

# 钢筋混凝土剪力墙变形性能指标试验研究

韩小雷<sup>1,2</sup>, 陈彬彬<sup>2</sup>, 崔济东<sup>2</sup>, 潘洲池<sup>2</sup>, 季静<sup>1,2</sup>, 孙典龙<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东广州 510640;

2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东广州 510640)

**摘要:**为研究矩形截面钢筋混凝土剪力墙变形指标,根据 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》设计了 20 个剪力墙试件进行低周往复荷载试验,研究不同剪跨比、试验轴压比、边缘构件纵筋配筋率对矩形截面剪力墙破坏形态、滞回性能、变形能力的影响。试验结果表明:随着剪跨比减小,剪力墙的破坏形态由弯曲破坏转向剪切破坏;随着试验轴压比增大,剪力墙的延性降低;随着边缘构件纵筋配筋率提高,弯曲破坏剪力墙延性提高,弯剪破坏与剪切破坏剪力墙延性降低。根据试验结果,建立了构件变形-构件损坏程度-构件承载能力的关系,提出了基于骨架曲线和破坏现象两种性能状态划分方法,得到剪力墙的变形性能指标,并将两种方法的结果进行对比,结果表明两者较为吻合,验证了基于骨架曲线划分性能状态方法的合理性与有效性。

**关键词:**钢筋混凝土剪力墙;低周往复荷载试验;基于性能设计方法;变形性能指标

**中图分类号:**TU375 TU317.1 **文献标志码:**A

## Experimental study on deformation performance indexes of RC shear walls

HAN Xiaolei<sup>1,2</sup>, CHEN Binbin<sup>2</sup>, CUI Jidong<sup>2</sup>, PAN Zhouchi<sup>2</sup>, JI Jing<sup>1,2</sup>, SUN Dianlong<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In order to investigate the deformation indexes of rectangular reinforced concrete shear walls, 20 shear walls were designed according to the GB 50011—2010 'Code for seismic design of buildings'. The specimens were tested under low frequency cyclic loading to study the influences of different shear span ratios, test axial compression ratios and longitudinal reinforcement ratios of boundary element on the failure pattern, hysteretic characteristic and deformation capacity of the shear walls. The test results show that as the shear span ratio decreases, the failure pattern is changed from flexural failure to shear failure; the ductility decreases when test axial compression ratio increases. With increase in the longitudinal reinforcement ratio of the boundary element, the shear wall with flexural failure has increased ductility, while that with flexural-shear failure or shear failure has decreased ductility. According to the experimental results, the relationship among deformation, extent of damage and bearing capacity of element was established. Subsequently, two methods based on skeleton curve and damage phenomena were introduced to quantify the performance indexes of RC shear walls, and a comparison between the two methods was made. The good agreement of the comparison results demonstrates the validity and efficiency of the proposed method based on skeleton curve.

**Keywords:** RC shear wall; low frequency cyclic loading test; performance-based design method; deformation performance indexes

基金项目:国家自然科学基金项目(51378221),广东省自然科学基金项目(2017A030313274,2017A030313306)。

作者简介:韩小雷(1964—),男,江苏扬州人,工学博士,教授。E-mail:xlhan@scut.edu.cn

收稿日期:2017年5月

# 0 引言

历次震害和试验研究<sup>[1]</sup>表明,结构的倒塌主要是由于结构的变形能力小于相应的变形需求,而结构的变形能力主要是由构件的变形能力决定。剪力墙是高层建筑结构关键的承载和抗侧力构件,建立与构件破坏程度相对应的变形指标限值是实现构件层次定量性能评估的基础。

欧洲国家及美国等在基于性能的抗震评估方法基础上,颁布了一系列性能规范<sup>[2,3]</sup>。我国在 JGJ 3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》<sup>[4]</sup>和 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》<sup>[5]</sup>中对性能设计方法提出了一些建议和要求,并给出了剪力墙结构的弹性层间位移角限值为 1/1 000,弹塑性层间位移角限值为 1/120,但性能评估仍以承载力验算为主,尚未给出剪力墙构件的变形指标限值。

国内外学者对此进行了相关研究,如 Carrillo 等<sup>[6]</sup>根据剪力墙试验提出了低矮剪力墙基本运行(immediate occupancy)、生命安全(life safety)及接近倒塌(collapse prevention)性能状态的层间位移角限值;Su 等<sup>[7]</sup>、Grammatikou 等<sup>[8]</sup>对比了 RC 剪力墙试验与规范性能指标限值;Kazaz 等<sup>[9]</sup>将 RC 剪力墙有限元分析结果与规范进行了对比;钱稼茹等<sup>[10]</sup>提出了钢筋混凝土剪力墙基于位移延性的变形能力设计方

法;梁兴文等<sup>[11-13]</sup>对高强混凝土剪力墙的变形指标进行了试验研究,并给出了 3 个性能水平的剪力墙位移角限值;张松等<sup>[14]</sup>、鲁懿虬等<sup>[15]</sup>、蒋欢军等<sup>[16]</sup>研究了不同参数对剪力墙变形性能的影响。上述研究主要集中于有限元模拟、经验公式或简化理论研究等,还没有得到适用于中国规范的构件变形指标限值。

为此,本文中通过 20 个基于中国规范设计的矩形截面 RC 剪力墙试件的低周往复荷载试验,分析其破坏形态、滞回曲线等,提出剪力墙构件的性能状态划分方法,建立性能状态与损伤程度的对应关系,得到剪力墙各性能状态对应的变形指标限值。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

根据 JGJ 3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》和 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》,按剪跨比  $\lambda$  不同( $\lambda$  分别为 2.71、2.12、1.65、1.20、0.80)设计了 5 组共 20 个矩形截面 RC 剪力墙试件,每组试件剪跨比相同。每组试件中试验轴压比  $n$  为 0.12、0.30,边缘构件纵筋配筋率  $\rho_s$  为 1.36%、3.07%。试件编号依次为 W1 ~ W20,基本参数见表 1。

在试件底部设有混凝土底座,其顶部设置混凝土加载梁,1 ~ 5 组试件加载梁与底座之间的墙体净高  $H$  分别为 2 200、1 700、1 300、920、580 mm,所有试

表 1 试件基本参数

Table 1 Parameters of specimens

组别	试件编号	$H / \text{mm}$	$\lambda$	$N / \text{kN}$	$n$	边缘构件配筋			墙体配筋		钢筋批次	混凝土批次
						纵筋	$\rho_s / \%$	箍筋	竖向分布筋	水平分布筋		
1	W1	2 200	2.71	295	0.12	6 $\Phi$ 8	1.36	$\Phi$ 8@80 + $\Phi$ 6@80	$\Phi$ 6@125	$\Phi$ 6@125	1	1
	W2	2 200	2.71	295	0.12	6 $\Phi$ 12	3.07	$\Phi$ 8@80 + $\Phi$ 6@80	$\Phi$ 6@125	$\Phi$ 6@125	1	1
	W3	2 200	2.71	736	0.30	6 $\Phi$ 8	1.36	$\Phi$ 8@80 + $\Phi$ 6@80	$\Phi$ 6@125	$\Phi$ 6@125	1	1
	W4	2 200	2.71	736	0.30	6 $\Phi$ 12	3.07	$\Phi$ 8@80 + $\Phi$ 6@80	$\Phi$ 6@125	$\Phi$ 6@125	1	1
2	W5	1 700	2.12	295	0.12	6 $\Phi$ 8	1.36	$\Phi$ 8@80 + $\Phi$ 6@80	$\Phi$ 6@125	$\Phi$ 6@125	1	1
	W6	1 700	2.12	295	0.12	6 $\Phi$ 12	3.07	$\Phi$ 8@80 + $\Phi$ 6@80	$\Phi$ 6@125	$\Phi$ 6@125	1	1
	W7	1 700	2.12	736	0.30	6 $\Phi$ 8	1.36	$\Phi$ 8@80 + $\Phi$ 6@80	$\Phi$ 6@125	$\Phi$ 6@125	1	1
	W8	1 700	2.12	736	0.30	6 $\Phi$ 12	3.07	$\Phi$ 8@80 + $\Phi$ 6@80	$\Phi$ 6@125	$\Phi$ 6@125	2	2
3	W9	1 300	1.65	295	0.12	6 $\Phi$ 8	1.36	$\Phi$ 8@80 + $\Phi$ 6@80	$\Phi$ 6@125	$\Phi$ 6@125	1	1
	W10	1 300	1.65	295	0.12	6 $\Phi$ 12	3.07	$\Phi$ 8@80 + $\Phi$ 6@80	$\Phi$ 6@125	$\Phi$ 6@125	1	1
	W11	1 300	1.65	736	0.30	6 $\Phi$ 8	1.36	$\Phi$ 8@80 + $\Phi$ 6@80	$\Phi$ 6@125	$\Phi$ 6@125	2	2
	W12	1 300	1.65	736	0.30	6 $\Phi$ 12	3.07	$\Phi$ 8@80 + $\Phi$ 6@80	$\Phi$ 6@125	$\Phi$ 6@125	1	1
4	W13	920	1.20	276	0.12	6 $\Phi$ 8	1.36	$\Phi$ 8@80 + $\Phi$ 6@80	$\Phi$ 6@125	$\Phi$ 6@125	3	3
	W14	920	1.20	276	0.12	6 $\Phi$ 12	3.07	$\Phi$ 8@80 + $\Phi$ 6@80	$\Phi$ 6@125	$\Phi$ 6@125	3	3
	W15	920	1.20	690	0.30	6 $\Phi$ 8	1.36	$\Phi$ 8@80 + $\Phi$ 6@80	$\Phi$ 6@125	$\Phi$ 6@125	3	4
	W16	920	1.20	690	0.30	6 $\Phi$ 12	3.07	$\Phi$ 8@80 + $\Phi$ 6@80	$\Phi$ 6@125	$\Phi$ 6@125	3	4
5	W17	580	0.80	270	0.12	6 $\Phi$ 8	1.36	$\Phi$ 8@80 + $\Phi$ 6@80	$\Phi$ 6@125	$\Phi$ 6@125	3	3
	W18	580	0.80	270	0.12	6 $\Phi$ 12	3.07	$\Phi$ 8@80 + $\Phi$ 6@80	$\Phi$ 6@125	$\Phi$ 6@125	3	3
	W19	580	0.80	675	0.30	6 $\Phi$ 8	1.36	$\Phi$ 8@80 + $\Phi$ 6@80	$\Phi$ 6@125	$\Phi$ 6@125	3	3
	W20	580	0.80	675	0.30	6 $\Phi$ 12	3.07	$\Phi$ 8@80 + $\Phi$ 6@80	$\Phi$ 6@125	$\Phi$ 6@125	3	3

注: $H$ 为加载梁与底座之间的墙体净高; $\lambda$ 为剪跨比; $N$ 为轴向荷载; $n$ 为试验轴压比, $n = N / (f_{ck}A)$ ,其中 $f_{ck}$ 为混凝土轴心抗压强度标准值, $A$ 为截面面积; $\rho_s$ 为边缘构件纵筋配筋率。

件除墙体净高  $H$  外,其余几何尺寸均一致,如图 1a、1b 所示。试件截面尺寸均为  $850 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$ ,除边缘构件纵筋配置不同外,截面配筋均一致,如图 1c、1d 所示。

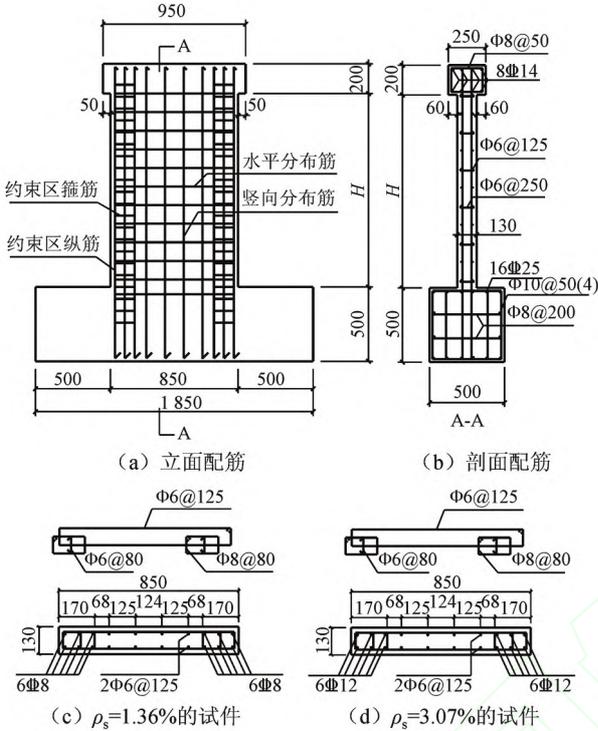


图 1 试件几何尺寸和配筋

Fig. 1 Geometry and reinforcement details of specimens

试件混凝土分 4 批浇筑,见表 1。混凝土设计强度等级为 C35,每批混凝土的抗压强度由 3 个与试件同条件养护的边长为  $150 \text{ mm}$  立方体试块实测得到,根据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》<sup>[17]</sup> 换算得到各批次混凝土材料特性,见表 2。试件边缘构件纵筋采用 HRB400 级钢筋,直径分别为  $8, 12 \text{ mm}$ ;其余钢筋采用 HPB300 级钢筋,直径分别为  $6, 8 \text{ mm}$ 。各批钢筋的实测受拉屈服强度和抗拉强度见表 3。由表 2、3 可知,各批次浇筑的试件,其混凝土与钢筋材料性能相近,离散性小。

表 2 混凝土材料力学性能

Table 2 Mechanical properties of concrete

批次	$f_{cu,k} / \text{MPa}$	$f_{ck} / \text{MPa}$	$E_c / \text{MPa}$
1	33.49	22.39	$3.09 \times 10^4$
2	30.07	20.11	$2.98 \times 10^4$
3	30.00	20.06	$2.98 \times 10^4$
4	31.00	20.73	$3.01 \times 10^4$

注: $f_{cu,k}$  为立方体抗压强度标准值; $f_{ck}$  为轴心抗压强度标准值; $E_c$  为混凝土弹性模量。

## 1.2 加载装置和加载制度

试件加载装置如图 2 所示。轴向压力通过  $5000 \text{ kN}$  的液压千斤顶施加,试件顶端的水平荷载通过  $1500 \text{ kN}$  的 MTS 作动器施加。

表 3 钢筋实测力学性能

Table 3 Mechanical properties of reinforcement bars

钢筋牌号	批次	$d / \text{mm}$	$f_y / \text{MPa}$	$f_u / \text{MPa}$
HPB300	1	6	425	653
HPB300		8	366	547
HRB400		8	498	703
HRB400		12	493	613
HPB300	2	6	467	660
HPB300		8	365	573
HRB400		8	426	652
HRB400		12	456	616
HPB300	3	6	400	645
HPB300		8	338	518
HRB400		8	411	650
HRB400		12	457	596

注: $f_y$  为屈服强度; $f_u$  为抗拉强度。

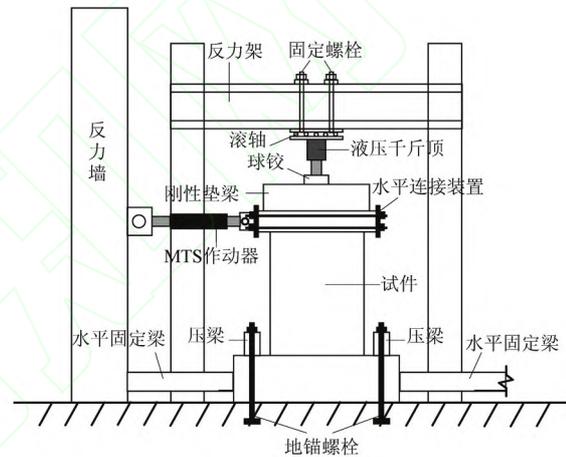


图 2 试验加载装置

Fig. 2 Test setup

先施加轴向压力至预定轴力,并在试验过程中保持不变;然后施加循环水平力。对于水平向加载,试件屈服前,采用荷载控制分级加载,每级荷载增量为  $20 \sim 40 \text{ kN}$ ,每级循环 1 次;试件屈服(最外侧纵筋屈服或荷载-位移曲线显著偏离直线)后,采用位移控制逐级加载,每级位移为屈服位移的倍数,每级加载循环 3 次,直至试件无法稳定承受竖向轴力、试件破坏严重或承载力下降超过  $50\%$  时停止加载。

## 1.3 测量内容

试验中测量了试件的水平荷载、位移和钢筋应变。水平荷载通过 MTS 作动器系统测量采集。位移计布置如图 3a 所示,其中 Q 表示千分表,L 表示拉线式位移计,名义塑性铰区高度为试件截面高度的一半,即  $425 \text{ mm}$ 。其中测点 L3 用于测量试件顶部加载点水平位移;测点 L1、L2 用于测量塑性铰区剪切变形。塑性铰区布置了 4 个千分表,用于测量塑性铰区水平位移和转角,底座布置了 3 个千分表,用于测量底座水平滑移和转动。试件钢筋应变测点布置如图

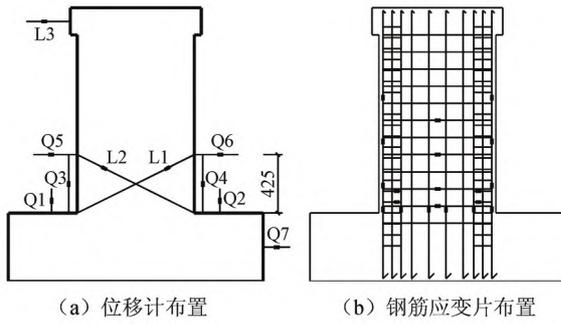


图3 测点布置

Fig.3 Arrangement of measuring points

3b所示,用于测量钢筋的应变。同时,在试验过程中观察了裂缝的发展情况与试件的破坏现象。

## 2 试验结果及其分析

### 2.1 试验现象和破坏形态

试验过程中发现,20个试件的最终破坏形态可分为弯曲破坏、弯剪破坏和剪切破坏3种,其中10个

试件发生弯曲破坏(试件W1~W9,W11),4个发生弯剪破坏(试件W10、W12、W13、W15),6个发生剪切破坏(试件W14、W16~W20)。随着剪跨比逐渐减小(从第1组至第5组),试件破坏形态依次从弯曲、弯剪向剪切破坏过渡。典型试件破坏形态如图4所示。

试件W2为弯曲破坏,如图4a所示,最终破坏时,边缘构件纵筋压曲或拉断,混凝土压碎,试件丧失承载力。试件W10为弯剪破坏,如图4b所示,最终破坏时与弯曲破坏相似,但墙身有较长斜裂缝发展。试件W14、W18均为剪切破坏,该类破坏又分为延性剪切破坏和脆性剪切破坏,分别如图4c、4d所示,两者破坏过程相似,最终破坏时,试件主对角斜裂缝处混凝土拉裂剥落,将试件分为多个斜柱体。二者区别在于,前者破坏过程较平缓,具有一定延性;后者荷载到达峰值后迅速下降,呈脆性破坏。

### 2.2 滞回曲线

各试件的水平荷载 $P$ -顶部位移 $\Delta$ 的滞回曲线如图5所示。由图可知,随着剪跨比逐渐减小,破坏形态由弯曲、弯剪向剪切破坏过渡时,试件滞回曲线逐

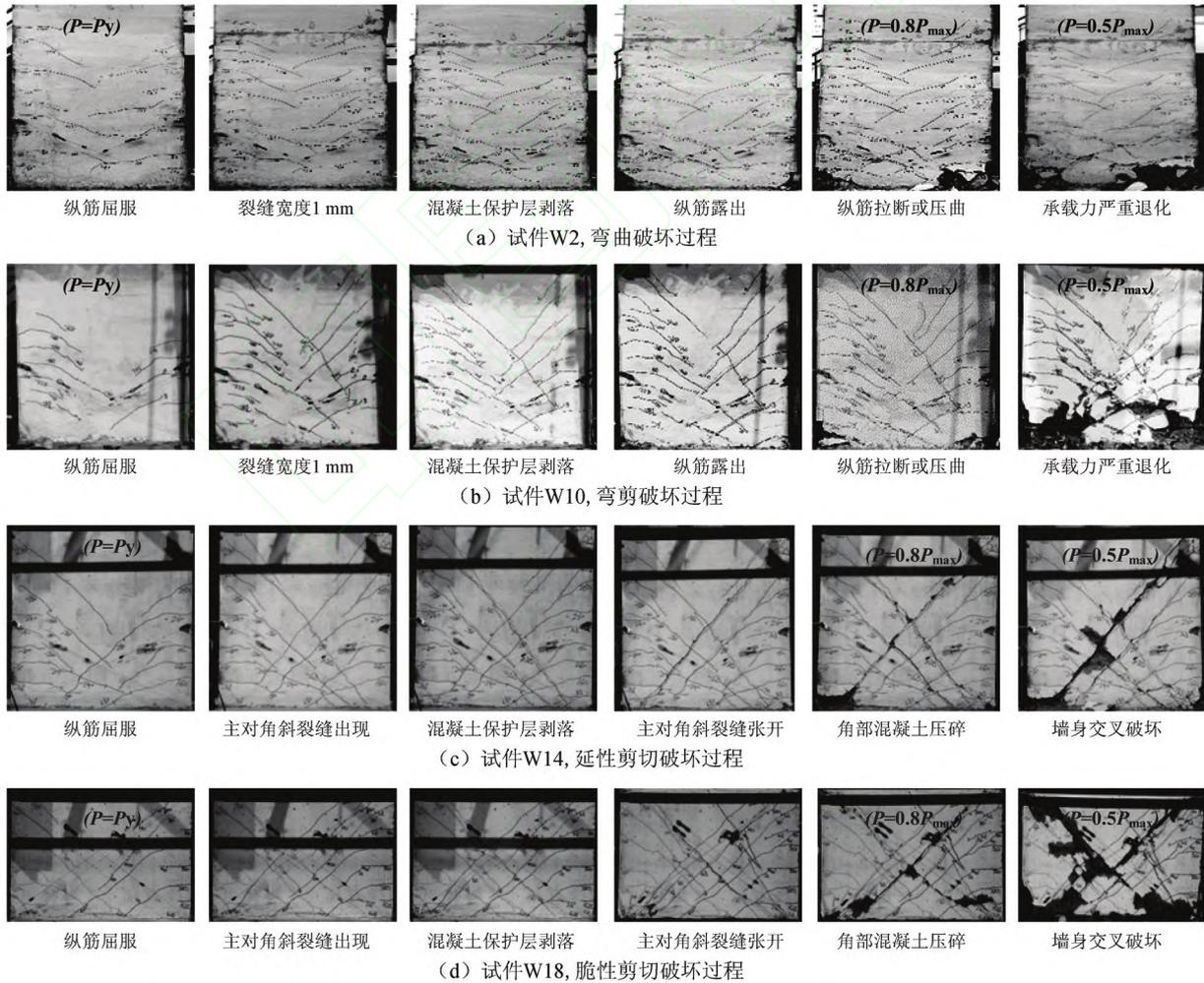


图4 试件破坏形态

Fig.4 Failure patterns of specimens

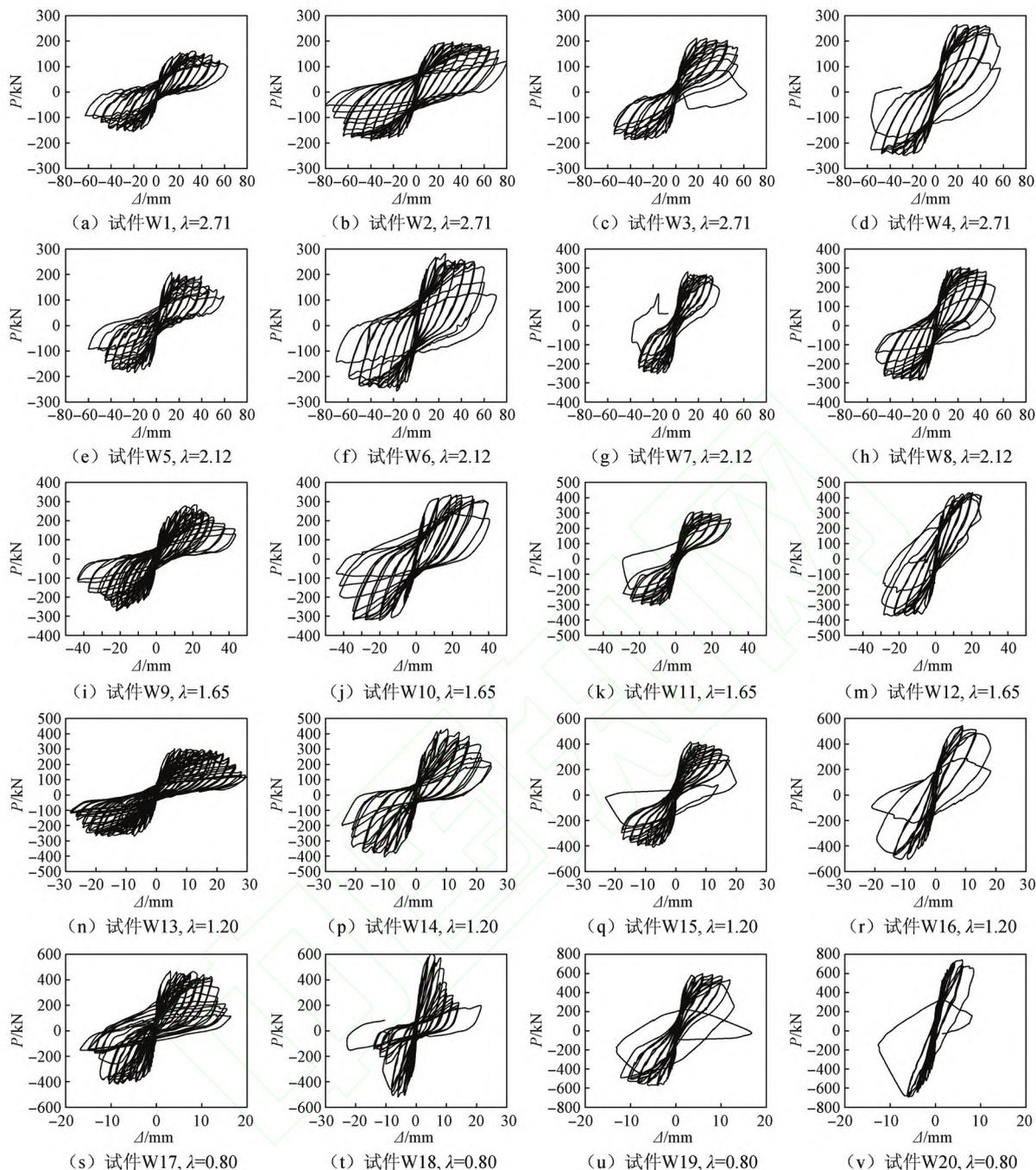


图5 试件水平荷载  $P$ -顶部位移  $\Delta$  滞回曲线

Fig. 5 Load-displacement hysteretic loops of specimens

渐由“弓”形向反“S”形转变,捏缩效应逐渐增大,耗能能力和变形能力逐渐降低。

### 2.3 骨架曲线

5组不同剪跨比的试件水平荷载  $P$ -顶部位移  $\Delta$  的骨架曲线如图6所示。由图6可知:

1) 试件剪跨比逐渐变小,骨架曲线平台段变短,下降段变陡,试件延性变差。

2) 在剪跨比相同的同组试件中,当边缘构件纵筋配筋率相同时,试验轴压比由0.12增大至0.30,试件承载力提高10%~45%,骨架曲线下降段变陡,

延性变差。而当试验轴压比相同时,边缘构件纵筋配筋率由1.36%增大至3.07%,试件承载力提高11%~47%,弯曲破坏试件骨架曲线下降段变缓,延性提高,而弯剪破坏及剪切破坏试件的骨架曲线下降段变陡,延性降低。

### 2.4 位移延性

采用位移延性系数  $\mu$  衡量试件的变形能力,  $\mu = \Delta_u / \Delta_y$ , 其中  $\Delta_u$  为极限位移,为承载力下降20%时对应的位移,  $\Delta_y$  为等效屈服位移,按Park<sup>[18]</sup>提出的等效屈服方法确定,结果见表4及图7。

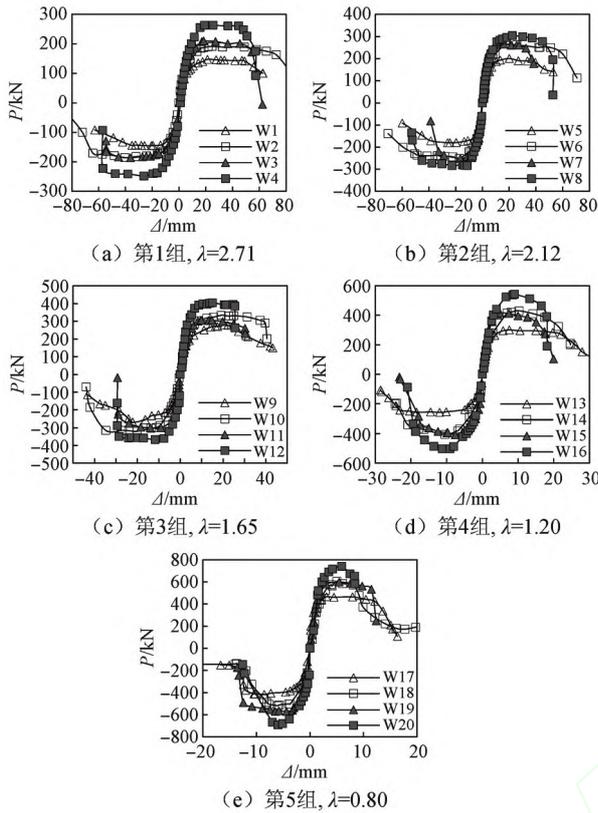


图6 试件的骨架曲线

Fig. 6 Skeleton curves of specimens

表4 试验主要结果

Table 4 Experimental results of specimens

试件编号	屈服位移角	极限位移角	位移延性系数 $\mu$	破坏形态
W1	1/278	1/43	6.39	F
W2	1/217	1/33	6.67	F
W3	1/256	1/42	6.10	F
W4	1/213	1/42	5.06	F
W5	1/286	1/40	7.17	F
W6	1/208	1/30	6.92	F
W7	1/385	1/52	7.38	F
W8	1/227	1/38	6.05	F
W9	1/200	1/50	4.02	F
W10	1/192	1/36	5.37	FS
W11	1/313	1/48	6.47	F
W12	1/294	1/51	5.76	FS
W13	1/303	1/43	7.06	FS
W14	1/204	1/50	4.08	DS
W15	1/417	1/60	6.96	FS
W16	1/244	1/57	4.27	DS
W17	1/476	1/54	8.81	DS
W18	1/278	1/77	3.61	BS
W19	1/385	1/59	6.50	DS
W20	1/323	1/84	3.84	BS

注:F代表弯曲破坏,FS代表弯剪破坏,DS代表延性剪切破坏,BS代表脆性剪切破坏。

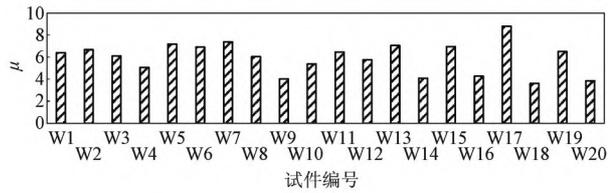


图7 试件的位移延性系数

Fig. 7 Ductility factors of specimens

由表4及图7可知,对于弯曲破坏,除个别试件外,试验轴压比由0.12增大至0.30时,试件位移延性系数降低4%~24%;对于弯剪或剪切破坏,边缘构件纵筋配筋率由1.36%增大至3.07%时,试件位移延性系数降低39%~59%。

### 3 RC剪力墙的性能状态划分方法及变形性能指标

#### 3.1 性能状态划分方法

JGJ 3—2010<sup>[4]</sup>中给出了构件损伤的5种状态,即无损坏、轻微损坏、轻度损坏、中度损坏、比较严重损坏。其中“无损坏”及“比较严重损坏”状态具有较为明确物理意义。“无损坏”状态可认为构件基本保持弹性状态,极限为构件屈服;“比较严重损坏”状态,极限为承载力退化20%。

为便于结构的抗倒塌评估,在上述的损伤状态后增加“严重损坏”和“倒塌”两个状态,其中,“严重损坏”状态的极限是构件丧失竖向承载能力或侧向承载能力下降50%;“倒塌”状态为构件无法继续稳定地承受荷载。具体性能状态划分情况如图8所示。

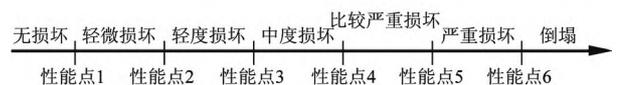


图8 RC剪力墙构件性能状态划分示意

Fig. 8 Performance states division of RC shear wall members

为量化性能状态,以变形性能指标作为性能状态的划分标准。前6个性能状态的极限对应6个性能点,性能点的变形取值即为该性能状态的变形性能指标限值。常见的衡量构件变形的指标有塑性区转角、弦转角、位移角等,塑性区转角、弦转角能较好地评价剪跨比较大、受弯为主的剪力墙,但不适用于剪跨比较小、受剪为主的构件。为此,选取构件的位移角作为变形性能指标。

采用以下两种方法确定剪力墙变形指标限值和对应的损坏程度。

1) 基于骨架曲线的划分方法。如图9所示,以3个关键性能点为基础,基于构件的荷载-位移角骨

架曲线得到 6 个性能状态位移角限值,作为变形指标限值。图 9 中实线为往复荷载作用下剪力墙荷载-位移角滞回曲线的骨架包络,横坐标为剪力墙的顶点位移角,纵坐标为侧向承载力。性能点 1 的位移角限值定义为名义屈服位移角  $\theta_1$ ,具体取值方法可参见文献[18];性能点 5 的位移角限值取为承载力下降 20% 时对应的位移角  $\theta_5$ ,此时剪力墙侧向承载力发生退化,但仍能稳定承受竖向荷载;性能点 6 的位移角限值定义为剪力墙不能稳定承受竖向荷载和侧向承载能力下降 50% 两者对应的位移角中的较小值  $\theta_6$ 。性能点 2、性能点 3、性能点 4 对应的位移角限值  $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_4$  为  $\theta_1$ 、 $\theta_5$  之间的四等分点。

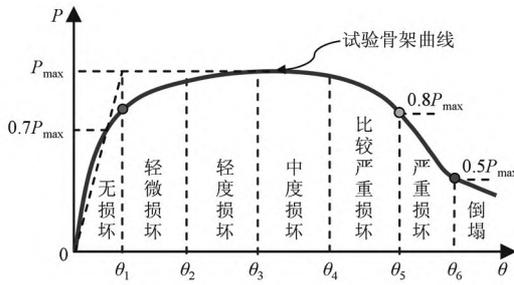


图 9 荷载-位移角曲线及性能点  
Fig. 9 Load-displacement angle skeleton curve and performance point

按此性能状态划分方法,剪力墙的性能点 1 位移角限值(等效屈服位移角)在  $1/476 \sim 1/192$  之间,远大于 GB 50011—2010<sup>[5]</sup>中给出的剪力墙结构弹性位移角限值  $1/1000$ ;性能点 5 位移角限值(极限位移角)在  $1/84 \sim 1/30$  之间,与 GB 50011—2010<sup>[5]</sup>给出的弹塑性位移角限值  $1/120$  相比,具有较大的变形富余。

2) 基于破坏现象的划分方法。试验中主要特征破坏现象依次为开裂,钢筋屈服,裂缝宽度达到 1 mm,主斜裂缝出现,裂缝宽度达到 2 mm,混凝土保

护层开始剥落,混凝土保护层剥落严重,对角斜裂缝突然张大,对角斜裂缝角部混凝土掉落严重,纵筋外露,腹板混凝土大块鼓起掉落,纵筋压屈,纵筋拉断。根据图 4 中典型试件的破坏过程,将上述特征破坏现象归纳对应于 6 个性能状态,建立性能状态与损伤程度的对应关系,见表 5。

### 3.2 变形性能指标的对比

为评估表 5 中给出的对应关系的合理性,将特征破坏点的位移角  $\theta_{Test}$  与基于骨架曲线划分方法得到的变形指标限值  $\theta_{Define}$  进行对比,结果见表 6。由表 6 可知,两者的相对偏差平均值在 2.29% ~ 18.87% 之间,标准差在 0.03 ~ 0.19 之间。可见,基于骨架曲线划分的性能状态与剪力墙的损伤程度相对应,可以通过弹塑性变形大小反映构件损伤程度。

## 4 结论

1) 矩形截面剪力墙的破坏形态分为弯曲破坏、弯剪破坏和剪切破坏,而剪切破坏又包括延性剪切破坏及脆性剪切破坏。剪跨比是影响剪力墙破坏形态的关键因素,随着剪跨比减小,破坏形态由弯曲、弯剪向剪切破坏过渡。

2) 剪力墙的变形能力与剪跨比呈正相关,与试验轴压比呈负相关;对于边缘构件纵筋配筋率,弯曲破坏试件呈正相关,弯剪及剪切破坏试件呈负相关。

3) 提出了基于骨架曲线的性能状态划分方法,把剪力墙构件划分为 7 个性能状态,并给出对应的变形性能指标限值,变形指标限值与 GB 50011—2010<sup>[5]</sup>相应的位移角限值相比有较大的富余。

4) 基于骨架曲线的性能状态划分方法与剪力墙破坏现象相对应,可建立构件变形指标限值与构件损伤程度的对应关系。

表 5 各性能状态与损伤程度的对应关系

Table 5 Relationship between performance states and damage descriptions

性能状态	构件损伤情况	位移角限值
无损坏	构件处于基本弹性,受拉纵筋未屈服,产生细微裂缝,裂缝宽度不大于 0.5 mm。	$\theta_1$
轻微损坏	混凝土保护层边缘未压碎,受拉纵筋屈服,裂缝宽度小于 1 mm。对于剪切变形起控制作用的构件,开始出现交叉对角裂缝。	$\theta_2 = \theta_1 + 0.25(\theta_5 - \theta_1)$
轻度损坏	混凝土保护层未剥落,核心区混凝土完好,裂缝宽度 1 ~ 2 mm。对于剪切变形起控制作用的构件,沿对角斜裂缝出现。	$\theta_3 = \theta_1 + 0.50(\theta_5 - \theta_1)$
中度损坏	对于弯曲变形起控制作用的构件,角部混凝土剥落,但未发生纵筋压屈或断裂现象,核心区混凝土未压碎,裂缝宽度大于 2 mm;对于剪切变形起控制作用的构件,对角斜裂缝张开较严重,斜裂缝上的混凝土轻微受损。	$\theta_4 = \theta_1 + 0.75(\theta_5 - \theta_1)$
比较严重损坏	承载力退化不超过 20%。对于弯曲变形起控制作用的构件,纵筋压屈或断裂,核心区混凝土压碎。对于剪切变形起控制作用的构件,对角斜裂缝发生突然性张大,宽度可达 5 ~ 8 mm。	$\theta_5$
严重损坏	承载力退化不超过 50%,侧向力严重退化但不倒塌,仍能承重。对于剪切变形起控制作用的构件,墙身可呈交叉破坏状或被斜裂缝分成多个小斜柱。	$\theta_6$

表 6 定义的变形指标限值与试验破坏现象的变形值比较

Table 6 Comparison between defined deformation index limits and deformation values of test damage phenomena

试件编号	参数	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$
W1	$\theta_{D_{fine}}$	1/278	1/119	1/75	1/55	1/43	1/37
	$\theta_{Test}$	1/333	1/110	1/66	1/55	1/47	1/37
W2	$\theta_{D_{fine}}$	1/217	1/89	1/56	1/41	1/33	1/29
	$\theta_{Test}$	1/278	1/93	1/57	1/40	1/32	1/28
W3	$\theta_{D_{fine}}$	1/256	1/114	1/72	1/53	1/42	1/39
	$\theta_{Test}$	1/263	1/84	1/64	1/51	1/42	1/39
W4	$\theta_{D_{fine}}$	1/213	1/105	1/70	1/53	1/42	1/40
	$\theta_{Test}$	1/244	1/81	1/60	1/48	1/41	1/40
W5	$\theta_{D_{fine}}$	1/286	1/112	1/70	1/51	1/40	1/30
	$\theta_{Test}$	1/256	1/135	1/68	1/46	1/39	1/30
W6	$\theta_{D_{fine}}$	1/208	1/84	1/53	1/38	1/30	1/26
	$\theta_{Test}$	1/189	1/106	1/53	1/36	1/30	1/25
W7	$\theta_{D_{fine}}$	1/385	1/149	1/92	1/66	1/52	1/47
	$\theta_{Test}$	1/333	1/164	1/83	1/55	1/47	1/47
W8	$\theta_{D_{fine}}$	1/227	1/100	1/65	1/47	1/38	1/34
	$\theta_{Test}$	1/238	1/80	1/60	1/48	1/40	1/34
W9	$\theta_{D_{fine}}$	1/200	1/114	1/80	1/61	1/50	1/32
	$\theta_{Test}$	1/303	1/130	1/86	1/61	1/49	1/32
W10	$\theta_{D_{fine}}$	1/192	1/92	1/61	1/45	1/36	1/33
	$\theta_{Test}$	1/250	1/112	1/70	1/53	1/42	1/33
W11	$\theta_{D_{fine}}$	1/313	1/132	1/84	1/61	1/48	1/47
	$\theta_{Test}$	1/303	1/147	1/74	1/57	1/47	1/47
W12	$\theta_{D_{fine}}$	1/294	1/135	1/87	1/65	1/51	1/51
	$\theta_{Test}$	1/286	1/128	1/86	1/64	1/52	1/50
W13	$\theta_{D_{fine}}$	1/303	1/120	1/76	1/55	1/43	1/37
	$\theta_{Test}$	1/526	1/104	1/74	1/52	1/47	1/37
W14	$\theta_{D_{fine}}$	1/204	1/116	1/81	1/62	1/50	1/43
	$\theta_{Test}$	1/294	1/149	1/74	1/59	1/50	1/42
W15	$\theta_{D_{fine}}$	1/417	1/169	1/105	1/76	1/60	1/53
	$\theta_{Test}$	1/400	1/133	1/101	1/80	1/57	1/50
W16	$\theta_{D_{fine}}$	1/244	1/133	1/93	1/71	1/57	1/53
	$\theta_{Test}$	1/222	1/112	1/92	1/75	1/56	1/49
W17	$\theta_{D_{fine}}$	1/476	1/161	1/97	1/70	1/54	1/50
	$\theta_{Test}$	1/500	1/154	1/92	1/66	1/57	1/48
W18	$\theta_{D_{fine}}$	1/278	1/167	1/120	1/94	1/77	1/62
	$\theta_{Test}$	1/294	1/179	1/118	1/89	1/71	1/62
W19	$\theta_{D_{fine}}$	1/385	1/164	1/103	1/75	1/59	1/56
	$\theta_{Test}$	1/345	1/179	1/90	1/72	1/60	1/56
W20	$\theta_{D_{fine}}$	1/323	1/189	1/133	1/103	1/84	1/66
	$\theta_{Test}$	1/208	1/179	1/118	1/118	1/88	1/57
	最大值/%	73.68	28.36	15.50	17.66	17.18	13.14
$\left  \frac{\theta_{D_{fine}} - \theta_{Test}}{\theta_{Test}} \right $	最小值/%	2.57	4.16	0.70	0.45	0.00	0.00
	平均值/%	18.87	14.78	7.17	6.38	4.48	2.29
	标准差	0.19	0.08	0.05	0.05	0.04	0.03

参 考 文 献

[1] PRIESTLEY M J N, KOWALSKY M J. Direct displacement based seismic design of concrete buildings [J]. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2000, 33(4): 421-444.

[2] American Society of Civil Engineers. Seismic evaluation and retrofit of existing buildings; ASCE/SEI 41-13 [S]. Reston, Virginia; American Society of Civil Engineers, 2014.

[3] European Committee for Standardization. Eurocode 8;

design of structures for earthquake resistance: part 3: assessment and retrofitting of buildings; EN 1998-3: 2005 [S]. Brussels, Belgium; European Committee for Standardization, 2005.

[4] 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (Technical specification for concrete structures of tall building: JGJ 3—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese))

[5] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese))

[6] CARRILLO J, ALCOCER S M. Acceptance limits for performance-based seismic design of RC walls for low-rise housing [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41(15): 2273-2288.

[7] SU R K L, WONG S M. Seismic behaviour of slender reinforced concrete shear walls under high axial load ratio [J]. Engineering Structures, 2007, 29(8): 1957-1965.

[8] GRAMMATIKOU S, BISKINIS D, FARDIS M N. Strength, deformation capacity and failure modes of RC walls under cyclic loading [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2015, 13(11): 1-24.

[9] KAZAZ I, GULKAN P, YAKUT A. Performance limits for structural walls: an analytical perspective [J]. Engineering Structures, 2012, 43(10): 105-119.

[10] 钱稼茹, 吕文, 方鄂华. 基于位移延性的剪力墙抗震设计 [J]. 建筑结构学报, 1999, 20(3): 42-49. (QIAN Jiaru, LÜ Wen, FANG Ehua. Displacement ductility-based aseismic design for shear walls [J]. Journal of Building Structures, 1999, 20(3): 42-49. (in Chinese))

[11] 梁兴文, 寇佳亮, 邓明科. 高强混凝土剪力墙性能指标研究 [J]. 建筑结构, 2012, 42(4): 90-93. (LIANG Xingwen, KOU Jiali, DENG Mingke. Research on the performance index of high-strength concrete shear walls [J]. Building Structure, 2012, 42(4): 90-93. (in Chinese))

[12] 梁兴文, 邓明科, 张兴虎, 等. 高性能混凝土剪力墙性能设计理论的试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2007, 28(5): 80-88. (LIANG Xingwen, DENG Mingke, ZHANG Xinghu, et al. Experimental study on performance-based seismic design of high performance concrete shear wall [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(5): 80-88. (in Chinese))

[13] 邓明科, 梁兴文, 辛力. 剪力墙结构基于性能抗震设计的目标层间位移确定方法 [J]. 工程力学, 2008, 25(11): 141-148. (DENG Mingke, LIANG Xingwen, XIN Li. Determination of target story drift for RC shear wall structure in performance-based seismic design [J].

- Engineering Mechanics, 2008, 25(11): 141-148. (in Chinese))
- [14] 张松,吕西林,章红梅. 钢筋混凝土剪力墙构件极限位移的计算方法及试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(4): 10-16. (ZHANG Song, LU Xilin, ZHANG Hongmei. Experimental and analytical studies on the ultimate displacement of RC shear walls [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(4): 10-16. (in Chinese))
- [15] 鲁懿虬,黄靓. 基于试验数据的带暗柱受弯破坏钢筋混凝土剪力墙极限位移计算方法研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(2): 80-88. (LU Yiqiu, HUANG Liang. Experimental data-based calculation method for ultimate displacement of flexure dominated RC walls with concealed columns [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(2): 80-88. (in Chinese))
- [16] 蒋欢军,应勇,王斌,等. 钢筋混凝土剪力墙构件地震损伤性能试验[J]. 建筑结构, 2012, 42(2): 113-117. (JIANG Huanjun, YING Yong, WANG Bin, et al. Experiment on seismic damage behavior of RC shear walls [J]. Building Structure, 2012, 42(2): 113-117. (in Chinese))
- [17] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 中国建筑工业出版社, 2010. (Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese))
- [18] PARK R. Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing [J]. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 1989, 22(3): 155-166.