

文章编号: 1000-4750(2018)Suppl-0126-08

# 玻纤格栅配筋砌块墙体抗震性能试验研究

徐春一<sup>1</sup>, 逯彪<sup>1</sup>, 余希<sup>2</sup>

(沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁, 沈阳 110168; 2. 中建八局浙江建设有限公司, 浙江, 杭州 311215)

**摘 要:** 针对配筋砌体存在配筋层砂浆灰缝较厚, 不利于节能保温, 该文采用玻纤格栅土工材料替代配筋砌体中的水平钢筋, 可有效减小灰缝厚度、方便施工。为研究其抗震性能, 该文采用四连杆机构加载装置分别对水平配玻纤格栅砌块墙体、水平配钢筋砌块墙体和无筋砌块墙体进行低周往复荷载试验, 对比分析各类墙体的破坏特征及抗震性能。试验结果表明: 水平配玻纤格栅可显著提高墙体抗剪承载力、变形能力及延性。其与无筋砌块墙体相比极限荷载提高了 75%, 极限位移提高了 7.5 倍, 延性系数为无筋砌块墙体的 3.61 倍。其与配钢筋墙体相比各抗震性能指标较为接近, 且略小于配钢筋墙体。采用玻纤格栅配置在砌体水平灰缝中, 不仅可以实现薄灰缝砌体, 提高砌体热工性能, 还可显著提高砌体墙体的抗震性能, 具有很好的应用前景, 对砌体结构抗震及促进建筑节能具有重要的理论价值和现实意义。

**关键词:** 玻纤格栅; 配筋砌体; 抗震性能; 延性分析; 蒸压加气混凝土

中图分类号: TU352.11 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.06.S022

## EXPERIMENTAL STUDY ON THE SEISMIC BEHAVIOR OF MASONRY WALL WITH FIBERGLASS GEOGRID

XU Chun-yi<sup>1</sup>, LU Biao<sup>1</sup>, YU Xi<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China;

2. Zhejiang Construction Co. Ltd of China Construction Eighth Engineer Division, Hangzhou, Zhejiang 311215, China)

**Abstract:** The mortar seam in the reinforced masonry is thick, which is not conducive to energy saving and heat preservation. The glass fiber grille geotextile is used to replace the horizontal bar in the reinforced masonry. It can effectively reduce the thickness of mortar ash seam, leading to convenient construction. In order to study the seismic performance of horizontal glass fiber reinforced concrete block wall, horizontal reinforced concrete block wall and non-reinforced concrete block wall, the four-link-rod loading system is used to carry out cyclic test. The failure characteristics and seismic performance of various types of walls are compared and analyzed. Test results show that the horizontal glass fiber grille can significantly improve the shear capacity, deformation capacity and ductility of the wall. Compared with the non-reinforced concrete block wall, the ultimate load increases by 75%, the ultimate displacement increases by 7.5 times, and the ductility coefficient is 3.61 times of that without reinforcement. Compared with the reinforced concrete wall, the seismic performance index is slightly smaller than the reinforced concrete wall. The construction of fiber grille in masonry horizontal ash joints can not only improve thermal performance of the thin cracks in masonry, but also significantly improve the seismic performance of masonry walls. It has good application prospects, with important theoretical value and practical

收稿日期: 2017-06-02; 修改日期: 2018-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408373); 辽宁省自然科学基金项目(20170540765)

通讯作者: 徐春一(1983-), 女, 辽宁人, 副教授, 博士, 硕导, 从事现代砌体结构及加固改造研究(E-mail: xuchunyi@163.com).

作者简介: 逯彪(1992-), 男, 黑龙江人, 硕士生, 从事现代砌体结构及加固改造研究(E-mail: 250982776@qq.com);

余希(1992-), 男, 浙江人, 硕士, 从事现代砌体结构及加固改造研究(E-mail: 398853092@qq.com).

significance to promote the masonry structure seismic and building energy saving.

**Key words:** glass fiber grill; reinforced masonry; seismic behavior; ductility analysis; autoclaved aerated concrete

建筑节能，特别是建筑外墙节能是建筑行业一直探索的课题。对砌体结构而言，灰缝厚度是影响外墙自保温性能的重要因素<sup>[1]</sup>。灰缝厚度还会影响砌体的抗压性能，灰缝越厚，其压缩变形也越大，形成的横向拉应力也越大，砌体结构越容易破坏<sup>[2-3]</sup>。因此，减小砌体结构的水平灰缝，推广薄灰缝砌体的意义重大。配筋砌体作为现代砌体结构的一种重要形式，具有抗震抗剪性能良好、耐久性好、造价低廉等优点，在国内外建筑领域都有巨大的应用空间及发展前景<sup>[4-7]</sup>。然而，传统配筋砌体灰缝厚度在 10 mm~12 mm 之间，难以满足薄灰缝的要求，且传统配筋材料易锈蚀，使得砌体结构建筑全寿命周期大打折扣<sup>[8]</sup>。因此，探索一种既能实现薄灰缝，又能具有较好的抗震性能，且材料耐久性良好的配筋形式就显得尤为重要。

玻璃纤维土工格栅是 GFRP 材料之一，具有抗拉强度高、伸长率低、耐高温、耐腐蚀、造价低廉等优点，更重要的是玻纤格栅截面轻薄，将其配置于砌体水平灰缝，能使配筋砌体砂浆厚度满足薄灰缝的要求。目前，玻纤格栅主要应用于高级公路、市政道路及机场路面<sup>[9-11]</sup>，在建筑结构工程中鲜有应用。鉴于此本文提出用玻璃纤维土工格栅替代普通钢筋配置于砌体的水平灰缝中，并通过拟静力试验验证其可行性，对建筑节能及墙体改革创新具有很好的推进意义和应用前景。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计与制作

试验所用蒸压加气混凝土砌块，主规格尺寸为 600 mm×300 mm×200 mm，辅助砌块尺寸为 300 mm×300 mm×200 mm，砌块强度等级为 A5.0，干密度等级为 B06，实测抗压强度为 5.25 MPa，劈裂抗拉强度为 0.52 MPa(劈压比为 1/10)，砌筑砂浆采用强度等级为 Ma7.5 的专用砂浆，实测砂浆抗压强度  $f_2=8.56$  MPa。试验共设计 3 片墙体，其中，GSW 为配置玻纤格栅墙体，SW 为无配筋墙体，CRBW 为配置钢筋墙体，主要设计参数如表 1 所示。在试件上下两端各设置了强度等级为 C30 钢筋混凝土压梁和底梁<sup>[12]</sup>，用来模拟房屋圈梁及在竖向荷载

作用下起到荷载分配梁的作用，截面尺寸与水平配筋构造详图如图 1 和图 2 所示。

表 1 试件设计参数

Table 1 Design parameters of specimens

试件编号	竖向压应力/MPa	格栅网格/mm	拉力/(kN/m)	配筋率/(%)	灰缝/mm
配玻纤格栅墙体 GSW	0.6	25.4×25.4	50	0.11	5
无配筋墙体 SW	0.4	—	—	—	5
配钢筋墙体 CRBW	0.6	—	—	0.10	10

玻纤格栅的体积配纤率计算公式可参照《砌体结构设计规范》GB 5003—2011<sup>[13]</sup>网状配筋砌体，具体计算公式如下：

$$\rho_s = \frac{(a+b)A_s}{abS_n} \quad (1)$$

式中： $a$  为玻纤格栅长度； $b$  为玻纤格栅宽度； $A_s$  为玻纤格栅截面面积，EGA1×1(30×30) 和 EGA1×1(50×50) 单纱截面面积约为 0.53 mm<sup>2</sup> 和 0.68 mm<sup>2</sup>； $S_n$  为玻纤格栅的竖向间距。

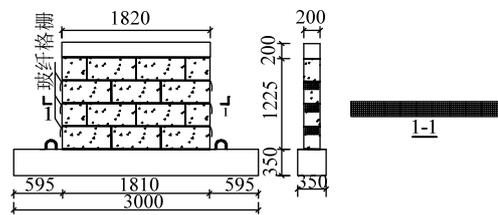


图 1 试件 GSW 设计详图

Fig.1 Design details of model GSW

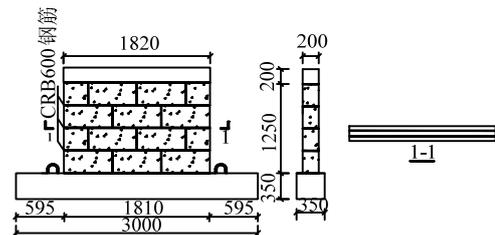


图 2 试件 CRBW 设计详图

Fig.2 Design details of model CRBW

### 1.2 试验装置

试验采用四连杆机构加载装置，四连杆加载装置能够保证试件在水平往复荷载的作用下，顶面只发生平动而不发生转动，因此试件顶部受力更均匀，不会出现局部受压的情况。水平方向的往复力通过 250 kN 的 MTS 电液伺服加载系统加载。为了模拟房屋层间墙体作用的竖向荷载，采用同步液压

加载装置,并配有自动保压和压力调节装置。水平和竖向荷载通过四连杆机构的横梁传给混凝土梁,再传递给墙体顶面<sup>[14]</sup>。加载装置示意图如图3所示。

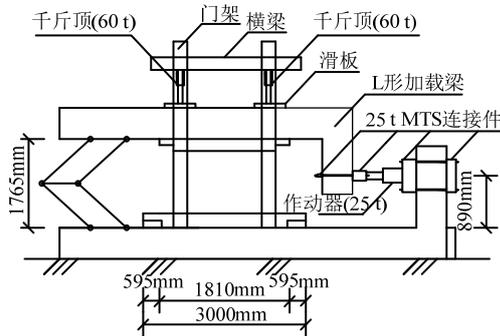


图3 加载装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of loading device

### 1.3 测点布置

墙体的测点布置如图4所示,在试件的顶部布置位移计1-1和1-4测量墙体顶部位移,在试件底梁上布置位移计测量墙体与装置底座的相对位移,位移计1-2和1-3分别布置在墙体的中部和根部,测量墙体在试验过程中相应高度的水平位移。位移计的量程均为100mm。

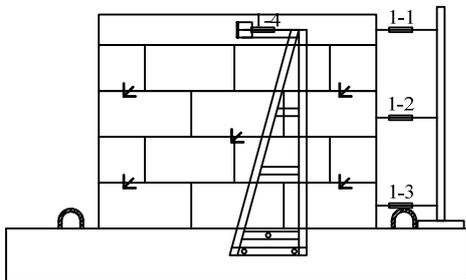


图4 测点位置示意图

Fig.4 Sketch map of measuring points

### 1.4 加载制度

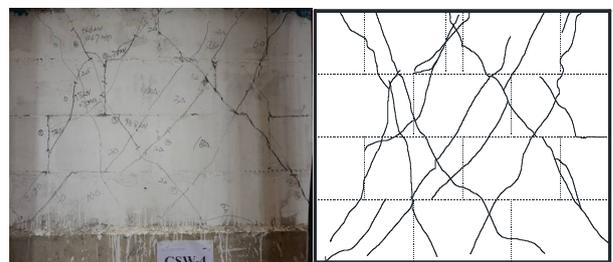
在正式加载之前应进行预加载工作,首先施加90kN的竖向荷载2次~3次,然后往复预加一次20kN的水平力,以消除试件内部的不均匀性,同时确认试验装置、仪器和试件是否正常工作。在预加载完成之后开始正式加载,竖向荷载一次加至设计值( $\sigma_1 = 0.6 \text{ MPa}$ ,  $N = 217 \text{ kN}$ ;  $\sigma_2 = 0.4 \text{ MPa}$ ,  $N = 145 \text{ kN}$ )并保持恒定不变。水平方向采用力-位移双控制,在试件开裂前加载采用力控制,第一级荷载取估计极限荷载的20%,后一级荷载按20kN的增量增加,每级荷载循环一次,直至滞回曲线形状发生明显非线性的现象且墙体有明显的裂缝产生后(即试件屈服),改用位移控制加载方式,以推拉两个方向试件初裂位移的绝对值的平均值的倍

数进行位移控制加载,每级荷载循环三次,直至承载力下降至极限荷载的80%或试件不宜继续加载时,停止试验<sup>[15]</sup>。

## 2 试验现象

### 2.1 GSW 试件的试验现象

当试件 GSW 正向加载至 115.21 kN(墙顶位移 1.61 mm)时,受拉区左上角砌块(第一皮砌块下部)开裂,此后,负向加载至 137.91 kN(墙顶位移 1.54 mm)时,受拉右下角第一皮砌块出现裂缝,裂缝与水平方向大致成 45°。墙体开裂屈服后,水平加载制度采用正整数倍开裂位移控制,GSW 的开裂位移 $\Delta$ 取 1.58 mm。在此循环加载过程中,裂缝沿墙体对角线向上下发展延伸且宽度变大,同时在墙体对角线方向上新的细小裂缝产生。当位移加载至 7 $\Delta$ 时,水平荷载达到极限承载力,正向为 163.57 kN,负向为 172.10 kN,沿 45°方向的斜裂缝继续延伸,继续加载,墙片局部出现掉渣现象。控制位移加载至 11 $\Delta$ ,正向位移达到 16.38 mm 时,裂缝沿墙体对角线方向充分发展,一直延伸到试件底部。继续加载,墙体发出几声“砰砰”响声,主裂缝上下贯通,此时水平荷载下降到 131.91 kN,约为极限荷载的 80%,停止试验。试件破坏形态如图 5 所示。



(a) 裂缝照片

(b) 裂缝手绘图

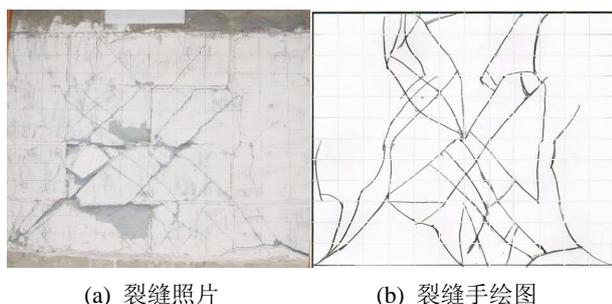
图5 试件 GSW 破坏形态

Fig.5 Failure phenomenon of model GSW

### 2.2 SW 试件的试验现象

当试件 SW 正向加载至 79.47 kN(墙顶位移 0.68 mm)时,受拉区左下角砌块(第一皮砌块下部)开裂,负向加载至 81.20 kN(墙顶位移 0.65 mm)时,受拉右下角第一皮砌块出现裂缝,裂缝与水平方向大致成 45°。墙体开裂屈服后,水平加载制度采用正整数倍开裂位移控制,SW 的开裂位移 $\Delta$ 取 0.67 mm。在此循环加载过程中,裂缝沿墙体对角线向上下发展延伸且宽度变大,同时在墙体对角线方向上还产生许多新的细小裂缝。当位移控制在 2 $\Delta$ 时,水平荷载达到 SW 的极限承载力,正向 91.67 kN、

负向 100.73 kN, 此时正向和负向沿 45° 方向的斜裂缝曲折延伸且有上下完全贯通的趋势, 继续加载, 掉渣现象较为严重。控制位移加载至 7Δ, 正向位移达到 4.59 mm 时, 裂缝沿墙体对角线方向细密发展, 主裂缝变宽, 随着几声“砰砰”的响声, 主裂缝上下完全贯通。荷载下降到 76.74 kN, 约为极限荷载的 83.71%, 试件已失效, 停止加载。试件破坏形态如图 6 所示。



(a) 裂缝照片 (b) 裂缝手绘图

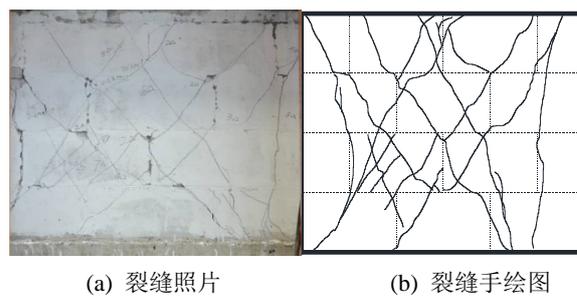
图 6 试件 SW 破坏形态

Fig.6 Failure phenomenon of model SW

### 2.3 CRBW 试件的试验现象

当试件 CRBW 正向加载至 120.04 kN(墙顶位移 1.74 mm)时, 受拉区左下角砌块(第一皮砌块下部)开裂, 当负向加载至 134.75 kN(墙顶位移 1.60 mm)时, 受拉右下角第一皮砌块出现小裂缝, 裂缝与水平方向大致成 45°。墙体开裂屈服后, 水平加载制度采用正整数倍开裂位移控制, CRBW 的开裂位移 Δ 取 1.67 mm。在此循环加载过程中, CRBW 旧裂缝张开、闭合, 裂缝沿墙体对角线向上下发展延伸且宽度变大, 同时在墙体对角线方向上还产生许多新的细小裂缝, 卸载后残余变形较大。当正向位移达到 11.72 mm、负向位移达到 11.43 mm 时, 水平

荷载达到极限承载力, 正向为 167.74 kN、负向为 169.20 kN。此时正向和负向沿 45° 方向的斜裂缝曲折延伸。继续增大位移, 水平承载力没有明显下降, 墙片局部有掉渣现象。当加载至 11Δ, 正向位移达到 18.33 mm 时, 裂缝沿墙体对角线方向细密发展, 随着几声“砰砰”的响声, 主裂缝贯通。此时水平荷载下降到 140.81 kN, 为极限荷载的 83.95%, 试件失效, 停止加载。试件破坏形态如图 7 所示。



(a) 裂缝照片 (b) 裂缝手绘图

图 7 试件 CRBW 破坏形态

Fig.7 Failure phenomenon of model CRBW

## 3 试验结果

墙体试件在低周往复荷载试验下各阶段实测特征荷载值和对应特征位移值见表 2。表中参数包括:  $P_c$  为开裂荷载,  $P_u$  为极限荷载、 $P_f$  为荷载下降到极限荷载 80% 所对应的荷载值, 即为破坏荷载、 $\Delta_c$  为开裂荷载对应的特征位移、 $\Delta_u$  为极限荷载对应的特征位移、 $\Delta_f$  为破坏荷载对应的特征位移、 $P_u/P_c$  为墙体的极限荷载与初裂荷载的比值、 $\Delta_u/\Delta_c$  为墙体的极限位移与初裂位移的比值。墙体试件的开裂荷载、开裂位移、极限荷载、极限位移、破坏荷载及破坏位移均取正向和负向绝对值的平均数。

表 2 试验结果

Table 2 Experiment results

试件编号	数值类型	$P_c$	$\Delta_c$	$P_u$	$\Delta_u$	$P_f$	$\Delta_f$	$P_u/P_c$	$\Delta_u/\Delta_c$
GSW	正向	115.21	1.61	163.57	11.01	131.91	16.38	1.42	6.84
	负向	-137.91	-1.54	-172.10	-10.81	-154.07	-16.16	1.25	7.02
	均值	126.56	1.58	167.84	10.91	142.99	16.27	1.33	6.93
SW	正向	79.47	0.68	91.67	1.28	76.74	4.59	1.15	1.88
	负向	-81.2	-0.65	-100.37	-1.27	-84.23	-4.60	1.24	1.95
	均值	80.34	0.67	96.02	1.28	80.49	4.60	1.20	1.92
CRBW	正向	120.04	1.74	167.74	13.54	140.81	18.44	1.40	7.78
	负向	-134.75	-1.60	-169.22	-12.84	-131.97	18.54	1.26	8.03
	均值	127.34	1.67	168.48	13.19	136.39	18.49	1.32	7.91

由表 2 可以看出, 与素墙相比, 水平配玻纤格栅墙体的开裂荷载提高了 58%, 极限荷载提高了 75%, 开裂位移为无筋素墙的 2.36 倍, 极限位移为

无筋素墙的 8.5 倍; 水平配钢筋墙体的开裂荷载提高了 59%, 极限荷载提高了 76%, 开裂位移为无筋素墙的 2.49 倍, 极限位移为无筋素墙的 10.31 倍。

配玻纤格栅或钢筋可显著提高墙体抗剪承载力, 延缓墙体开裂。试件 GSW 与 CRBW 相比, 开裂荷载、开裂位移、极限荷载及极限位移基本相当。且配钢筋砌体试件略好于配玻纤格栅砌体试件。配玻纤格栅可显著提高墙体的变形能力及抗剪承载力, 延缓墙体开裂。

## 4 抗震性能分析

### 4.1 滞回曲线

低周往复荷载作用下的滞回曲线可以反映出试件的承载力、刚度和耗能能力。试件 GSW、SW 和 CRBW 的滞回曲线如图 8~图 10 所示。从图中可以看出如下基本特征:

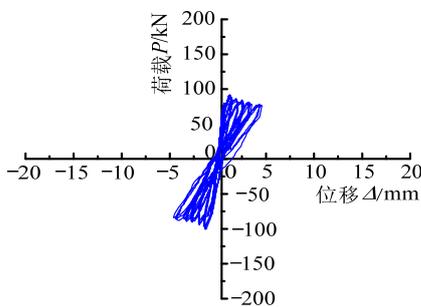


图 8 试件 SW 滞回曲线

Fig.8 Hysteresis loops of model SW

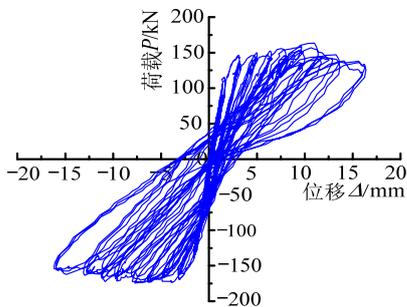


图 9 试件 GSW 滞回曲线

Fig.9 Hysteresis loops of model GSW

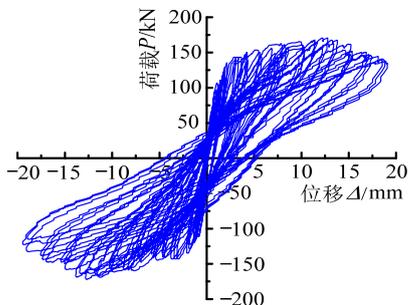


图 10 试件 CRBW 滞回曲线

Fig.10 Hysteresis loops of model CRBW

1) 在加载初期, 墙体未开裂, 墙体位移反应很小, 滞回环的面积较小, 滞回环基本重合, 荷载与变形曲线近似于直线, 表明试件处于弹性受力

阶段。

2) 继续加载, 墙体底部出现  $45^\circ$  斜向裂缝, 荷载与变形曲线发生转折, 可认定墙体已经屈服, 表明试件已进入弹塑性受力阶段, 此时墙体吸收大量能量用于原有裂缝发展延伸以及新的细小裂缝的产生, 所以滞回环所包络的面积较屈服前相比显著增大并向梭形转变。

3) 试件达到极限荷载后, 滞回环所包络的面积进一步增大的同时, 滞回环形状由梭形变化为反 S 形, 表明墙体沿裂缝发生了一定的剪切滑移。此后继续加载, 墙体滑移明显增大, 各试件滞回环峰值表现出下降的趋势。

4) 通过对比各组试件的滞回曲线可以看出, 与配筋砌体相比, 无配筋的素墙试件滞回曲线的极限位移和破坏位移很小, 各个阶段滞回环面积较小, 在达到极限荷载后, 其承载力下降较快, 而配置玻纤格栅或钢筋的墙体试件在极限荷载后, 承载力下降的较为缓慢, 配置玻纤格栅可明显提高墙体的延性及抗震性能。

5) 通过比较 GSW 试件与 CRBW 试件可以看出, 两者的滞回曲线发展趋势大致相同, 水平配钢筋墙体的耗能能力及延性稍好于配置玻纤格栅墙体。

### 4.2 骨架曲线

骨架曲线是将滞回曲线中每级荷载的第一次循环的峰值点连接起来的外包络曲线。本试验 3 片墙体试件的骨架曲线如图 11~图 13 所示, 从图中可以看出无筋墙体 SW 的开裂荷载、极限荷载与破坏荷载均较小, 且与之对应的特征位移同样较小, 无筋墙体在超过极限荷载后骨架曲线突然下降, 且延伸较短, 而配筋及玻纤格栅墙体的开裂荷载、极限荷载、破坏荷载及其与之对应的各位移特征值均较为接近, 开裂后水平承载力均出现一段较长的强化阶段, 但相对于配玻纤格栅墙体, 配筋墙体在达到

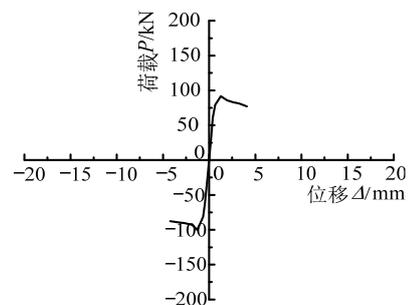


图 11 SW 骨架曲线

Fig.11 Skeleton curve of model SW

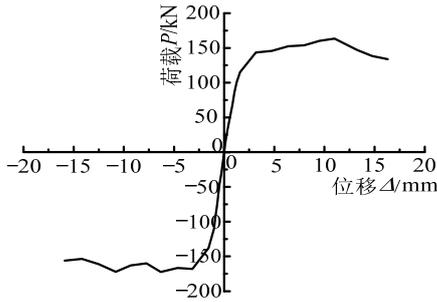


图 12 GSW 骨架曲线

Fig.12 Skeleton curve of model GSW

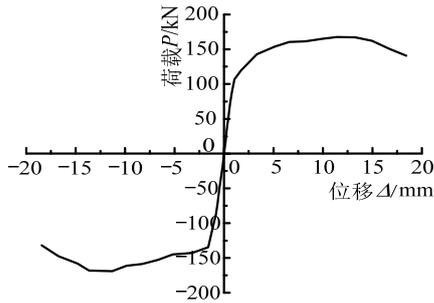


图 13 CRBW 骨架曲线

Fig.13 Skeleton curve of model CRBW

极限荷载后骨架曲线下降更为平缓,配玻纤格栅墙体骨架曲线下降更突然。

### 4.3 延性分析

砌体结构或构件的延性能力可用延性系数  $\lambda$  和侧移角  $\beta$  来表示。延性系数是极限位移  $\Delta_u$  与等效屈服位移  $\Delta_c$  的比值,其数学表达式如式(2)。

$$\lambda = \frac{\Delta_u}{\Delta_c} \quad (2)$$

式中:  $\Delta_c$  为试件的开裂位移;  $\Delta_u$  为试件的极限位移,即最大荷载所对应的位移。

侧移角是试件最大荷载所对应的位移与试件高度的比值,其计算公式如下:

$$\beta = \frac{\Delta_u}{h} \quad (3)$$

式中:  $\beta$  为侧移角;  $h$  为试件高度。

表 3 墙体延性系数及侧移角

Table 3 Ductility coefficient and drift angle of wall

试件编号	延性系数 $\lambda$			侧移角 $\beta$		
	正向	负向	均值	正向	负向	均值
配玻纤格栅墙体 GSW	6.83	7.02	6.93	1/105	1/108	1/106
无配筋墙体 SW	1.88	1.95	1.92	1/381	1/386	1/383
配钢筋墙体 CRBW	7.78	8.03	7.91	1/160	1/155	1/158

由表 3 可以看出:无任何构造措施的普通砌块墙体 SW 与配玻纤格栅或者配钢筋的墙体相比,它的极限延性系数  $\lambda$  及侧移角  $\beta$  很小,说明脆性较为

明显,试件 SW 表现出变形能力不足,同时也说明水平配筋和玻纤格栅不但提高了砌体的承载能力,而且改善了砌体的脆性性质。试件 GSW 与试件 CRBW 对墙体的变形能力的提高程度基本相同,水平配钢筋墙体的延性系数为无筋素墙的 4.11 倍,水平配玻纤格栅墙体的延性系数为无筋素墙的 3.61 倍。所以水平配玻纤格栅可有效提高墙体延性,增强其变形能力。

### 4.4 刚度退化

刚度退化是指在整个加载过程中,结构或构件的刚度随着同级位移循环加载次数的增多及加载位移的增大而减小的现象,是房屋弹塑性动力分析的主要参数。将每级循环荷载峰值点的割线刚度定义为等效刚度  $K$ ,其定义式如下:

$$K_i = \frac{|P_i| + |-P_i|}{|\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (4)$$

式中:  $K_i$  为第  $i$  次循环的等效刚度;  $P_i$  为第  $i$  次循环正向水平荷载或正向位移值所对应的抗剪强度值;  $-P_i$  为第  $i$  次循环反向水平荷载或反向位移值所对应的抗剪强度值;  $\Delta_i$  为第  $i$  次循环正向水平荷载或正向位移值所对应的位移值;  $-\Delta_i$  为第  $i$  次循环反向水平荷载或反向位移值所对应的位移值。

按式(4)计算所得各个试件在各级循环加载下的等效刚度,并绘制成刚度退化曲线,见图 14~图 16。在整个加载过程中,刚度随着位移的增大而减小,具体减小变化过程如下:刚开始加载至墙体还未开裂(即未屈服)阶段,墙体的起始刚度很大,且随着循环荷载的增大而减小,至墙体开裂刚度已有较大幅度的降低;墙体开裂后,刚度退化随加载位移的增大而迅速增大,其主要原因是由循环位移作用下墙体裂缝缝宽变化及裂缝发展延伸造成的;继续加载至墙体未达到极限荷载的阶段,刚度下降幅度变小,刚度退化曲线出现大弧度特征;墙体达到极限荷载后继续加载,刚度下降趋于平缓趋势。对比 3 组试件可知:

1) 不论是在弹性阶段还是在弹塑性阶段,SW 的刚度退化更快;在弹塑性阶段,玻纤格栅或钢筋对砌块墙体有约束作用,可以提高墙体的整体性,因此墙体 GSW 及墙体 CRBW 刚度退化更慢。

2) 比较试件 GSW 与试件 CRBW 可以看出,曲线基本相吻合,配筋墙片在开裂后曲线更为平缓且极限变形较大。

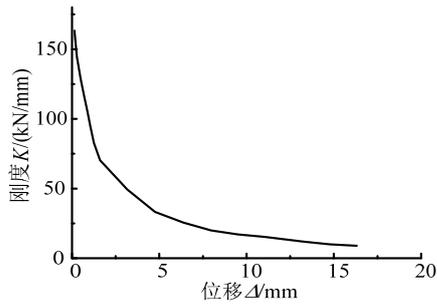


图 14 试件 GSW 刚度退化曲线

Fig.14 Stiffness degradation curve of model GSW

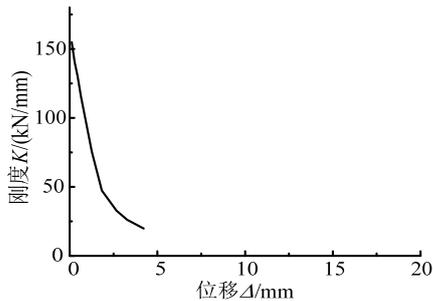


图 15 试件 SW 刚度退化曲线

Fig.15 Stiffness degradation curve of model SW

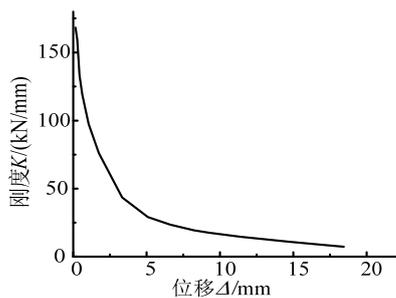


图 16 试件 CRBW 刚度退化曲线

Fig.16 Stiffness degradation curve of model CRBW

## 5 结论

(1) 试件破坏均属于剪切破坏, 无筋砌体试件破坏形式为明显的主交叉斜裂缝, 且裂缝宽度较大, 破碎现象严重; 配玻纤格栅和钢筋砌体试件均出现多条斜裂缝, 且两侧出现许多细小斜裂缝, 但配钢筋砌体试件裂缝沿墙面分布更加均匀。

(2) 与无筋砌块墙体相比, 水平配玻纤格栅墙体的开裂荷载提高了 58%, 极限荷载提高了 75%, 开裂位移为无筋素墙的 2.36 倍, 极限位移为无筋素墙的 8.5 倍; 配玻纤格栅与钢筋试件相比, 开裂荷载、开裂位移、极限荷载及极限位移基本相当。且配钢筋砌体试件略好于配玻纤格栅砌体试件。配玻纤格栅可显著提高墙体的变形能力及抗剪承载力, 延缓墙体开裂。

(3) 无筋砌块墙体的延性及耗能能力较差, 水

平配玻纤格栅墙体的延性系数为无筋砌块墙体的 3.61 倍, 配玻纤格栅与钢筋试件相比, 两种类型墙体的极限位移、滞回曲线、骨架曲线及刚度退化发展趋势基本相似, 耗能指标及延性指标等方面, 配钢筋砌体试件略好于配玻纤格栅砌体试件。在水平灰缝中配置玻纤格栅可以大幅提高墙体的延性。

(4) 采用纤维格栅配置在砌体水平灰缝中, 不仅可以实现薄灰缝砌体提高砌体热工性能, 还可显著改善墙体脆性破坏特征, 提高砌体墙的变形能力及抗震性能, 为砌体结构抗震设计及建筑节能提供了一种良好的方法。

### 参考文献:

- [1] 王伟超, 李壮文. 建筑外墙保温节能技术研究进展[J]. 科技导报, 2013, 31(13): 76—79.  
Wang Weichao, Li Zhuangwen. Progress on energy-saving technology on external wall [J]. Science & Technology Review, 2013, 31(13): 76—79. (in Chinese)
- [2] 刘鑫. 无筋及水平灰缝配筋砌体干燥收缩试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2010.  
Liu Xin. Experimental research on drying shrinkage of unreinforced masonry and joint reinforced masonry[J]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2010. (in Chinese)
- [3] 邓明科, 樊鑫淼, 高晓军, 等. ECC 面层加固受损砖砌体墙抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2015, 32(4): 120—129.  
Deng Mingke, Fan Xinmiao, Gao Xiaojun, et al. Experimental investigation on seismic behavior of damaged brick masonry wall strengthened with ECC splint [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(4): 120—129. (in Chinese)
- [4] 白国良, 浮广明, 权宗刚, 等. 烧结保温空心砌块薄灰缝砌体基本力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(10): 151—158.  
Bai Guoliang, Fu Guangming, Quan Zonggang, et al. Experimental study on basic mechanical properties of fired heat-insulation hollow block thin mortar joint masonry [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(10): 151—158. (in Chinese)
- [5] Ferrotti G, Canestrari F, Pasquini E, et al. Experimental evaluation of the influence of surface coating on fiberglass geogrid performance in asphalt pavements [J]. Geotextiles & Geomembranes, 2012, 34(10): 11—18.
- [6] 张斯, 徐礼华, 杨冬民, 等. 纤维布加固砖砌体墙平面内受力性能有限元模型[J]. 工程力学, 2015, 32(12): 233—242.  
Zhang Si, Xu Lihua, Yang Dongmin, et al. Finite element modelling of FRP-reinforced masonry walls under

- modelling of FRP-reinforced masonry walls under in-plane loadings [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(12): 233—242. (in Chinese)
- [7] Safavizadeh S A, Wargo A, Guddati M, et al. Investigating reflective cracking mechanisms in grid-reinforced asphalt specimens [J]. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2015, 25(7): 29—38.
- [8] Yan C, Liu S, Deng Y. Experimental study on horizontal bearing capacity of cement-soil pile reinforced with fiberglass geogrid [J]. *Geotechnical Special Publication*, 2014, 23(5): 88—97.
- [9] 苑振芳, 刘斌, 苑磊. 砌体结构的耐久性[J]. *建筑结构*, 2011, 25(4): 117—121.  
Yuan Zhenfang, Liu Bin, Yuan Lei. Durability of masonry structures [J]. *Building Structure*, 2011, 25(4): 117—121. (in Chinese)
- [10] 张建伟, 杨兴民, 曹万林, 等. 带斜筋单排配筋低矮剪力墙的抗震性能[J]. *工程力学*, 2016, 33(增刊 1): 125—132.  
Zhang Jianwei, Yang Xingmin, Cao Wanlin, et al. Seismic performance of low-rise shear wall with single layer of web reinforcement and inclined steel bars [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(Suppl 1): 125—132. (in Chinese)
- [11] 沈祥, 沙吾列提·拜开依, 阿力琴·阿布力提甫, 等. 网状 CBF 增强砖砌体轴心受力性能试验研究[J]. *工程力学*, 2013, 30(增刊 1): 109—114.  
Shen Xiang, Sawule Bekey, Aliqin Abulitipu, et al. Experiment research on CBF mesh reinforced brick masonry under axial compressive loading [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(Suppl 1): 109—114. (in Chinese)
- [12] 吴敏莉. 夏热冬冷地区居住建筑墙体保温节能特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.  
Wu Minli. Energy saving effect of wall insulation of residential buildings in hot summer and cold winter climate zones [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [13] GB 50003—2011, 砌体结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
GB 5003—2011, Code for design of masonry structures [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [14] 赵成文, 张亮, 高连玉, 等. A 类蒸压加气混凝土砌块墙体抗震性能试验[J]. *沈阳建筑大学学报*, 2009, 25(3): 426—432.  
Zhao Chenwen, Zhang Liang, Gao Lianyu, et al. Experimental study on seismic performance of autoclaved aerated concrete block bearing walls [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University*, 2009, 25(3): 426—432. (in Chinese)
- [15] 苏启旺, 赵世春, 叶列平. 砌体结构抗震评估研究[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(1): 111—116.  
Su Qiwang, Zhao Shichun, Ye Lieping. Research on seismic evaluation of masonry structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(1): 111—116. (in Chinese)

(上接第 125 页)

- [9] Wood R L, Hutchinson T C, Hoehler M S, et al. Experimental characterization of trapeze assemblies supporting suspended nonstructural systems [C]// Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Anchorage, Alaska, 2014.
- [10] Malhotra P K, Senseny P E, Braga A C, et al. Testing sprinkler-pipe seismic-brace components [J]. *Earthquake Spectra*, 2003, 19(1): 87—109.
- [11] Approval Standard for Seismic Sway Braces for Pipe, Tubing and Conduit [S]. FM Approvals LLC, Class Number 1950, 2013.
- [12] CJ/T 476—2015, 建筑机电设备抗震支架通用技术条件[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.  
CJ/T 476—2015, Specification of seismic supports for mechanical and electrical components [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)
- [13] GB 50981—2014, 建筑机电工程抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.  
GB 50981—2014, Code for seismic design of mechanical and electrical equipment [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [14] Porter K, Kennedy R, Bachman R. Creating fragility functions for performance-based earthquake engineering [J]. *Earthquake Spectra*, 2007, 23(2): 471—489.
- [15] Porter K, Kennedy R, Bachman R. Developing fragility functions for building components for ATC-58 [R]. A Report to ATC-58. Applied Technology Council, Redwood City, CA, US, 2006.
- [16] FEMA 461, Interim protocols for determining seismic performance characteristics of structural and nonstructural components through laboratory testing [S]. Washington, D.C. Federal Emergency Management Agency, 2007.