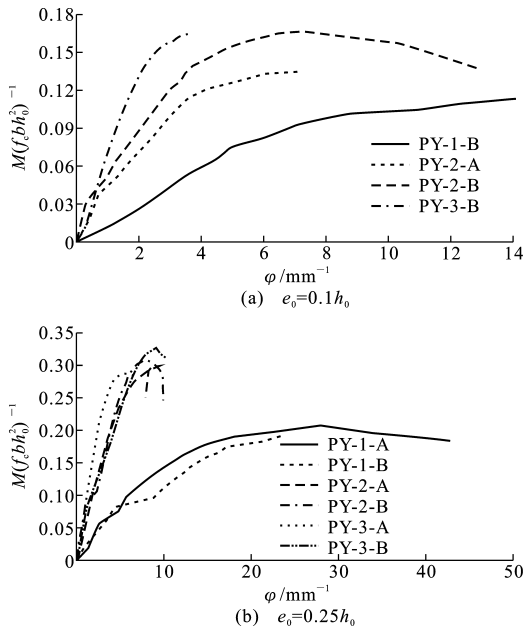


图 9 柱中弯矩-曲率曲线

Fig. 9 Bending Moment-curvature Curves of Columns

验所测得的极限承载力安全储备系数随尺寸的增大而减小,偏心距越大,安全储备系数越小。

(3)相同偏心距下,混凝土的峰值应变及极限应变均随着尺寸的增大而减小,呈现出明显的尺寸效应;在峰值应变后的下降段,大尺寸较小尺寸陡。

(4)相同偏心距下,尺寸效应会对柱中变形产生影响,相对变形及曲率随尺寸的增大而减小。

参考文献:

References:

- [1] BAZANT Z P, CHEN E P. Scaling of Structural Failure[J]. Applied Mechanics Reviews, 1997, 50(10): 593-627.
- [2] 钱觉时, 黄煜镔. 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 Jue-shi, HUANG Yu-bin. Review of Size Effect on Strength of Concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2003(3): 1-5.
- [3] LESSARD M, CHAALLAL O, AITCIN P C. Testing High-strength Concrete Compressive Strength[J]. ACI Materials Journal, 1993, 90(4): 303-308.
- [4] SENNER S, BARR B I G, ABUSIAF H F. Size-effect Tests in Unreinforced Concrete Columns[J]. Magazine of Concrete Research, 1999, 51(1): 3-11.
- [5] 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 Xiu-li, YUAN Jian, ZHOU Hong-yu, 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.

- [6] 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.
- [7] 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(增): 1-8.
DU Xiu-li, FU Jia, ZHANG Jian-wei. The Experimental Study on Size Effect of the Large-size Reinforced Concrete Column Under Axial Loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(S): 1-8.
- [8] 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(10): 83-87.
ZHOU Hong-yu, LI Zhen-bao, DU Xiu-li. Study on Size Effect of Normal Section Ultimate Bearing Capacity of RC Flexural Members[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(10): 83-87.
- [9] CANBAY E, OZCEBE G, ERSOY U. High-strength Concrete Columns Under Eccentric Load[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(7): 1052-1060.
- [10] 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.
- [11] BAZANT Z P, PLANAS J. Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials[M]. Boca Raton: CRC Press, 1998.
- [12] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
GUO Zhen-hai, SHI Xu-dong. Reinforced Concrete Theory and Analyses[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [13] 沈蒲生, 梁兴文. 混凝土结构设计原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
SHEN Pu-sheng, LIANG Xing-wen. Principles of Reinforced Concrete Structures[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [14] GB 50152—92, 混凝土结构试验方法标准[S].
GB 50152—92, Standard Methods for Testing of Concrete Structures[S].
- [15] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [16] BAZANT Z P. Size Effect on Structural Strength: A Review[J]. Archive of Applied Mechanics, 1999, 69: 203-225.