

## 水平荷载作用下 RC 剪力墙有效刚度研究

黄远<sup>1,2†</sup>, 胡晓芳<sup>2</sup>, 万雄伟<sup>2</sup>, 洪露露<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**采用 MSC.Marc 建立了钢筋混凝土剪力墙的精有限元分析模型, 并采用试验数据对分析模型进行验证. 在此基础上, 对有限元模型进行参数分析, 研究了剪跨比、轴压比、纵筋强度、约束构件的配筋率、混凝土强度等 5 个参数对水平荷载作用下剪力墙有效刚度折减系数的影响. 分析结果表明, 相对于其他参数, 轴压比是影响剪力墙有效刚度的主要因素. 基于参数分析结果提出了一个计算剪力墙有效刚度的简化公式, 简化公式计算结果与试验结果吻合良好, 表明简化计算公式合理可靠, 可供工程设计参考.

**关键词:**RC 剪力墙; 精细有限元分析; 有效刚度; 简化公式

**中文图书分类号:**TU375

**文献标志码:**A

## Effective Stiffness of Reinforced Concrete Shear Wall under Lateral Load

HUANG Yuan<sup>1,2†</sup>, HU Xiaofang<sup>2</sup>, WAN Xiongwei<sup>2</sup>, HONG Lulu<sup>2</sup>

(1. Hunan Provincial Key Laboratory on Damage Diagnosis for Engineering Structures, Hunan University, Changsha 410082, China;  
2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Reinforced concrete shear walls are the primary lateral-load carrying elements in the high-buildings. Its stiffness property has significant influence on the internal force distribution of structures. Reinforced concrete shear walls were set up by MSC.Marc and validated by comparing with lots of test data. A parametric study was conducted on reinforced concrete shear wall to study effective stiffness influenced by the shear-span-to-wall-length ratio, axial compression ratio, yield strength of longitudinal bars in wall boundaries, longitudinal reinforcement content in wall boundaries and concrete strength. The results show that axial compression ratio is the main factor. A simplified formula to evaluate the effective stiffness of reinforced concrete shear wall was proposed on the basis of the parametric study. The results obtained from the simplified formula is in good agreement with those from experiments. It proves that the simplified formula is reasonable and reliable and can be used for reference.

**Key words:** reinforced concrete shear wall; refined finite element analysis; effective stiffness; simplified formula

钢筋混凝土(RC)剪力墙是高层和超高层结构的主要抗侧力以及承受竖向荷载的构件. 剪力墙的刚度特性会对结构的内力分布、周期比、位移比、剪

重比和刚重比等产生显著影响, 是衡量结构抵抗侧向变形能力、耗能能力和抗震性能的重要指标.

目前国内外许多学者已对剪力墙的性能进行

\* 收稿日期:2018-09-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51890901), National Natural Science Foundation of China(51890901)

作者简介:黄远(1982—),男,湖南衡阳人,湖南大学教授,工学博士

† 通讯联系人, E-mail:huangy@hnu.edu.cn

了相关研究. Li 等<sup>[1]</sup>采用桁架模型考虑剪切变形影响,提出以剪切变形为主的低矮墙有效刚度表达式. Kolozvari 等<sup>[2]</sup>提出了一种新型的 RC 剪力墙分析模型,并用该模型研究了剪切刚度对 RC 剪力墙受力性能的影响. 李小军等<sup>[3]</sup>研究了钢板剪力墙在往复加载过程中抗侧刚度的变化过程,并提出了钢板剪力墙初始抗侧刚度的计算公式.

剪力墙结构在小震和风荷载作用下的内力及变形计算涉及剪力墙的有效刚度. 不合理的刚度取值将导致计算的结构构件内力分布与实际不符以及结构位移的错误估计. 《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)中建议,剪力墙构件宜适当考虑构件开裂时的刚度退化,有效刚度可取  $0.85E_0I_0$ . 可以看出,规范中有效刚度的取值与荷载、配筋率、材料强度等无关. 相关研究表明,剪力墙有效刚度将随着这些参数的变化而发生改变<sup>[1-2]</sup>. 本文采用 MSC. Marc 软件建立钢筋混凝土剪力墙精细非线性有限元分析模型,并通过定义剪力墙有效刚度折减系数,研究了这 5 个参数对剪力墙有效刚度的影响并提出剪力墙有效刚度的简化计算公式,供工程实际参考.

## 1 有效刚度定义

在横向荷载作用下,剪力墙有效刚度的定义方法主要有试验法和作图法 2 种. 试验法根据剪力墙边缘构件中受拉纵筋达到屈服应变时对应的荷载位移曲线上的割线刚度来确定有效刚度. 作图法选取 0.75 倍极限荷载对应的割线刚度作为剪力墙的有效刚度<sup>[4]</sup>. 由于作图法简单实用而获得了很多研究学者的青睐<sup>[5]</sup>. 本文也采用作图法来确定剪力墙的有效刚度,如图 1 所示.

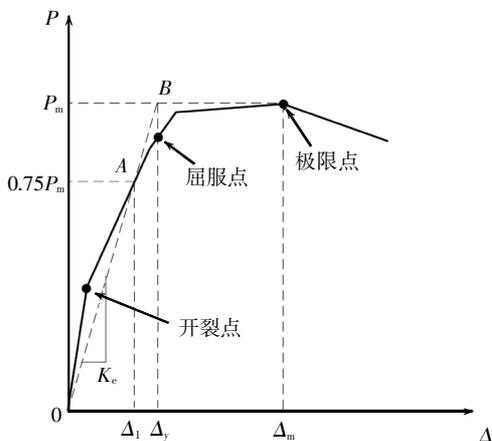


图 1 有效刚度定义

Fig.1 Definition of effective stiffness

剪力墙有效刚度定义为:

$$K_e = 0.75P_m / \Delta_1 \quad (1)$$

式中:  $P_m$  为峰值荷载;  $\Delta_1$  为 0.75 倍峰值荷载对应的位移.

为了简化研究,本文对有效刚度进行无量化,定义有效刚度折减系数如下:

$$\alpha = \frac{K_e}{K_0} = \frac{I_e}{I_0} \quad (2)$$

式中:  $K_e$  为剪力墙的有效刚度;  $K_0$  为未开裂剪力墙刚度;  $I_e$  为剪力墙截面的有效惯性矩,  $I_e = K_e H_w^3 / 3E_c$ ,  $H_w$  为剪力墙的高度,  $E_c$  为混凝土弹性模量;  $I_0$  为剪力墙截面未开裂的几何惯性矩,  $I_0 = bL_w^3 / 12$ ,  $b$  为墙体的厚度,  $L_w$  为墙肢截面的长度.

## 2 有限元模型的建立及验证

### 2.1 有限元模型的建立

采用有限元软件 MSC. Marc 对剪力墙进行模拟. 有限元模型包括地梁、中间墙体、边缘约束构件、加载梁及纵横向钢筋,如图 2 所示. 本文中混凝土选用 Solid7 号实体单元,钢筋选用 Truss9 号桁架单元. 不考虑钢筋和混凝土之间的黏结、滑移,可以采用“Inserts”命令将钢筋嵌入混凝土中.

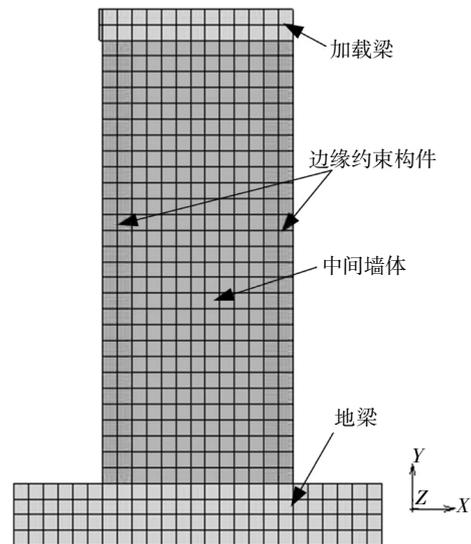


图 2 有限元模型

Fig.2 Finite element model

中间墙体混凝土单轴受压应力-应变关系采用过镇海等<sup>[6]</sup>提出的本构模型,如图 3(a)所示;边缘暗柱混凝土采用钱稼茹等<sup>[7]</sup>提出的本构模型,如图 3(b)所示;混凝土的受拉应力-应变关系采用双线性

模型,如图 3(c)所示.混凝土的泊松比取 0.2,弹性模量按式(3)计算,软化模量取混凝土弹性模量的 1/10,剪力传递系数取 0.125.钢筋的本构关系均采用强化双折线弹塑性本构关系模型,采用“Von Mises”屈服准则,泊松比取 0.3,弹性模量为  $2.0 \times 10^5$  MPa,屈服后,应力-应变关系曲线斜率取为初始弹性模量的 1/100<sup>[8]</sup>,如图 3(d)所示.

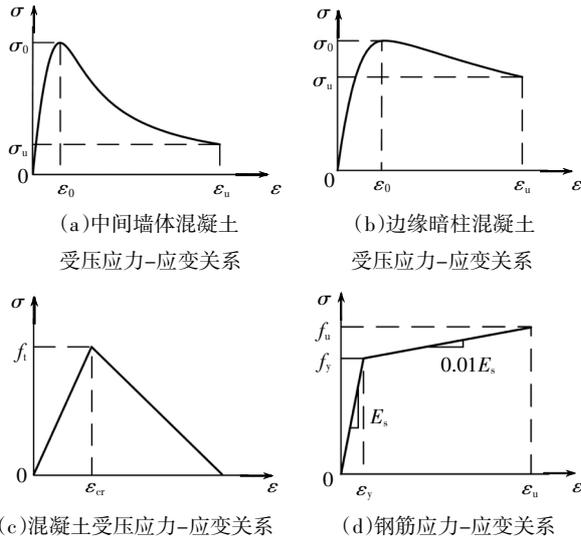


图 3 材料应力-应变关系

Fig.3 Stress-strain relationship of materials

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + 34.7/f_{cu}} \quad (3)$$

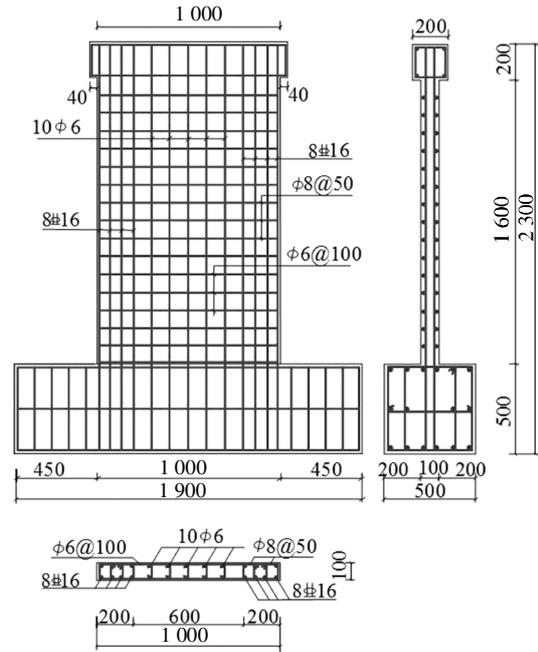
根据文献[9]中的加载方式进行加载,约束地梁底面所有节点 6 个方向的自由度来模拟地梁与地面的锚固.采用位移加载来模拟墙体承受的横向荷载,采用“Face Load”的等效均布加载方式来模拟墙体承受的竖向荷载.

为了提高计算效率并得到精确的计算结果,将混凝土单元尺寸划分成边长为 100 mm 的立方体,钢筋单元尺寸划分为 50 mm.打开 Non-Positive Definite 和 Large Strain 选项,采用力收敛准则,收敛容差为 2%,采用 Newton-Raphson 平衡迭代法进行非线性求解.

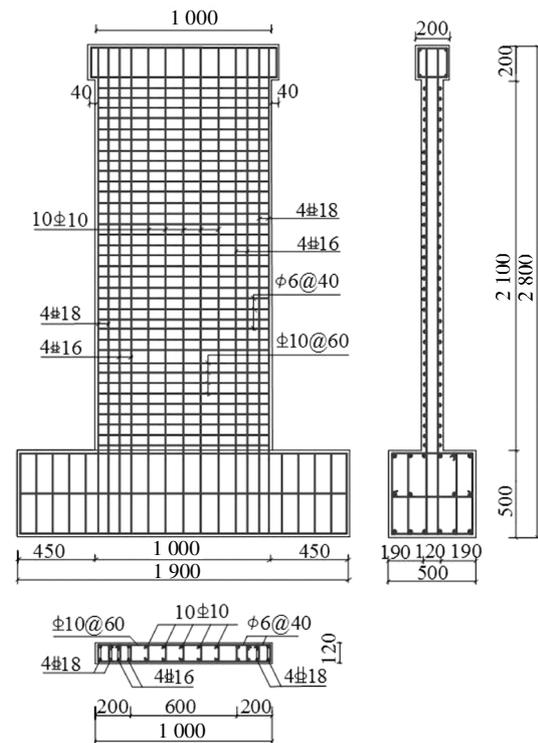
### 2.2 有限元模型的验证

选取文献 [9] 中 HPCSW-02、HPCSW-06 和 HPCSW-07 试件,文献[10]中 W7 试件进行有限元模型验证,试件配筋如图 4 所示.有限元软件计算结果与相应试验的骨架曲线对比如图 5 所示,裂缝及破坏形式如图 6 所示.图 5 中  $P_{lm}$  表示试验的极限荷载; $P_{2m}$  表示有限元计算的极限荷载;A 点表示试

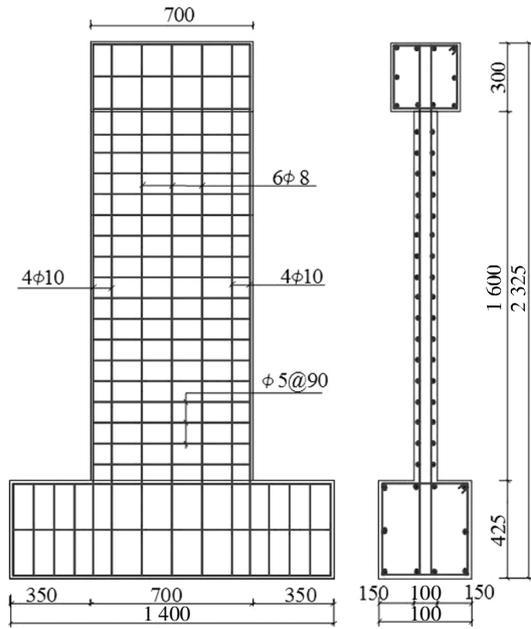
验 0.75 倍峰值荷载点,B 点表示有限元 0.75 倍峰值荷载点.试验与有限元得到的有效刚度及相对误差如表 1 所示.表 1 中,  $K_t$  表示试验得到的有效刚度;  $K_f$  表示有限元计算得到的有效刚度;  $\gamma = (K_t - K_f)/K_t$  表示相对误差.从图 5、图 6 和表 1 可以看出,有限元计算结果与试验结果吻合较好,本文所建立的有限元模型能够很好地模拟剪力墙的受力性能.



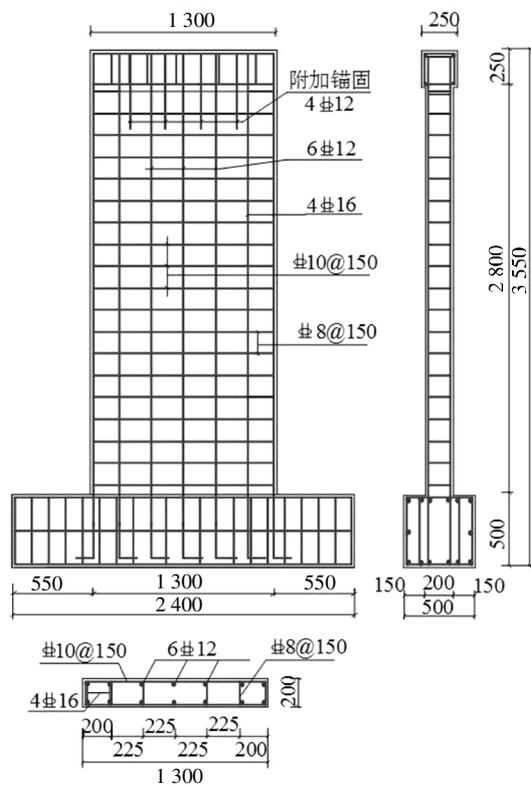
(a)试件 HPCSW-02



(b)试件 HPCSW-06、HPCSW-07



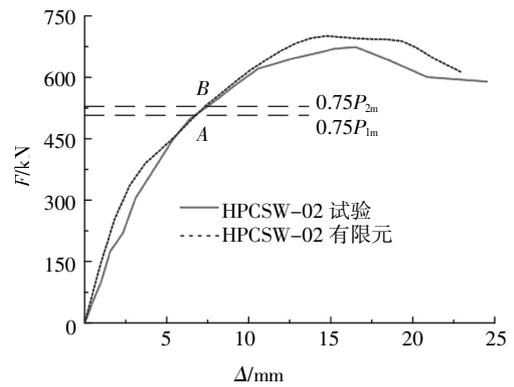
(c) 试件 W7



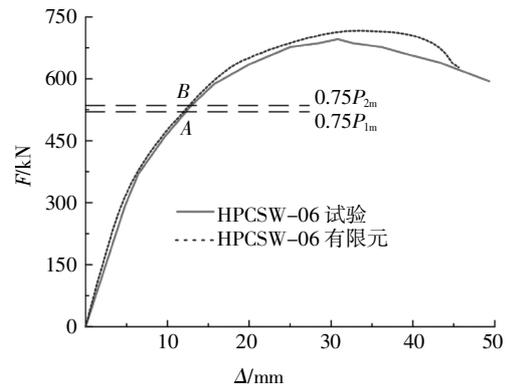
(d) 试件 SW1

图4 试件几何尺寸及配筋(单位:mm)

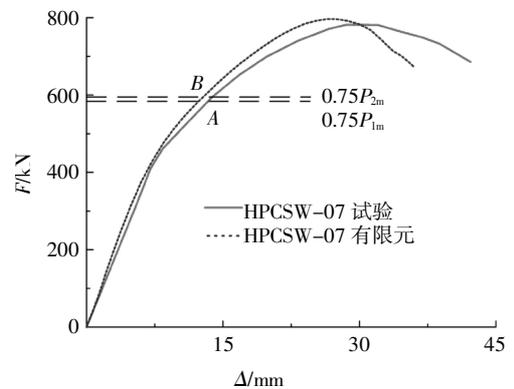
Fig.4 Dimensions and details of specimens(Unit:mm)



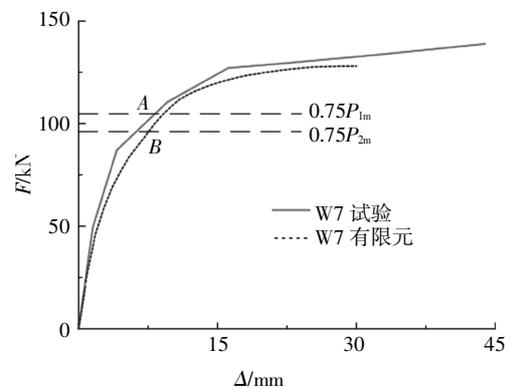
(a) 试件 HPCSW-02



(b) 试件 HPCSW-06



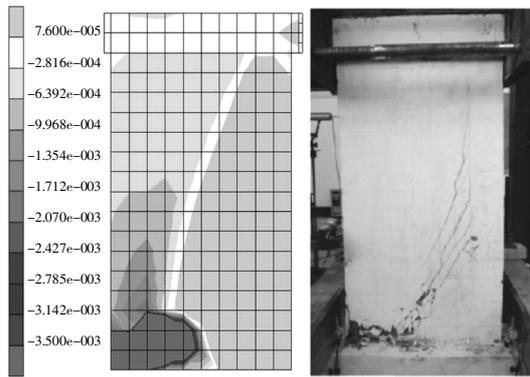
(c) 试件 HPCSW-07



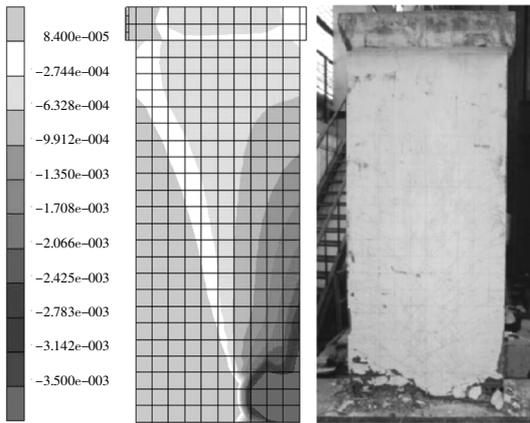
(d) 试件 W7

图5 试验骨架曲线与有限元分析结果比较

Fig.5 Comparison of load-displacement curves between experimental and simulation results



(a)试件 HPCSW-02



(b)试件 HPCSW-06

图 6 裂缝及破坏形式对比  
Fig.6 Cracks and failure modes

表 1 有效刚度模拟值与试验值对比

Tab.1 Comparison of effective stiffness between simulation and experimental results

试件编号	$K_t/(kN \cdot mm^{-1})$	$K_{t'}/(kN \cdot mm^{-1})$	$\gamma/\%$
HPCSW-02	75.85	71.56	-5.7
HPCSW-06	42.32	42.6	-1.1
HPCSW-07	43.69	46.15	5.6
W7	12.85	12.53	-2.5

### 3 参数分析

由文献[10-13]可知,剪跨比  $\lambda$ 、轴压比  $n$ 、纵向钢筋强度  $f_y$ 、约束构件纵向钢筋配筋率  $\rho_b$  和混凝土强度  $f_c$  等会影响剪力墙的受力性能,所以本文将研究这 5 个参数对剪力墙有效刚度的影响。

以文献[12]中 SW1 试件为基准模型,配筋图如图 4(d)所示。其轴压比为 0.1,剪跨比为 2.23,纵向钢筋屈服强度为 500 MPa,边缘约束构件纵向钢筋配筋率为 2.54%,混凝土强度为 23.1 MPa。

根据 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》、JGJ3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》和 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》确定分析参数的取值,如表 2 所示。

表 2 有效刚度参数取值

Tab.2 Parameters value of effective stiffness

分析参数	分析区间	
	最小值	最大值
$\lambda$	2	3
$n^*$	0.05	0.4
$f_y/MPa$	335	500
$\rho_b/\%$	0.95	3.8
$f_c/MPa$	14.3	23.1

注: $n^*$  为试验轴压比。

#### 3.1 剪跨比

本文主要研究以受弯为主的剪力墙构件,因此选取剪跨比分别为 2、2.3、2.5、2.7、3(对应剪力墙高度为 2 600 mm、3 000 mm、3 250 mm、3 500 mm、3 900 mm)的剪力墙,剪跨比对有效刚度折减系数的影响如图 7 所示。有效刚度折减系数随着剪跨比的增大而增大;剪跨比从 2 增加到 3 时,有效刚度折减系数由 0.182 增加到 0.235,增加了 29.12%。

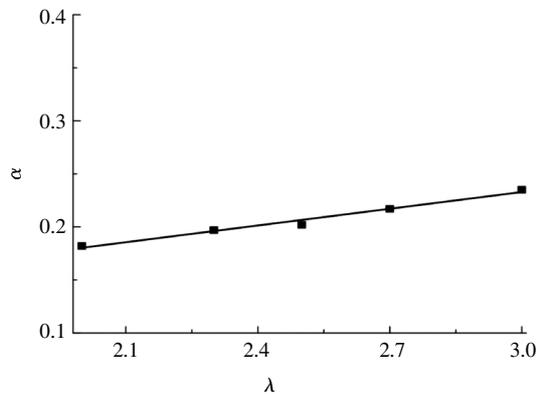


图 7 剪跨比对有效刚度折减系数的影响

Fig.7 The effect of shear span ratio on effective stiffness reduction coefficient

这是因为墙体的有效刚度是由抗剪和抗弯刚度组成<sup>[9]</sup>。当剪力墙的剪跨比较小时,墙体的变形以剪切变形为主,墙体在横向荷载和竖向荷载作用下,剪切刚度所占的比例较大。随着剪跨比增加,剪力墙的变形以弯曲变形为主,墙体在横向荷载和竖向荷载作用下,弯曲刚度所占的比例较大。有效刚度折减系数实质上反映弯曲刚度在总刚度中所占

的比例,因此随着剪跨比的增加剪力墙由剪切变形逐渐变成弯曲变形,有效刚度折减系数逐渐增加。

### 3.2 轴压比

选取剪跨比为 2.23 的墙肢模型,改变轴压比(试验轴压比)以探究其对剪力墙有效刚度折减系数的影响,结果如图 8 所示.有效刚度折减系数随着轴压比的增大而增大;且轴压比从  $n=0.05$  到  $n=0.25$  增长趋势比  $n=0.25$  到  $n=0.4$  增长要明显;轴压比从 0.05 增加到 0.25 时,有效刚度折减系数随着轴压比增加成线性增加,有效刚度折减系数由 0.159 增加到 0.340,增加了 113.9%;轴压比从 0.25 增加到 0.4 时,有效刚度折减系数变化很小,有效刚度折减系数由 0.340 增加到 0.390,增加了 14.67%。

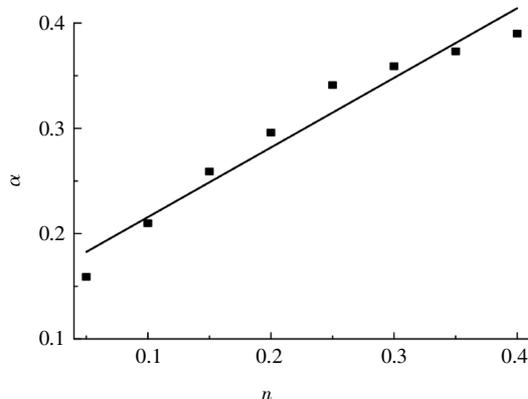


图 8 轴压比对有效刚度折减系数的影响

Fig.8 The effect of axial compression ratio on effective stiffness reduction coefficient

根据混凝土剪压复合受力机理,在轴压比较小时( $n \leq 0.6$ ),由于剪摩擦效应,剪力墙的抗侧承载力将随着轴压比的增大而增大;当轴压比增大到一定程度( $n > 0.6$ ),由于剪压共同作用,剪力墙的抗侧承载力将随着轴压比的增大而减小.因此当轴压比在 0~0.6 之间变化时,剪力墙抗侧刚度增加速度将随着轴压比增大而逐渐变缓。

### 3.3 纵向钢筋强度

选取剪跨比为 2.23 的墙肢模型,纵向钢筋强度对有效刚度折减系数的影响如图 9 所示(保持钢筋面积不变,改变钢筋屈服强度).随着纵向钢筋屈服强度的增大,有效刚度折减系数逐渐减小,纵向钢筋强度由 335 MPa 增加到 500 MPa 时,有效刚度折减系数由 0.283 减小到 0.218,减小了 22.97%。

这是因为侧向位移较小时,纵向钢筋强度对剪力墙的侧向承载力基本上没有影响.但是剪力墙的

峰值荷载随着纵向钢筋强度增加而增加,根据本文确定屈服点的方法,随着纵向钢筋屈服强度增加,屈服点会向右移动,所以剪力墙的屈服刚度会减小。

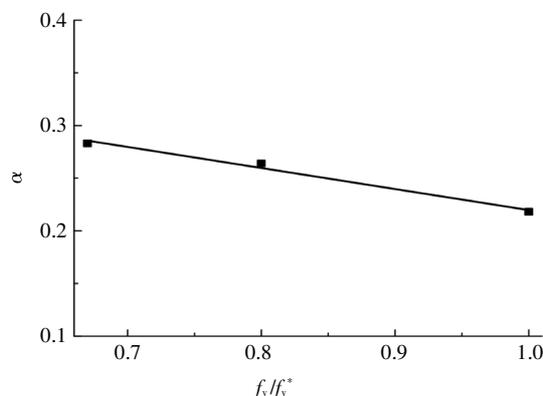


图 9 纵向钢筋屈服强度对有效刚度折减系数的影响

Fig.9 The effect of the yield tensile strength of longitudinal bars on effective stiffness reduction coefficient

### 3.4 边缘约束构件纵向配筋率

选取轴压比为 0.1 的墙肢模型,边缘约束构件纵向钢筋配筋率对有效刚度折减系数的影响如图 10 所示.有效刚度折减系数逐渐随着边缘约束构件纵向钢筋配筋率的增大而增大,且呈现线性增加趋势;边缘约束构件纵向钢筋配筋率由 0.95% 增加到 3.8%,有效刚度折减系数由 0.202 增加到 0.230,增加了 14.14%。

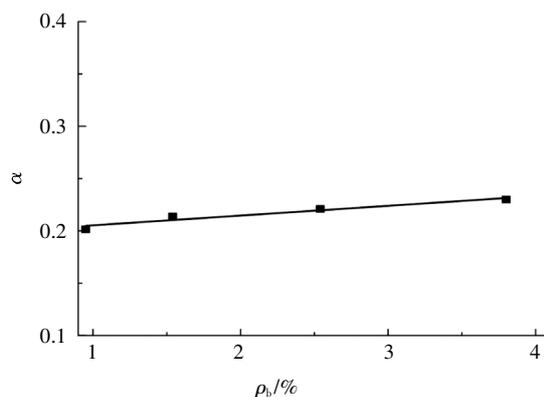


图 10 边缘约束构件纵向钢筋配筋率对有效刚度折减系数的影响

Fig.10 The effect of the longitudinal reinforcement content in wall boundaries on effective stiffness reduction coefficient

这是因为边缘约束构件随着纵向钢筋配筋率的增加,可以延缓混凝土的开裂,使剪力墙的峰值荷载增加,从而根据本文定义屈服点的方法,会使屈服点的屈服荷载增加,而屈服位移较屈服荷载增加的比较缓慢,故使有效刚度增加,进而导致比值

系数增加.

### 3.5 混凝土强度

选取轴压比为 0.1 的墙肢模型,混凝土强度对有效刚度折减系数的影响如图 11 所示.随着混凝土强度增加,比值系数逐渐增大,大致成线性增加趋势;混凝土强度由 14.3 MPa 增加到 23.1 MPa 时,有效刚度折减系数由 0.166 增加到 0.261,增加了 56.93%.

这是因为随着混凝土强度增加,混凝土的弹性模量等增加,这样会使剪力墙的有效刚度增加,从而使比值系数增加.

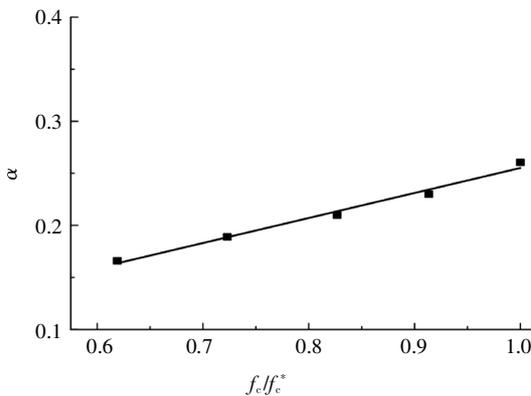


图 11 混凝土强度对有效刚度折减系数的影响

Fig.11 The effect of concrete strength on effective stiffness reduction coefficient

## 4 有效刚度简化公式及验证

### 4.1 简化公式

上述分析表明,影响有效刚度折减系数的关键参数包括轴压比、钢筋强度、混凝土强度以及边缘约束构件纵向钢筋配筋率.为了消除量纲对拟合公式的影响,定义以下无量纲参数  $f_y/f_y^*$ 、 $f_c/f_c^*$ ,其中  $f_y^*$  为基准构件的纵向钢筋屈服强度 500 MPa;  $f_c^*$  为基准构件的混凝土强度 23.1 MPa.采用 SPSS 软件进行回归分析,得到比值系数的表达式如式(4)所示.

$$\alpha = 0.6 \left( -0.155 + \frac{0.266f_y^*}{f_y} + n + 1.356\rho_b + 0.167\frac{f_c}{f_c^*} \right) \quad (4)$$

### 4.2 公式验证

由式(2)(4)可得剪力墙的有效刚度表达式,如式(5)所示.式中  $f_y$  为纵向钢筋强度;  $f_c$  为混凝土强度;  $n$  为剪力墙的轴压比;  $\rho_b$  为边缘约束构件纵向钢筋配筋率;  $\lambda$  为剪跨比;  $b$  为剪力墙的宽度.

$$K_e = \frac{0.15E_c b}{\lambda^3} \left( -0.155 + \frac{133}{f_y} + n + 1.356\rho_b + 0.0073f_c \right) \quad (5)$$

为了验证公式的准确性,选取文献 [9-10,12-14]等试验得到有效刚度  $K_{1e}$  与本文式(5)计算得到有效刚度  $K_{2e}$  进行对比,结果如表 3 和图 12 所示.表中  $\gamma_1$  为相对误差,其表达式为  $\gamma_1 = (K_{1e} - K_{2e})/K_{1e}$ .有效刚度相对偏差的平均值为 -2.4%,标准差为 4.0%,计算值与试验值符合较好,说明本文提出的公式是准确可靠的.

需要指出的是,本文主要研究受弯变形为主的剪力墙结构,因此选取的剪跨比大于等于 2.文献[1]的研究表明,当剪力墙剪跨比大于 3 时,剪力墙的有效刚度随着剪跨比变化不明显.本文进行了典型剪力墙片的参数分析,分析参数的范围涵盖了实际剪力墙的常用参数范围,实际剪力墙结构设计时只需要把相关参数代入本文公式即可得到墙体的抗侧刚度.

表 3 有效刚度计算值与试验值对比

Tab.3 Comparison of effective stiffness between calculated and experimental value

文献	试件编号	$K_{1e}/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	$K_{2e}/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	$\gamma_1/\%$
文献[9]	HPCSW-02	80.3	86.43	-7.6
文献[9]	HPCSW-06	42.6	43.84	-2.9
文献[9]	HPCSW-07	45.49	47.88	-5.3
文献[10]	W7	12.95	13.6	-5.0
文献[12]	SW1	44.1	44.79	-1.6
文献[13]	HSRCW-1	29.36	28.17	4.1
文献[13]	HSRCW-2	23.41	24.1	-2.9
文献[13]	HSRCW-3	23.68	24.1	-1.8
文献[13]	HSRCW-4	28.75	28.2	1.9
文献[14]	SW1-1	30.2	31.1	-3.0
文献[14]	SW1-2	39.03	40.09	-2.7
文献[14]	SW1-3	42.86	40.66	5.1
文献[14]	SW2-2	96.31	105.4	-9.4
文献[14]	SW2-3	48.97	52.86	-7.9
文献[14]	SW4-1	40.46	41.66	-3.0
文献[14]	SW4-2	43.36	42.16	2.8
文献[14]	SW5-1	40.72	41.88	-2.8
文献[14]	SW5-3	41.86	42.6	-1.8
平均值	—	—	—	-2.4
标准差	—	—	—	4.0

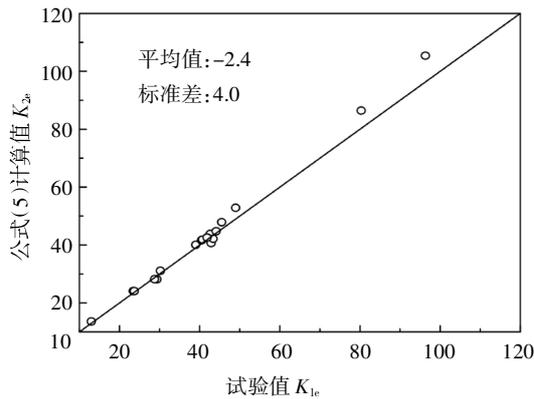


图 12 有效刚度公式值与试验值对比

Fig.12 Comparison of effective stiffness between formula and experimental results

## 5 结论

1) 本文采用的有限元建模方法能够较好地模拟剪力墙的受力性能。

2) 剪力墙有效刚度折减系数随着剪跨比、轴压比、边缘约束构件纵向钢筋配筋率、混凝土强度的增大而增大;但随着纵筋屈服强度的增加而减小。

3) 提出了计算水平荷载作用下剪力墙有效刚度的简化公式,公式计算值与试验值吻合良好,可供工程实际参考。

## 参考文献

- [1] LI B, XIANG W. Effective stiffness of squat structural walls [J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(12):1470—1479.
- [2] KOLOZVARI K, WALLACE J W. Practical nonlinear modeling of reinforced concrete structural walls [J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(12): 1—14.
- [3] 李小军, 李晓虎, 张慧颖. 核岛结构双钢板混凝土组合剪力墙抗侧刚度[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(11):55—65.  
LI X J, LI X H, ZHANG H Y. Lateral stiffness of composite shear walls with double steel plates and filled concrete for a nuclear island structure [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(11):55—65. (In Chinese)
- [4] PARK R, PAULAY T. Reinforced concrete structures [M]. New York: Wiley, 1975:535—553.
- [5] NIE J G, MA X W, TAO M X, et al. Effective stiffness of composite shear wall with double plates and filled concrete [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 99(8):140—148.
- [6] 过镇海, 张秀琴, 张达成, 等. 混凝土应力-应变全曲线的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1982, 3(1):1—12.  
GUO Z H, ZHANG X Q, ZHANG D C, et al. Experimental investigation of complete stress-strain curve of concrete [J]. Journal of Building Structures, 1982, 3(1):1—12. (In Chinese)
- [7] 钱稼茹, 程丽荣, 周栋梁. 普通箍筋约束混凝土柱的中心受压性能[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(10):1369—1373.  
QIAN J R, CHENG L R, ZHOU D L. Behavior of axially loaded concrete columns confined with ordinary hoops [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2002, 42(10):1369—1373. (In Chinese)
- [8] 王强, 宋雪迪, 郝中华, 等. 基于 ABAQUS 纤维梁单元的钢筋混凝土柱受力破坏全过程数值模拟[J]. 土木工程学报, 2014, 47(12):16—26.  
WANG Q, SONG X D, HAO Z H, et al. Numerical simulation of failure process of RC columns based on fiber beam element in ABAQUS [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(12):16—26. (In Chinese)
- [9] 方小丹, 李照林, 韦宏, 等. 高配筋率边缘约束构件高强混凝土剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2011, 32(12):145—153.  
FANG X D, LI Z L, WEI H, et al. Experimental study on seismic behavior of high performance concrete shear wall with high reinforcement ratio boundary elements [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(12):145—153. (In Chinese)
- [10] HUBE M A, MARIHUÉN A, LLERA J C D L, et al. Seismic behavior of slender reinforced concrete walls [J]. Engineering Structures, 2014, 80:377—388.
- [11] 程春兰, 周德源, 朱立猛. 带约束拉杆双钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能数值模拟及参数分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(9):10—17.  
CHENG C L, ZHOU D Y, ZHU L M. Numerical simulation and parameter analysis on seismic behavior of composite concrete an double steel plates shear walls with binding bars [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(9):10—17. (In Chinese)
- [12] 彭媛媛. 预制钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验研究[D]. 北京: 清华大学土木工程系, 2010:20—43.  
PENG Y Y. Experimental study on seismic behavior of pre-cast reinforced concrete shear walls [D]. Beijing: Department of Civil Engineering, Tsinghua University, 2010:20—43. (In Chinese)
- [13] 郭蓉, 朱凯. 配置 600MPa 级高强钢筋混凝土剪力墙的抗震性能研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(6):34—39.  
GUO R, ZHU K. Experimental research on seismic behavior of RC shear wall with 600 megapascal high-strength reinforced bars [J]. Industrial Construction, 2017, 47(6):34—39. (In Chinese)
- [14] 章红梅. 剪力墙结构基于性态的抗震设计方法研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2007:67—102.  
ZHANG H M. Study on the performance-based seismic design method for shear wall structures [D]. Shanghai: College of Civil Engineering, Tongji University, 2007:67—102. (In Chinese)