

# 配筋砌块砌体剪力墙归一化刚度衰减研究

赵艳<sup>1,2</sup>, 王凤来<sup>3</sup>, 刘洪波<sup>4</sup>, 李化明<sup>1</sup>

(1. 佳木斯大学建筑工程学院, 黑龙江 佳木斯 154007; 2. 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 哈尔滨工业大学结构工程灾变与控制教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090; 4. 黑龙江大学建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要** 目的 研究在压弯剪复合受力状态下配筋砌块砌体剪力墙的归一化刚度衰减, 确定墙体的刚度衰减规律. 方法 利用 34 片足尺全灌芯配筋砌块砌体剪力墙的低周往复荷载试验, 将墙体按照破坏模式分为剪切型和弯曲型两种, 选取截面厚度分别为 190 mm、240 mm 和 290 mm 的 3 种块型的墙体, 基于试验得到的滞回曲线, 计算得到在不同破坏模式下墙体的刚度, 采用对初始刚度的归一化和对峰值点刚度的归一化两种方法分别计算刚度退化系数  $\alpha_0 = K_i/K_0$  和  $\alpha_m = K_i/K_m$ . 结果 得到归一化刚度衰减方程, 计算值与试验值吻合较好. 刚度退化系数  $\alpha_0$  与  $\Delta_i/\Delta_0$  曲线和  $\alpha_m$  与  $\Delta_i/\Delta_m$  曲线均满足指数衰减规律, 建议指数方程中的衰减指数取 -1.34 更加合理. 结论 无论是剪切型还是弯曲型破坏墙体, 各次试验中  $\alpha_m$  曲线的离散性更小, 更加均匀、稳定, 可以用  $\alpha_m$  曲线方程表示配筋砌块砌体剪力墙的刚度衰减规律.

**关键词** 配筋砌块砌体; 剪力墙; 刚度衰减; 归一化; 刚度退化系数

中图分类号 TU365.02

文献标志码 A

## Research on Normalized Stiffness Degradation of Reinforced-Block Masonry Shear Walls

ZHAO Yan<sup>1,2</sup>, WANG Fenglai<sup>3</sup>, LIU Hongbo<sup>4</sup>, LI Huaming<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Jiamusi University, Jiamusi, China, 154007; 2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, China, 150080; 3. Key Laboratory of Structures Dynamic Behavior and Control of China Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, 150090; 4. School of Civil Engineering and Architecture, Heilongjiang University, Harbin, China, 150080)

**Abstract:** This paper intends to investigate the normalized stiffness degradation of the reinforced-block masonry shear walls under the combined action of compression, moment and shear, based on the tests of 34 full-scale fully grouted sample models subjected to low cyclic reversed lateral loads. According to the failure mechanism, the sample models can be divided into shear-dominated and

收稿日期: 2018-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51608231, 51678221); 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项(2017B16); 黑龙江省教育厅人才培养项目(2016-KYYWF-0112)

作者简介: 赵艳(1976—), 女, 副教授, 博士, 主要从事现代砌体结构和结构抗震方面研究.

flexure-dominated walls. The cross-section width of block masonry was 190mm, 240mm and 290mm in the tests. The normalized stiffness curves were derived from the hysteretic curves after the tests. The coefficient of stiffness degradation of walls was calculated by two methods, one is to be normalized by the initial stiffness,  $\alpha_0 = K_i/K_0$ , the other is by the peak stiffness,  $\alpha_m = K_i/K_m$ , and the stiffness degradation equation of these walls was integrated based on different failure mechanisms. It is demonstrated that the stiffness degradation equation follows the exponential decay law; It is more reasonable that the attenuation exponent in an exponential decay equation is acquired -1.34; furthermore, it can be shown that the dispersion of the  $\alpha_m$  curves of all walls is much smaller and the equation for the  $\alpha_m$  curves can be used for describing the stiffness decay law of the reinforced-block masonry shear walls.

**Key words:** reinforced-block masonry; shear walls; stiffness degradation; normalization; the coefficient of stiffness degradation

配筋砌块砌体剪力墙(Reinforced Block Masonry Shear Wall, RBMSW)是由混凝土小型空心砌块、灌芯混凝土、砂浆以及钢筋等多种材料组成的复合墙体,各种材料之间的力学性能差别较大,使得相互之间的作用机理较为复杂.墙体是RBMSW结构体系中主要的抗侧力构件,在水平荷载作用下,随着结构变形的增大,墙体刚度逐渐衰减<sup>[1-12]</sup>,尤其在结构处于弹塑性阶段时,墙体刚度衰减显著,影响整体结构的抗侧能力<sup>[13-14]</sup>.《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)中没有给出RBMSW的刚度变化情况,使得设计时无从取值,仅仅利用弹性阶段的刚度根据经验人为的进行折减,不清楚结构变形与刚度之间的关系.由此可见,研究RBMSW的刚度衰减规律,定性地给出其刚度衰减方程,对此种结构的设计和应用非常重要.国内外研究者对RBMSW的刚度衰减规律做了大量研究<sup>[15-19]</sup>,大多是针对各自试验的结果给出了刚度衰减方程.受砌块种类、材料强度、墙体尺寸、配筋率以及加载方式等因素影响,各次试验中墙体的破坏模式不同,从而得到的墙体刚度衰减方程离散性较大,不易从中给出定性的方程表述.笔者利用6次足尺全灌芯RBMSW拟静力试验的结果,从中选取34片试验数据相对完整的墙体作为研究对象,研究墙体的刚度衰减规律,所选墙体包含参数较多,各参数涵盖范围较广、试验数据真实有

效,为后续的分析奠定了基础.为消除参数的影响,将刚度归一化,分别采用对初始刚度的归一化和对峰值点刚度的归一化两种方法,探寻RBMSW的刚度衰减规律,得到统一的刚度衰减方程表达式.

## 1 配筋砌块砌体剪力墙参数

选取的34片墙体的具体参数详见文献[7-12].从试验记录到的滞回曲线中提取骨架曲线,按照《建筑抗震试验方法规程》(JGJ 101—96)中割线刚度计算方法,分别计算各圈正反向峰值位移点对应的刚度,计算式为

$$K_i = \frac{|+P_{\max,i}| + |-P_{\max,i}|}{|+\Delta_{\max,i}| + |-\Delta_{\max,i}|} \quad (1)$$

式中:  $+P_{\max,i}$  和  $-P_{\max,i}$  为第  $i$  次加载时正反两向滞回曲线上峰值荷载点;  $+\Delta_{\max,i}$  和  $-\Delta_{\max,i}$  为第  $i$  次加载时正反两向滞回曲线上峰值荷载点对应的位移.

## 2 归一化刚度衰减方程

由于各次试验中墙体的参数不同,试验加载条件、加载装置等因素不同,不同试验中得到的墙体刚度衰减曲线离散性较大,为消除刚度离散性的影响,将各试件的刚度归一化<sup>[13-15]</sup>.笔者通过对初始刚度的归一化和对峰值点刚度的归一化两种方法计算刚度退化系数:一种是将墙体的刚度  $K_i$  均除以其初始刚度  $K_0$ ,将其记为刚度退化系数  $\alpha_0 = K_i/K_0$ ,

将位移  $\Delta_i$  均除以其初始点对应的位移  $\Delta_0$ , 从而得到  $\alpha_0$  与  $\Delta_i/\Delta_0$  的对应曲线, 初始刚度  $K_0$  指开裂荷载点对应的刚度; 另一种是, 将墙体的刚度  $K_i$  均除以其峰值点刚度  $K_m$ , 将其记为刚度退化系数  $\alpha_m = K_i/K_m$ , 将位移  $\Delta_i$  均除以其峰值点对应的位移  $\Delta_m$ , 得到  $\alpha_m$  与  $\Delta_i/\Delta_m$  的对应曲线,  $K_m$  为峰值荷载点对应的刚度. 然后再详细的分析  $\alpha_0$  和  $\alpha_m$  曲线的变化规律, 从而确定 RBMSW 的归一化刚度衰减方程.

### 2.1 刚度退化系数 $\alpha_0$

#### 2.1.1 剪切型破坏模式墙体

利用文献[8-11]的4次试验, 从中选取试验数据相对完整的18片墙体, 其中文献[8]的墙体编号为 V1-2、V1-3、V2-1、V2-2、V3-1, 文献[9]的墙体编号为 V1、V3、V4, 文献[10]的墙体编号为 J1、J2、J3、J4, 文献[11]的墙体编号为 A-1、A-2、B-1、B-2、C-1、C-2. 可以计算得到剪切型破坏模式墙体的刚度退化系数  $\alpha_0$  曲线, 将各个墙体得到的  $\alpha_0$  进行回归分析, 可以得到每次试验中墙体的  $\alpha_0$  与  $\Delta_i/\Delta_0$  拟合曲线(见图1). 由图1可见4次试验的回归曲线与试验计算值吻合较好. 将4次试验得到的  $\alpha_0$  曲线进行对比(见图1(e)), 可以看出曲线变化趋势比较接近, 均是随着位移的增大, 刚度逐渐减小, 当位移较小时刚度衰减较快, 当位移较大时刚度衰减缓慢, 取各次试验  $\alpha_0$  曲线的均值, 得到剪切型破坏模式墙体的  $\alpha_0$  曲线方程, 该方程满足指数衰减规律, 衰减指数为 -0.1.

$$\alpha_0 = K_i/K_0 = e^{(-0.1\Delta_i/\Delta_0 - 0.08)} \quad (2)$$

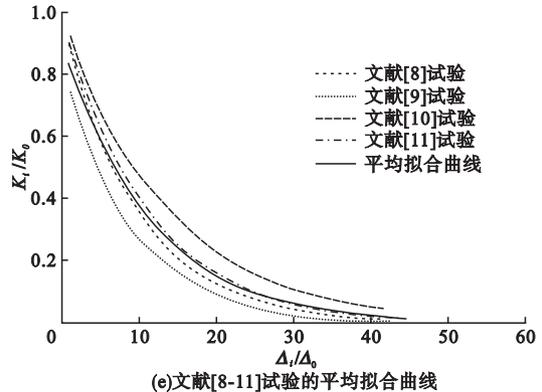
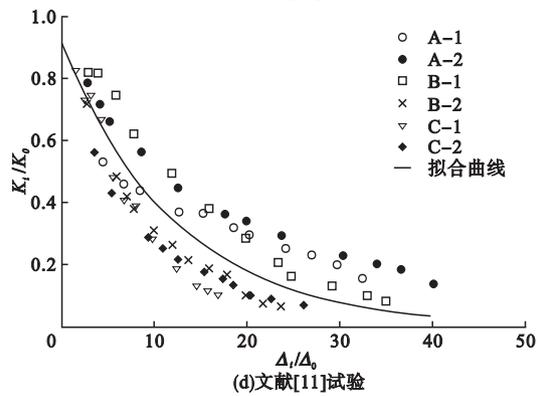
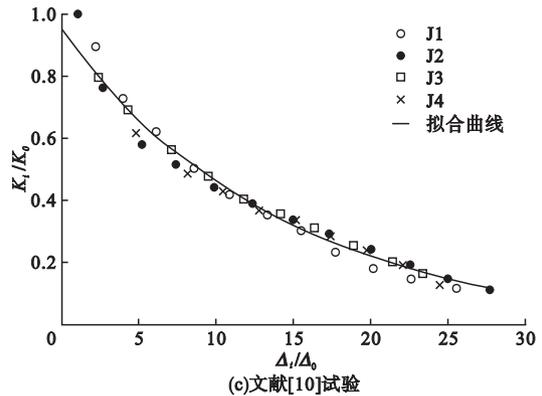
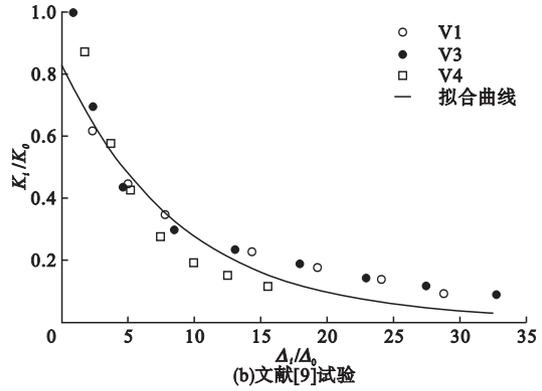
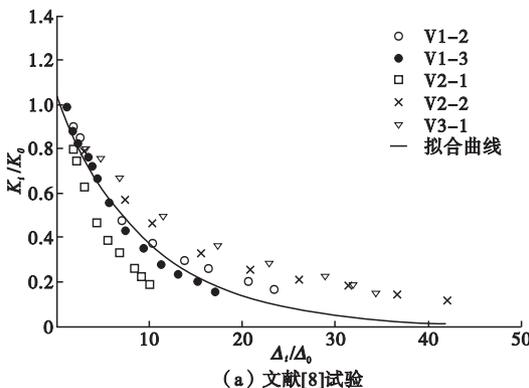


图1 剪切型墙体  $\alpha_0$  曲线

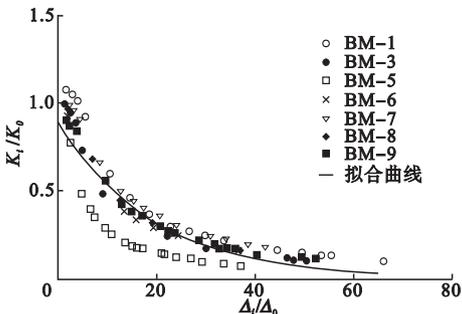
Fig. 1  $\alpha_0$  curves of shear-dominated walls

### 2.1.2 弯曲型破坏模式墙体

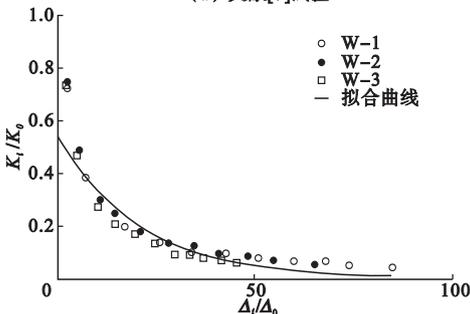
利用文献[7,9,12]的3次试验,从中选取试验数据相对完整的16片墙体,其中文献[7]的墙体编号为BM-1、BM-3、BM-5、BM-6、BM-7、BM-8、BM-9,文献[9]的墙体编号为W-1、W-2、W-3,文献[12]的墙体编号为W1、W2、W3、W4、W5、W6. 计算得到弯曲型破坏模式墙体的刚度退化系数 $\alpha_0$ ,各次试验中墙体的 $\alpha_0$ 计算值与拟合曲线比较接近,均分布在曲线的附近(见图2).

将3次试验得到的 $\alpha_0$ 与 $\Delta_i/\Delta_0$ 拟合曲线取均值,得到弯曲型破坏模式墙体的 $\alpha_0$ 与 $\Delta_i/\Delta_0$ 方程,该方程满足指数衰减规律,衰减指数为-0.044,与式(2)相比,衰减速度较慢.

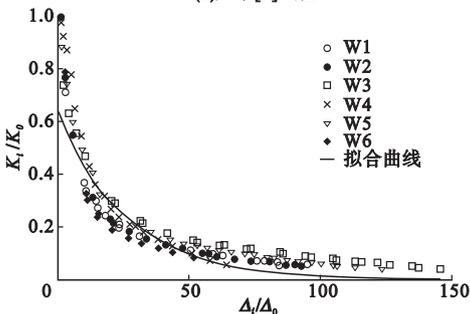
$$\alpha_0 = K_i/K_0 = e^{(-0.044\Delta_i/\Delta_0 - 0.43)} \quad (3)$$



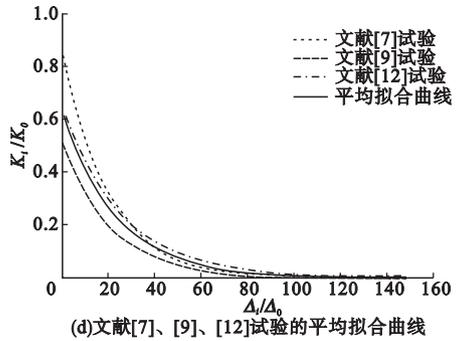
(a) 文献[7]试验



(b) 文献[9]试验



(c) 文献[12]试验



(d) 文献[7]、[9]、[12]试验的平均拟合曲线

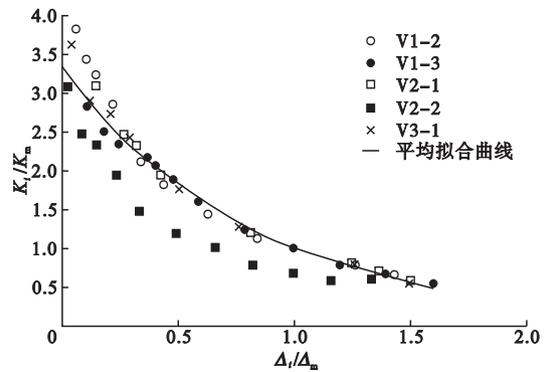
图2 弯曲型破坏模式墙体的 $\alpha_0$ 曲线

Fig. 2  $\alpha_0$  curves of flexure-dominated walls

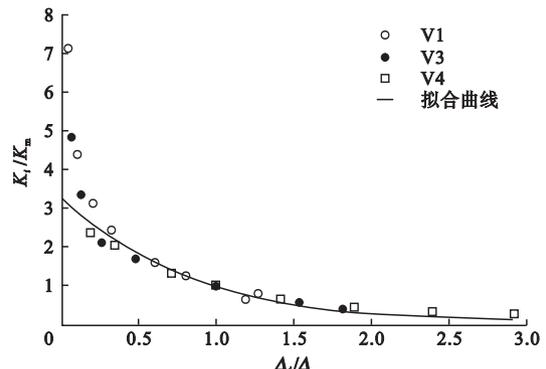
### 2.2 刚度退化系数 $\alpha_m$

#### 2.2.1 剪切型破坏模式墙体的 $\alpha_m$

利用文献[8-11]的4次试验,从中选取试验数据相对完整的18片墙体,将各试件滞回曲线中各圈荷载峰值点的割线刚度 $K_i$ 均除以其对应的 $K_m$ ,记为刚度退化系数 $\alpha_m = K_i/K_m$ ,各圈峰值点位移 $\Delta_i$ 均除以 $\Delta_m$ ,得到 $\alpha_m - \Delta_i/\Delta_m$ 曲线(见图3).



(a) 文献[8]试验



(b) 文献[9]试验

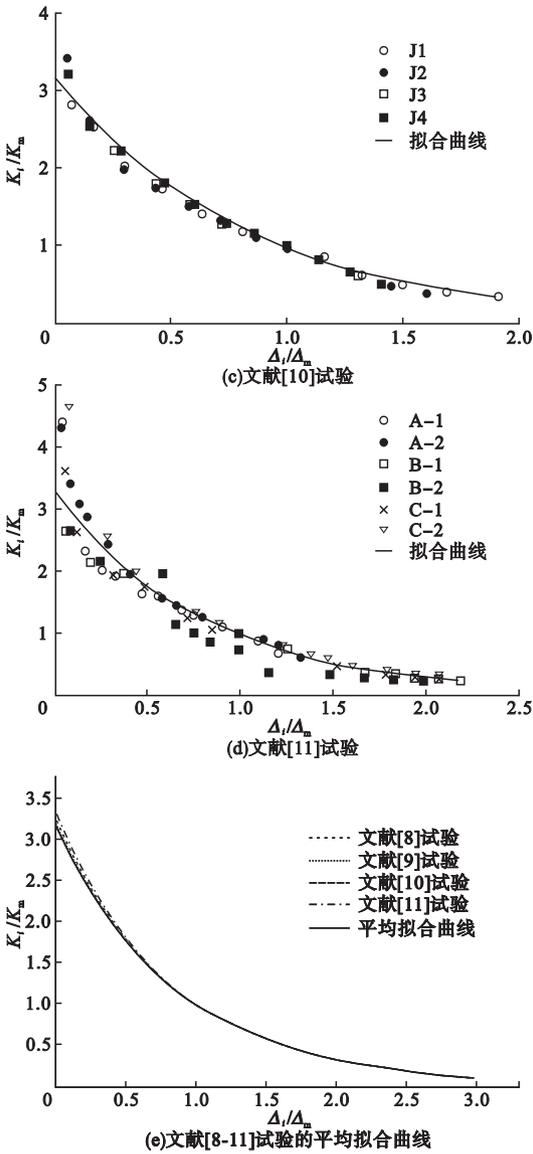


图3 剪切破坏模式墙体的  $\alpha_m$  曲线

Fig. 3  $\alpha_m$  curves of shear-failure mode walls

由图3可以看出,4次试验的回归曲线与试验计算值比较吻合,计算点基本在拟合曲线附近.对比图1(e)和图3(e),发现各次试验的  $\alpha_m$  拟合曲线更加接近.将各次试验的  $\alpha_m$  曲线取均值,得到剪切型刚度退化系数  $\alpha_m$  与  $\Delta_i/\Delta_m$  的指数衰减方程,衰减指数为 -1.16.

$$\alpha_m = K_i/K_m = e^{(-1.16\Delta_i/\Delta_m + 1.16)}. \quad (4)$$

### 2.2.2.2 弯曲型破坏模式墙体的 $\alpha_m$

利用文献[7]、[9]、[12]的3次试验,从中选取试验数据相对完整的16片墙体,分别

计算各次弯曲型墙体的  $\alpha_m$  与  $\Delta_i/\Delta_m$  对应的曲线(见图4).

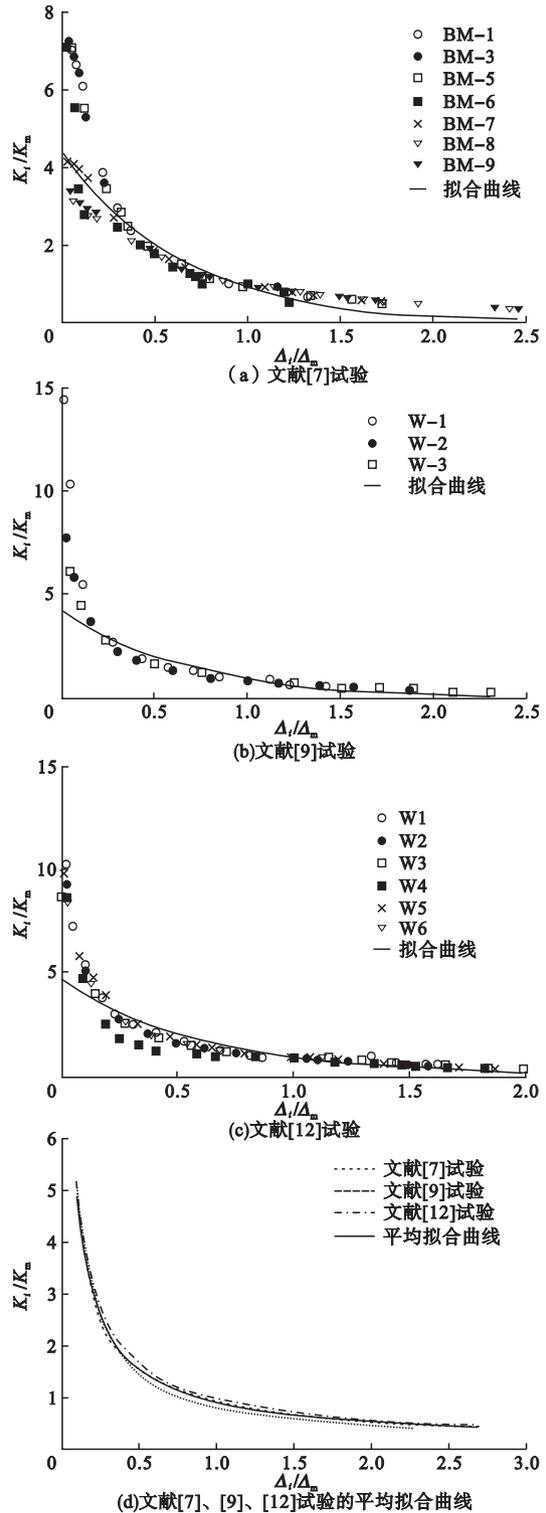


图4 弯曲破坏墙体  $\alpha_m$  曲线

Fig. 4  $\alpha_m$  curves of flexure-dominated walls

从图4可以看出除位移较小时回归值与

试验计算值相差较大,多数情况( $\Delta_i/\Delta_m > 0.20$ )回归值与试验计算值吻合较好,而位移较小时墙体处于弹性阶段,此阶段刚度几乎没有衰减,对墙体总体性能影响较小,可以忽略不计.将3次试验得到的 $\alpha_m$ 与 $\Delta_i/\Delta_m$ 拟合曲线进行对比,图4(d)与图2(d)相比各次试验的 $\alpha_m$ 拟合曲线更加接近.将各次试验的拟合曲线取均值,得到弯曲型破坏模式墙体的 $\alpha_m$ 衰减方程,方程满足指数衰减规律,衰减指数为 $-1.53$ .

$$\alpha_m = K_i/K_m = e^{(-1.53\Delta_i/\Delta_m + 1.53)}. \quad (5)$$

### 2.2.3 剪切型和弯曲型墙体 $\alpha_m$ 对比分析

将剪切型和弯曲型墙体得到的 $\alpha_m$ 与 $\Delta_i/\Delta_m$ 曲线进行对比(见图5),可以看出,两种破坏模式墙体的 $\alpha_m$ 曲线在 $\Delta_i/\Delta_m < 0.75$ 时存在一定的差别,而当 $\Delta_i/\Delta_m > 0.75$ 后二者非常接近,基本一致,当 $\Delta_i/\Delta_m > 0.75$ 后墙体基本进入到弹塑性阶段.将剪切型和弯曲型 $\alpha_m$ 拟合曲线取均值,得到RBMW的刚度退化系数 $\alpha_m$ 与 $\Delta_i/\Delta_m$ 的对应关系.

$$\alpha_m = K_i/K_m = e^{(-1.34\Delta_i/\Delta_m + 1.34)}. \quad (6)$$

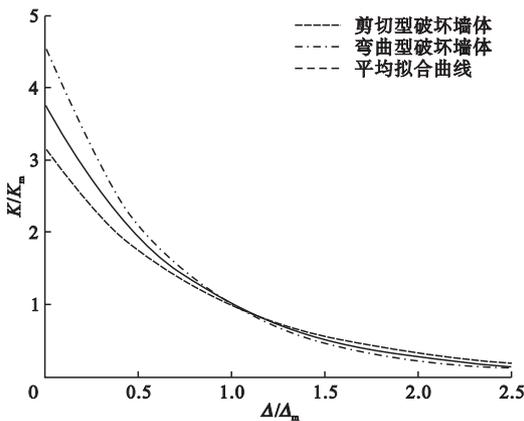


图5 剪切和弯曲破坏墙体 $\alpha_m$ 曲线

Fig. 5  $\alpha_m$  curves of shear-dominated in shear and flexure-dominated walls

### 2.3 刚度退化系数 $\alpha_0$ 与 $\alpha_m$ 对比分析

从图1(e)和图3(e)中可以看出,各次剪切型墙体的 $\alpha_m$ 曲线比 $\alpha_0$ 曲线更加均匀,离散性更小;从图2(d)和图4(d)中也可以看出,各次弯曲型墙体的 $\alpha_m$ 曲线比 $\alpha_0$ 曲线

也更均匀,离散性更小.各次试验的平均 $\alpha_m$ 曲线基本一致,不存在由于墙体尺寸、砌块强度、轴压比、配筋率等参数不同导致墙体刚度衰减趋势不同,因此,用 $\alpha_m$ 曲线能更加准确的表达此种墙体的刚度衰减规律.

## 3 结论

(1)由于墙体尺寸、砌块强度、轴压比、配筋率等参数不同,引起各次试验中墙体刚度衰减方程离散性较大.为消除各参数影响,得到统一的刚度方程,提出刚度退化系数的概念,分别采用对初始刚度的归一化和对峰值点刚度的归一化两种方法来表示墙体刚度的衰减,分别记为 $\alpha_0 = K_i/K_0$ 和 $\alpha_m = K_i/K_m$ .

(2)计算分析表明,无论是发生剪切型破坏模式的墙体还是发生弯曲型破坏模式的墙体,各次试验得到的 $\alpha_m - \Delta_i/\Delta_m$ 曲线比 $\alpha_0 - \Delta_i/\Delta_0$ 曲线更加均匀、稳定,离散性更小,建议采用 $\alpha_m$ 曲线表示配筋砌块砌体剪力墙的刚度衰减更加合理.

(3)提出了配筋砌块砌体剪力墙刚度退化系数 $\alpha_m$ 曲线方程,采用指数衰减方程表示配筋砌块砌体剪力墙的刚度衰减趋势,建议衰减指数取 $-1.34$ 能较好地反映墙体刚度的衰减规律.

### 参考文献

- [1] SHEDID M T, EL-DAKHAKHNI W W, DRYSDALE R G. Seismic performance parameters for reinforced concrete-block shear wall construction [J]. Journal of performance of constructed facilities, 2010, 24(1): 4-18.
- [2] EL-DAKHAKHNI W W, BANTING B R, MILLER S C. Seismic performance parameter quantification of shear-critical reinforced concrete masonry squat walls [J]. Journal of structural engineering, 2013, 139(6): 957-973.
- [3] SHEDID M T, EL-DAKHAKHNI W W, DRYSDALE R G. Characteristics of rectangular, flanged, and end-confined reinforced concrete masonry shear walls for seismic design [J]. Journal of structural engineering, 2010, 136(12): 1471-1482.
- [4] ZHAO Y, WANG F. Experimental studies on behavior of fully grouted reinforced-concrete

- masonry shear walls[J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2015, 14(4): 743-757.
- [5] AHMADI F, HERNANDEZ J, SHERMAN J, et al. Seismic performance of cantilever-reinforced concrete masonry shear walls[J]. Journal of structural engineering, 2014, 140(9): 04014051.
- [6] 赵艳, 王凤来, 张厚, 等. 剪切型破坏模式的配筋砌块砌体剪力墙恢复力模型[J]. 工程力学, 2014, 31(1): 137-144.  
(ZHAO Yan, WANG Fenglai, ZHANG Hou, et al. Hysteretic model for reinforced block masonry shear walls dominated shear failure mode[J]. Engineering mechanics, 2014, 31(1): 137-144.)
- [7] 姜洪斌. 配筋混凝土砌块砌体高层结构抗震性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨建筑大学, 2000.  
(JIANG Hongbin. Research on the seismic behavior of the high-rise structure with reinforced concrete block masonry [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2000.)
- [8] 全成华. 配筋砌块砌体剪力墙抗剪静动力性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.  
(QUAN Chenghua. Study on resisting shear static and dynamic performance of reinforced block masonry shear wall [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2004.)
- [9] 张亮. 240厚砌块整浇墙抗震性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.  
(ZHANG Liang. Experimental study on seismic performance of 240 reinforced block masonry shear wall [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.)
- [10] 丁向奎. 低周往复荷载下290厚砌块整浇墙剪切破坏模式试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.  
(DING Xiangkui. Experimental study on shear failure mode of 290 concrete-block casting wall under low-cyclic loading [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.)
- [11] 陈君军. 低周往复荷载下290配筋砌块砌体剪切破坏模式试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.  
(CHEN Junjun. Experimental study on shear behaviour of 290 reinforced masonry shear walls under quas-static cyclic test [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.)
- [12] 李利刚. 低周往复荷载下290厚砌块整浇墙弯曲破坏模式试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.  
(LI Ligang. Experimental study on bending failure mode of 290 concrete-block casting wall under low-cyclic loading [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.)
- [13] 赵艳. 百米级配筋砌块砌体剪力墙结构抗震性能研究与动力测试[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.  
(ZHAO Yan. Research on seismic behavior and dynamic testing of 100-meter reinforced-block masonry shear wall structures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.)
- [14] 赵艳, 刘洪波, 白旭峰, 等. 砌块整浇墙刚度衰减研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2016, 34(1): 14-17.  
(ZHAO Yan, LIU Hongbo, BAI Xufeng, et al. Research on stiffness degradation of fully grouted reinforced-block masonry shear walls [J]. Journal of Jiamusi university (natural science edition), 2016, 1(34): 14-17.)
- [15] 王凤来, 赵艳, 朱飞, 等. 砌块整浇墙刚度损伤模型研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(增刊1): 126-130.  
(WANG Fenglai, ZHAO Yan, ZHU Fei, et al. Research on stiffness damage model of fully grouted reinforced block masonry shear walls [J]. Journal of building structures, 2014, 35(S1): 126-130.)
- [16] XIN R, YAO J, ZHAO Y. Experimental research on masonry mechanics and failure under biaxial compression [J]. Structural engineering & mechanics, 2017, 61(1): 167-175.
- [17] SIYAM M A, EL-DAKHAKHNI W W, BANTING B R, et al. Seismic response evaluation of ductile reinforced concrete block structural walls I: experimental results and force-based design parameters [J]. Journal of performance of constructed facilities, 2016, 30(4): 04015066.
- [18] BANTING B R, EL-DAKHAKHNI W W. Force-and displacement-based seismic performance parameters for reinforced masonry structural walls with boundary elements [J]. Journal of structural engineering, 2012, 138(12): 1477-1491.
- [19] ELDIN H M S, GALAI K. In-Plane Seismic performance of fully grouted reinforced masonry shear walls [J]. Journal of structural engineering, 2017, 143(7): 04017054.