

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.05.006

# RC剪力墙在不同轴压比下抗震性能数值模拟分析

刘超, 蒋隆敏, 黄艳

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 利用 Ansys 有限元分析软件, 对不同轴压比下的 RC 剪力墙进行数值模拟分析, 采用荷载步文件进行低周反复荷载的模拟加载, 研究轴压比分别为 0.20, 0.25, 0.30 的 3 片剪力墙的抗震性能, 包括抗震承载力、延性、耗能能力、裂缝开展模式等的变化规律。研究表明, 模拟结果与轴压比为 0.25 的实体墙的试验结果相吻合。

**关键词:** RC 剪力墙; 轴压比; 抗震性能

中图分类号: TU973.1<sup>+</sup>6

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)05-0023-06

## Numerical Simulation Analysis on Seismic Performance of RC Shear Wall with Different Axial Compression Ratio

Liu Chao, Jiang Longmin, Huang Yan

(School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** By means of Ansys finite element analysis software, simulates the RC shear wall under different axial compression ratio, applies the load step document to simulate the low cycle repeated load, and studies the seismic performance of the 3 shear walls of 0.20, 0.25 and 0.30 axial compression ratio, including seismic bearing capacity, ductility, energy dissipation capacity, crack development patterns, etc.. The simulation results are in agreement with the experimental results of the solid wall with axial pressure ratio of 0.25.

**Keywords:** RC shear wall; axial compression ratio; seismic performance

## 0 引言

剪力墙结构因具有较好的抗震性能, 而被广泛地应用于高层建筑结构中。由文献[1-2]可以得知, 影响剪力墙抗震性能的因素有很多, 如构件截面形式、轴压比、剪跨比、边缘构件配筋率及其范围等, 而其中的轴压比是影响其抗震性能的重要因素。因此, 对不同轴压比下剪力墙抗震性能的研究具有重要意义。

国内外对 RC 剪力墙在不同轴压比下的抗震性

能的研究较多, 并取得了一系列的研究成果<sup>[3-5]</sup>, 但对其进行有限元数值模拟分析的研究成果很少见于文献。由于进行试验研究要耗费大量人力物力, 且耗时长, 而利用有限元软件进行数值模拟分析能避开这些弊端。此外, 模拟分析的结果还可作为剪力墙结构设计的参考依据。因此, 本文拟对轴压比分别为 0.20, 0.25, 0.30 的 3 片剪力墙的抗震性能进行数值模拟分析, 并与一片轴压比为 0.25 的实体墙的试验结果进行对比, 以验证有限元软件模拟分析 RC 剪切墙的有效性。

收稿日期: 2015-08-11

基金项目: 湖南省教育厅科学研究基金资助重点项目(10A024)

作者简介: 刘超(1991-), 男, 湖南衡南人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为新型材料及其在结构加固中的应用,

E-mail: liuchao0904@qq.com

# 1 试件及试验介绍

## 1.1 试件

墙体除了轴压比不同，其他参数均相同，墙体设计尺寸为1 400 mm × 700 mm × 100 mm，剪跨比为2.0。墙体上边设有顶梁和底梁，顶梁模拟楼板约束，尺寸为200 mm × 200 mm × 750 mm；底梁模拟刚性基础，并使墙体固定在反力槽上，尺寸为300 mm × 300 mm × 1 500 mm。混凝土强度等级为C20，实测混凝土强度标准值为10.96 MPa，强度设计值为7.2 MPa。钢筋采用HRB300，实测屈服强度为290 MPa，极限拉应力为387 MPa。试件配筋如图1所示。

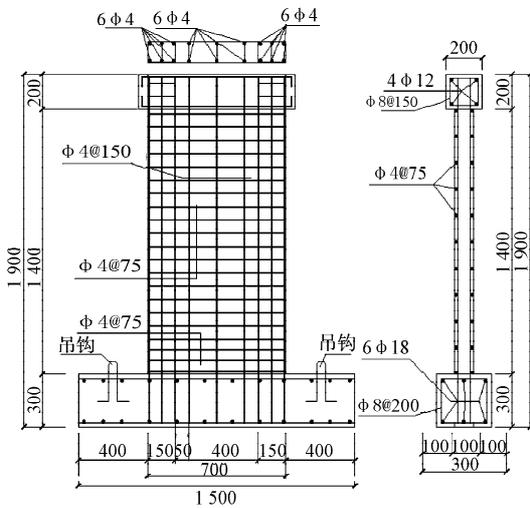


图1 构件配筋图

Fig. 1 Reinforcement diagram

## 1.2 试验

按照 JGJ 101 — 1996 《建筑抗震试验方法规程》<sup>[6]</sup> 规定，对轴压比为 0.25 的实体墙进行试验。对墙体分三级施加竖向荷载，每级增加 1/3，在整个试验过程中使竖向荷载保持恒定。试验加载制度如图 2 所示，水平低周反复荷载的加载程序采用混合控制的加载制度，先进行荷载控制，再进行位移控制。墙体试验装置见图 3。

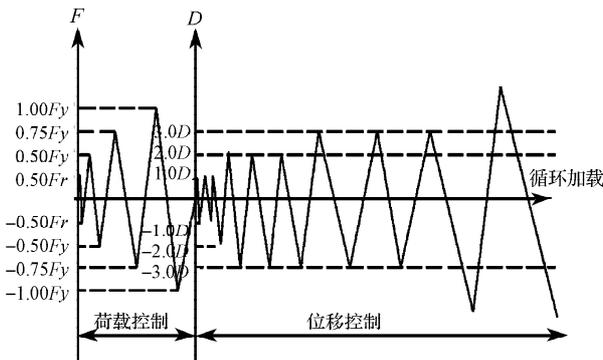


图2 试验加载制度图

Fig. 2 Method of loading

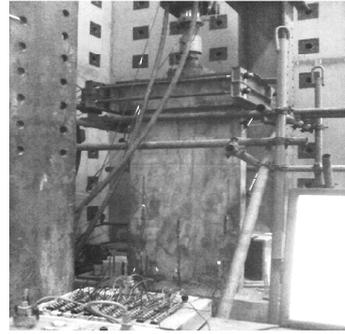


图3 试验装置图

Fig. 3 Test equipment

# 2 有限元建模分析

## 2.1 单元选取

通常用于混凝土单元的有 SOLID45, SOLID65 等，SOLID65 与 SOLID45 相似，但增加了开裂与压碎性能，最重要的是对材料非线性的处理可以模拟开裂（3 个正交方向）、压碎、塑性变形及徐变。本文混凝土采用 SOLID65 单元<sup>[7]</sup>，钢筋采用 LINK8 单元。

## 2.2 材料本构关系与破坏准则

SOLID65 单元在缺省情况下，采用的是线性本构关系，为了使其为非线性本构关系，要输入混凝土的本构关系，可以参考文献[8]或 Hongnestad 公式。

$$\text{当 } \varepsilon_c \leq \varepsilon_0 \text{ 时, } \sigma_c = f_c \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^n \right];$$

$$\text{当 } \varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \text{ 时, } \sigma_c = f_c \left[ 1 - 0.15 \left( \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_0}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_0} \right) \right].$$

式中： $f_c$  为混凝土轴心抗压强度设计值；

$\varepsilon_0$  为混凝土压应力为  $f_c$  时的应变，本文取  $\varepsilon_0 = 0.0020$ ；

$\varepsilon_{cu}$  为正截面的混凝土极限压应变，本文取  $\varepsilon_{cu} = 0.0033$ ；

$\sigma_c$  为混凝土压应变为  $\varepsilon_c$  时的压应力；

$n$  为系数，本文取  $n = 2$ 。

上述混凝土本构关系曲线可用一系列数据点拟合，以便输入，本文采用多线性等向强化模型即 MISO 模型；钢筋的应力应变关系采用理想弹塑性模型，本文采用双线性等向强化模型即 BISO 模型<sup>[9]</sup>。

SOLID65 单元通过主应力状态确定 4 个区域，在不同的区域采用不同的破坏准则。各破坏准则的参数通过命令 TB, CONCR 和命令 TBDATA 输入，其中张开裂缝的剪力传递系数对模拟分析结果的影响较大，根据文献[9]将其取为 0.125。

## 2.3 模型建立

利用 Ansys 分析钢筋混凝土结构，建立有限元模

型通常有2种方法：分离式、整体式。分离式模型相较于整体式模型可以考虑钢筋和混凝土之间的粘结和滑移，建模和计算复杂，不易于收敛，但其结果更符合实际<sup>[9]</sup>。本文采用分离式建模，模型如图4所示。

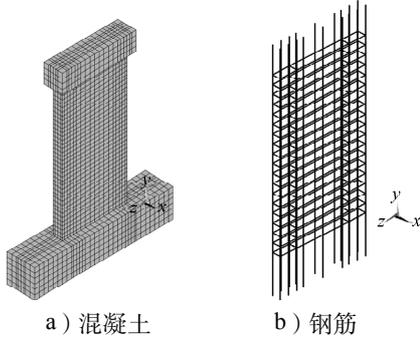


图4 剪力墙有限元模型

Fig. 4 Shear wall finite element model

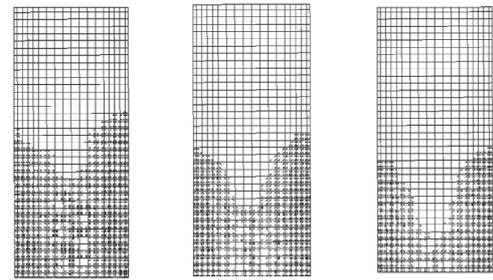
### 3 有限元结果分析

#### 3.1 裂缝开展及破坏形态

为了对比分析各试件在不同轴压比下的裂缝开展情况，将墙体顶点水平位移为4 mm时，各构件的裂缝开展情况进行对比，如图5所示。从图5可以看出，随着轴压比的增大，竖向荷载增大，导致墙肢的开裂在压弯共同作用下受到限制，试件破坏时的裂缝愈来愈集中于墙体的底部，试件由弯曲型破坏逐渐转变为剪切破坏。

构件在各轴压比下初次开裂裂缝集中在墙肢底

部受拉侧，构件的开裂荷载理论值根据文献[10]的公式计算。开裂荷载的理论值和模拟值如表1所示。



a) 轴压比0.20 b) 轴压比0.25 c) 轴压比0.30

图5 不同轴压比的构件裂缝图

Fig. 5 Fracture pattern of members with different axial compression ratios

表1 各轴压比下初裂荷载模拟值和理论值

Table 1 Simulation value and theoretical value of the initial cracking load of different axial compression ratios

试件编号	轴压比	开裂荷载 /kN	
		模拟值	理论值
SW-1	0.20	16.44	16.8
SW-2	0.25	19.36	19.6
SW-3	0.30	21.16	21.9

由表1可知，随着轴压比的增大，试件的开裂荷载也增大；轴压比分别为0.20, 0.25, 0.30时，开裂荷载模拟值与理论计算值分别相差0.36, 0.24, 0.74 kN。

#### 3.2 应力云图

各试件达到极限位移时的应力云图见图6。

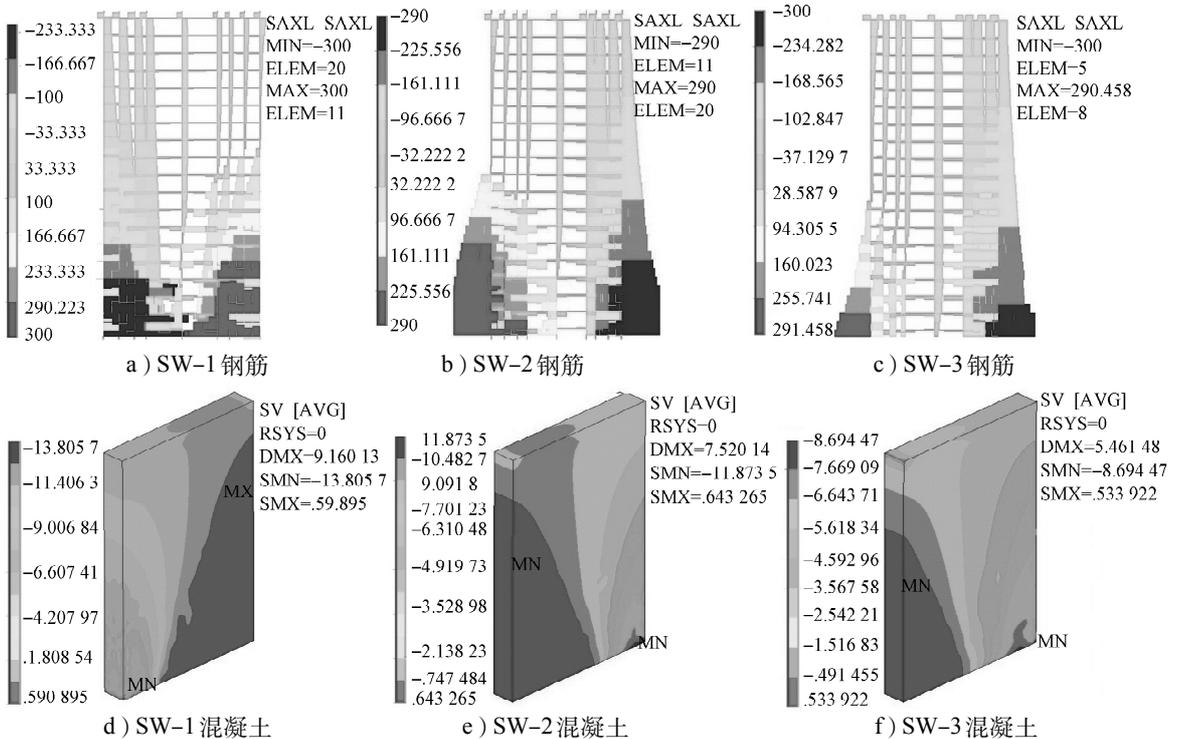


图6 不同轴压比下各构件的应力云图

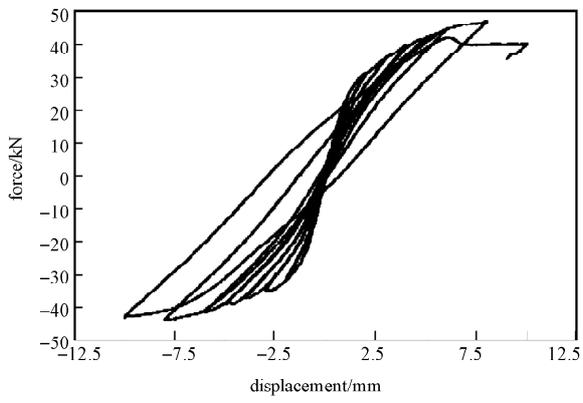
Fig. 6 Stress contours of each component under different axial compression ratio

从图6中钢筋的应力云图可以看出,随着轴压比的增大,钢筋达到屈服应力290 MPa的长度范围有所下降,这将导致钢筋的变形受到限制。从混凝土的应力云图可以看出,随着轴压比的增大,混凝土的受压区范围也增大。

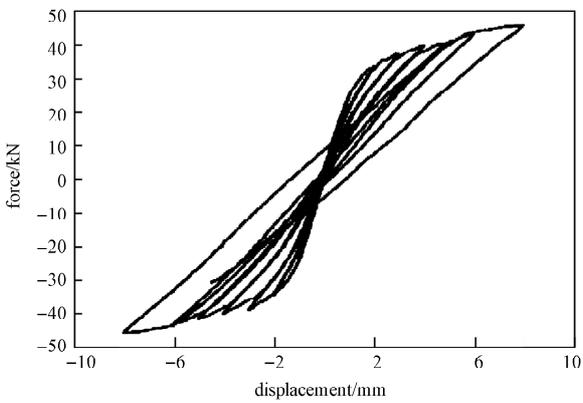
### 3.3 耗能能力

各试件的滞回曲线如图7所示。为了研究其耗能能力,由滞回曲线的面积计算出其耗能系数<sup>[6]</sup>,各试件耗能系数如表2所示。

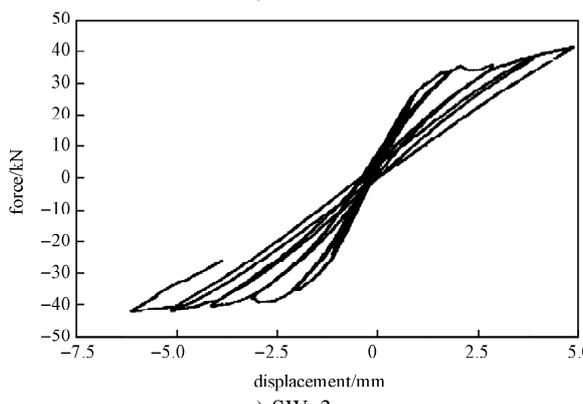
由图7可以看出,各试件的滞回曲线都呈S型,这反映了各试件在低周反复荷载作用下受滑移影响较大。



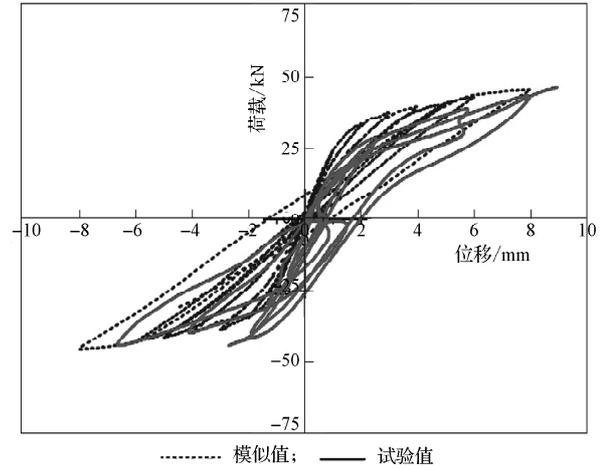
a) SW-1



b) SW-2



c) SW-3



d) SW-2 (模拟值与试验值)

图7 滞回曲线

Fig. 7 Hysteretic curve of component

表2 各试件耗能系数

Table 2 Coefficients of energy consumption of each test piece

试件编号	轴压比	耗能系数
SW-1	0.20	0.27
SW-2	0.25	0.29
SW-2 (试验)	0.25	0.26
SW-3	0.30	0.35

从表2可以得出,轴压比分别为0.20, 0.25, 0.30时,各试件耗能系数模拟值分别为0.27, 0.29, 0.35。随着轴压比的增大,较大的竖向轴力限制了混凝土自身的开裂,并增大了开裂面的摩擦,从而致使试件的耗能能力提高。试件SW-2的耗能系数试验值稍小于模拟值,两者相差0.03。

### 3.4 延性及水平抗震承载力

各试件的骨架曲线如图8所示,延性系数及水平极限承载力见表3。

由图8可以看出,各试件骨架曲线的斜率在加载初期较大,到加载后期则趋于平缓。

由表3可知,当轴压比为0.25时,试件延性系数的模拟值与试验值相差0.04,说明模拟值具有相当的可靠性。当轴压比分别为0.20, 0.25, 0.30时,延性系数分别为3.28, 3.11, 2.24,这表明,随着轴压比的增大,竖向荷载增大限制了墙体的开裂,同时增大了墙体的受压区相对高度,并抑制了塑性区的增长,使受拉侧钢筋屈服后其变形得不到发挥,从而导致墙体延性减小。从表3还可得出,轴压比分别为0.20, 0.25, 0.30时,各试件的水平极限承载力分别为44.79, 46.23, 42.09 kN,这说明,对于抗震承载力,轴压比并不是越大越好,在某一限值内,竖向荷载增大可以提高墙体的水平抗震承载力。

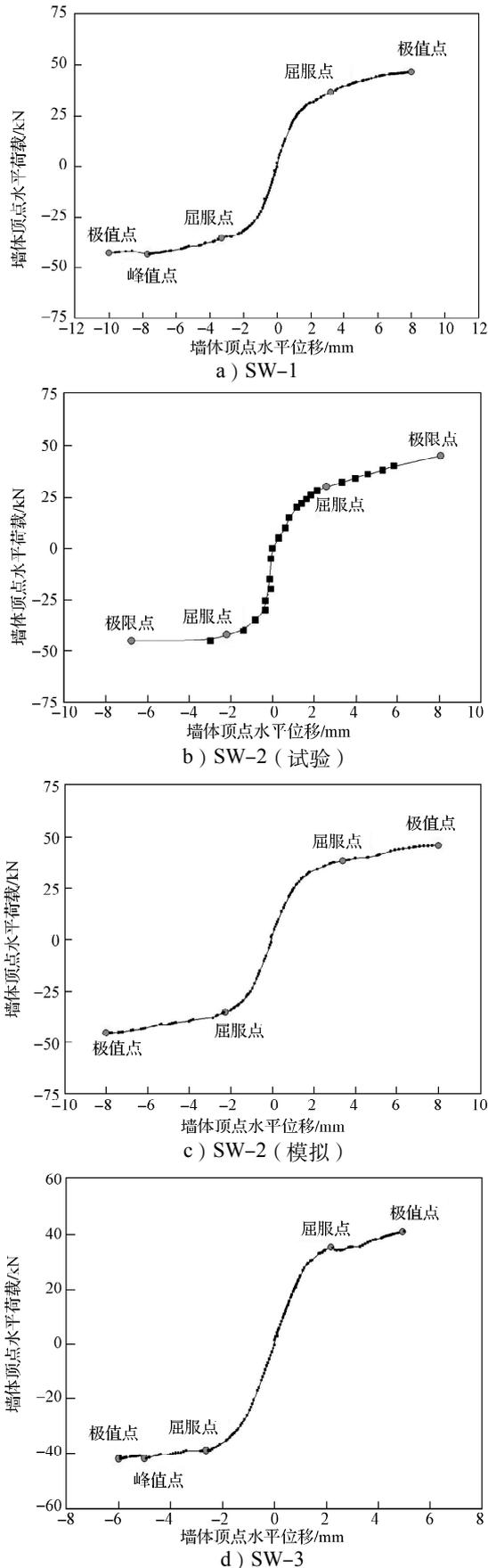


图8 各试件骨架曲线

Fig. 8 Each specimen skeleton curve

表3 不同轴压比下的参数值

Table 3 Parameter values under different axial compression ratio

轴压比	屈服承载力 / kN	屈服位移 $\Delta_y$ /mm	水平极限承载力 / kN
0.20 (模拟)	35.45	2.79	44.79
0.25 (模拟)	36.63	2.59	46.23
0.25 (试验)	35.97	2.45	45.00
0.30 (模拟)	36.89	2.44	42.09

轴压比	水平极限位移 $\Delta_u$ /mm	延性系数 / ( $\Delta_y/\Delta_u$ )
0.20 (模拟)	9.16	3.28
0.25 (模拟)	8.08	3.11
0.25 (试验)	7.52	3.07
0.30 (模拟)	5.46	2.24

### 4 结语

本文通过不同轴压比下的RC剪力墙的抗震性能的数值模拟分析,研究了剪力墙的裂缝开展、耗能性能、延性、抗震承载力等的变化规律,可得出如下结论:

- 1) 随着轴压比增大,开裂荷载提高,构件破坏时的裂缝逐渐集中于墙体底部。
- 2) 耗能能力随着轴压比的增大而增强。
- 3) 轴压比增大降低了剪力墙结构的延性。
- 4) 在一定范围内,随着轴压比的增大,其水平抗震承载力提高。

以上研究结论与有关试验研究及理论研究的结论相一致<sup>[3-5]</sup>,而且本文的数值模拟结果与试验结果吻合程度较高,说明了本文所建立的有限元分析方法和选取的有限元分析模型是可靠的。

### 参考文献:

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011—2010建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 66-68.  
 Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. GB 50011 — 2010 Code for Seismic Design of Buildings[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2011: 66-68.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 3—2010高层混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 77-86.  
 Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. JGJ 3—2010 Technical Specification for Concrete Structures of Tall Buildings[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2011: 77-86.

[3] 章红梅, 曾松. 不同轴压比下剪力墙抗震性能试验研

究[J]. 结构工程师, 2014, 30(5): 165-173.  
 Zhang Hongmei, Zeng Song. Experimental Study on the Seismic Performance of Shear Walls Under Varied Axial Compression Ratios[J]. Structural Engineers, 2014, 30(5): 165-173.

[4] 李宏男, 李兵. 钢筋混凝土剪力墙抗震恢复力模型试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(5): 35-42.  
 Li Hongnan, Li Bing. Experimental Study on Seismic Restoring Performance of Reinforced Concrete Shear Wall [J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(5): 35-42.

[5] Lefas L D, Kotsovos M K, Ambraseys N N. Behavior of Reinforced Concrete Structural Walls : Strength, Deformation Characteristics, and Failure Mechanism[J]. ACI Structural Journal, 1990, 87(1): 12-31.

[6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 101 — 1996 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997: 5-21.  
 Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. JGJ 101 — 1996 Code for Building Seismic Testing Methods[S]. Beijing: China Building Industry Press, 1997: 5-21.

[7] 王新敏, 李义强, 许宏伟. ANSYS结构分析单元与应用

[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 187-244.  
 Wang Xinmin, Li Yiqiang, Xu Hongwei. ANSYS Structure Analysis Unit and Application[M]. Beijing: China Communications Press, 2007: 187-244.

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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: 34-36.  
 Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. GB 50010 — 2010 Code for Design of Concrete Structures[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010: 34-36.

[9] 王新敏. ANSYS工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 479-487.  
 Wang Xinmin. ANSYS Engineering Structure Numerical Analysis[M]. Beijing: China Communications Press, 2007: 479-487.

[10] 中国建筑科学研究院建筑结构研究所. 高层建筑结构设计[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 352-389.  
 Institute of Architectural Structure of China Academy of Building Research. Structural Design of High-Rise Buildings [M]. Beijing: Science Press, 1982: 352-389.

(责任编辑: 邓光辉)



(上接第9页)

[5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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: 35.  
 Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. GB 50010 — 2010 Code for Concrete Structure Design[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 35.

[6] 李晓蕾, 李青宁. 钢筋混凝土短肢剪力墙恢复力模型研究[J]. 地震工程与工程震动, 2014, 34(5): 100-107.  
 Li Xiaolei, Li Qingning. Research on Restoring Force Model of RC Short-Pier Shear Wall[J]. Earthquake Engineering and

Engineering Dynamics, 2014, 34(5): 100-107.

[7] 张品乐, 李青宁, 李晓蕾. L形截面短肢剪力墙抗震性能模型试验研究[J]. 地震工程与工程震动, 2010, 30(4): 51-56.  
 Zhang Pinle, Li Qingning, Li Xiaolei. Experimental Research on Seismic Performance of Short Pier Shear Wall with L-Shaped Section[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(4): 51-56.

(责任编辑: 邓光辉)