

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.04.013



# RC 加气混凝土砌块组合墙加固框架 抗震性能试验研究

郭猛<sup>1</sup>, 王双娇<sup>2</sup>, 袁泉<sup>2</sup>, 刘志元<sup>3</sup>, 黄炜<sup>3</sup>

(1. 中国建筑科学研究院 结构所, 北京 100013; 2. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044;  
3. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055)

**摘要:** RC 加气混凝土砌块组合墙(简称组合墙)是由混凝土梁柱网格与加气混凝土砌块组合形成的一种轻型网格式抗震墙,可用于框架结构的抗震加固。笔者进行了 1/2 比例空框架试件、组合墙试件和组合墙加固框架试件的低周反复荷载试验,分析了各试件的主要破坏过程,对比了组合墙加固框架前后试件承载能力、刚度等抗震性能变化。试验结果及分析表明:组合墙加固框架后承载力、抗侧刚度有较大幅度提高,中大震及大震阶段其承载力、等效刚度约为空框架和组合墙单独受力之和的 0.9 倍,两者具有良好的协同工作性能;加固试件的破坏过程基本上遵循填充砌块-混凝土框格-外框架的破坏顺序,能够发挥组合墙多重抗震防线的特点,采用 RC 加气混凝土砌块组合墙加固框架是一种较为经济实用的加固方法。

**关键词:** 框架结构; RC 加气混凝土砌块组合墙; 加固; 抗震性能; 试验

**中图分类号:** TU375; TU398 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2016)04-0078-08

## Seismic performance experimental analysis of the frame strengthened by composite walls of RC-autoclaved aerated concrete blocks

Guo Meng<sup>1</sup>, Wang Shuangjiao<sup>2</sup>, Yuan Quan<sup>2</sup>, Liu Zhiyuan<sup>3</sup>, Huang Wei<sup>3</sup>

(1. Structure Institute, China Academy of Building Research, Beijing 100013, P. R. China;  
2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, P. R. China  
3. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

**Abstract:** Composite walls of RC-autoclaved aerated concrete blocks (CWR) consisting of concrete beam-column grid and aerated concrete blocks was a new type of shear wall, which could be used to strengthen the seismic performance of frame structure. Cyclic reversed loading tests were conducted on frame specimen without CWR, CWR specimens and CWR with outer frame specimens. All the specimens were in the scale of 1:2. The main failure process of the specimens were analyzed. The seismic performances of the frame such as bearing capacity, stiffness and so on before and after being strengthened by CWR were studied. Test results showed that the bearing capacity and lateral stiffness of the strengthened frame structure were

**收稿日期:** 2015-12-10

**基金项目:** 国家自然科学基金(51308522); 中央高校基本科研业务费专项资金(2015JBM065)

**作者简介:** 郭猛(1982-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事建筑结构抗震研究, (E-mail) guomeng673@163.com.

**Received:** 2016-01-10

**Foundation item:** National Natural Science Foundation (No. 51308522); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2015JBM065)

**Author brief:** Guo Meng (1982-), PhD, associate research fellow, main research interest: aseismic structures, (E-mail) guomeng673@163.com.

increased greatly and about 0.9 times as large as the sum of outer frame structure and CWR that possessed good cooperative work performance. The damage process of the strengthened specimens basically followed the sequence of filling block, reinforced concrete frames and outer frame, and thus could bring the Multi-defense seismic characteristics of the CWR into full play, which indicated that strengthening frame structure with CWR was economic and convenient.

**Keywords:** frame structure; composite walls of RC-autoclaved aerated concrete blocks; strengthening; seismic performance; experimental

框架结构广泛应用于中国多高层房屋建筑,近年来房屋建筑震害调研表明,框架结构震害相对较轻,大部分震后受损的框架结构通过抗震加固能够满足继续使用要求<sup>[1-3]</sup>。根据2010版建筑抗震设计规范<sup>[4]</sup>,中国四川、陕西等地区部分城镇的抗震设防烈度进行了调整,同时,2008版建筑工程抗震设防分类标准<sup>[5]</sup>将二级医院医疗用房、应急避难场所建筑、幼儿园及中小学建筑等的设防标准由标准设防类(丙类)提高到重点设防类(乙类),以上调整导致既有框架结构与新建结构相比在抗震能力方面存在着一定差距。因此,研究震后受损框架结构和因设防烈度调整或设防分类标准调整而导致抗震能力不满足要求的框架结构的整体抗震加固技术,已成为当前结构工程领域的一个重要研究内容。

目前,框架结构加固方法主要有构件抗震加固、增设抗震墙整体加固、消能减震加固以及隔震加固等加固方案。构件抗震加固技术发展成熟,方法丰富,适用于框架的局部加固,能够显著恢复或提高构件的抗震性能,但用于大面积整体加固时其加固工程量较大。增设混凝土墙或粘土砖墙方案能有效提高框架结构的承载能力,不利因素在于增加了结构的质量和刚度,结构所受地震作用相应增大,同时,在中高层结构中新旧基础沉降差控制难度增大。采用消能减震技术或隔震技术进行框架结构加固,具有较好的减震加固效果,但其加固造价高,施工技术相对复杂。

RC 加气混凝土砌块组合墙(简称组合墙)是由混凝土梁柱网格与加气混凝土砌块组合形成的一种轻型抗震墙,属于密肋复合墙的一种<sup>[6-7]</sup>。基于现阶段对框架结构整体抗震加固的需求,结合 RC 加气混凝土砌块组合墙受力特点及已有研究工作基础<sup>[8-10]</sup>,提出一种框架结构的整体加固方法——RC 加气混凝土砌块组合墙加固框架结构,适用于中国城市、乡镇地区量大面广的普通框架结构的抗震加固。

为研究 RC 加气混凝土砌块组合墙加固框架的抗震性能,探讨该加固方法的可行性,本文通过对空框架、组合墙板、组合墙加固框架模型的低周反复荷载试验,对比研究组合墙加固框架的试件破坏过程以及加固前后试件承载力、刚度的变化情况,为组合墙加固框架结构设计方法提供依据。

## 1 组合墙加固框架试验概况

### 1.1 试件设计

试验共设计了3片框架及墙体试件,框架试件以7度地区5~6层常规开间及办公用途的框架结构底层框架为原型,按1/2比例缩尺设计。加固所用的组合墙参考已建成多层密肋复合墙结构的典型墙板截面尺寸及配筋,按1/2比例缩尺设计。试件编号分别为FW-1(空框架)、FW-2(RC 加气混凝土砌块组合墙)、FW-4(组合墙加固框架),其中,空框架与组合墙试件主要用于对比分析。

FW-1与FW-4框架部分的截面尺寸、配筋相同,框架柱截面尺寸300 mm×300 mm,配筋按照构件强剪弱弯进行配筋设计;梁柱节点区箍筋同框架柱加密区箍筋;顶部框架梁兼做加载梁,梁截面宽度同框架柱,纵筋通长配置;框架柱、框架梁均设置箍筋加密区。FW-4加固框架所用的组合墙与FW-2组合墙截面尺寸、配筋相同,组合墙厚度100 mm。试件详细尺寸及配筋见图1。加固时,组合墙的肋梁肋柱与框架梁柱采用钢筋等代方式植筋连接,每个节点植筋2A8,锚入框架梁柱160 mm,预留端200 mm;组合墙砌块与框架梁底面、底梁表面、框架柱侧面之间均设置砂浆层,砌块砌筑方式同普通砌块填充墙。

梁柱混凝土设计强度等级为C30,填充砌块为蒸压加气混凝土砌块,强度设计值3.0 MPa,容重为700 kg/m<sup>3</sup>。混凝土、钢筋及加气混凝土砌块的材料力学性能实测值见表1。

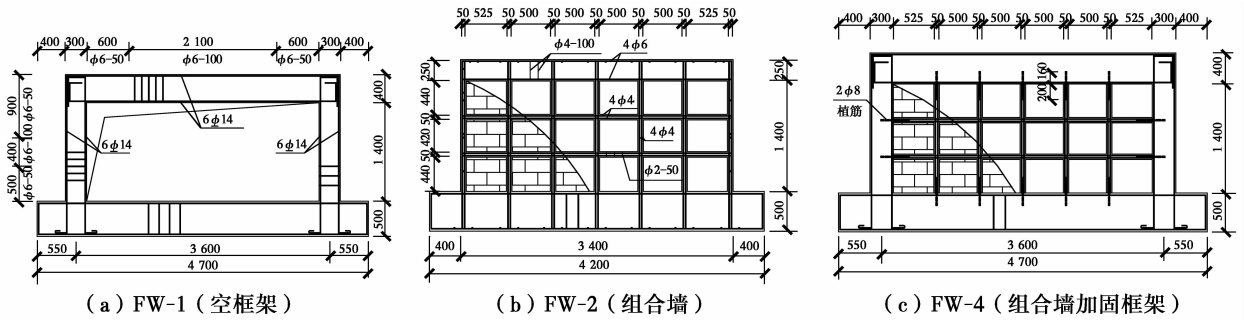


图 1 试件截面及配筋图

Fig. 1 Section size and steel bar details of specimens

表 1 试件材料力学性能

Table 1 Mechanical properties of specimens

材料类型	屈服强度/ MPa	极限抗压 强度/MPa	弹性模量/ $10^5$ MPa
A4 钢筋	620	752	2.2
A6 钢筋	560	650	2.1
A8 钢筋	319	517	2.1
B14 钢筋	363	557	2.1
C30 混凝土 (框架)		35.6	0.315
C30 混凝土 (肋格)		41.4	0.329
加气砌块		2.9	0.15

## 1.2 加载装置及测点布置

试件中框架柱竖向荷载按 5~6 层框架结构的底层柱荷载设计,每根框架柱顶面施加 300 kN 竖向荷载,总计 600 kN,保持恒定,然后进行水平反复加载。对于试件 FW-2,由于实际框架结构加固时,组合墙基本上不承担竖向荷载,本次试验中仅施加 100 kN 的竖向荷载,利用分配梁按 4 等分点施加在试件顶梁上。试验加载装置如图 2 所示。

试件屈服前采用荷载控制,每级递增 20~30 kN,循环一次;当加载曲线表现为荷载上升不大而位移增加较大时,视为试件进入屈服阶段,屈服后采用位移控制,每级增加 3~5 mm,循环 2 次,直至试件承载力下降至极限荷载的 85% 以下或试件层间位移角超过 1/50 时停止加载。试件 FW-2 和 FW-4 于试验结束后将采用置换加气混凝土砌块法进行加固试验,因此,在试件层间位移角达到或接近 1/50 且承载力下降至极限荷载的 85% 以下时即停止加载,认为试件经历了大震作用阶段。

试验测试内容主要包括荷载、水平位移以及外

框架柱、肋梁肋柱的钢筋应变等。

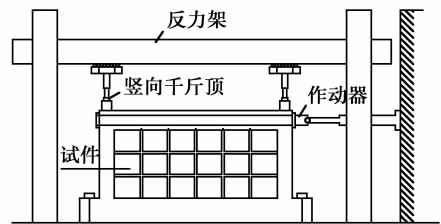


图 2 试件加载装置图

Fig. 2 Specimen loading device

## 2 试件主要破坏过程

### 2.1 空框架试件 FW-1

水平荷载加至 80 kN 时,在框架柱底首先出现水平裂缝。加载至 120 kN 时,在框架受拉一侧上部出现水平长裂缝,柱底其他位置产生新细小裂缝,反向加载又趋于闭合。

加载至 160 kN 时,上部梁柱交界处产生数条约 45°短斜裂缝,继续加载原有裂缝继续延伸变长,且在附近产生新裂缝。加载至 240 kN 时,框架柱上部和下部一定范围内陆续产生多条新裂缝,随着荷载的增加裂缝逐渐变密。

当荷载达到 260 kN,从滞回曲线变化趋势判断试件进入屈服状态,此后按位移控制加载。随着位移的增加,裂缝宽度增大,但几乎不产生新的裂缝,加载过程中伴随有声响,柱底部开始有混凝土压碎脱落的趋势。水平位移加载至 33 mm 时,达到极限荷载 297.7 kN。

水平位移加载至 48 mm,柱底部混凝土竖向开裂严重,上部梁柱交界处混凝土压碎脱落较多。位移增加到 63 mm 时,对应荷载为 244.8 kN,较极限荷载下降了 17.7%,停止加载,试件最终破坏情

况见图3~4。



图3 FW-1柱顶、柱底破坏情况

Fig. 3 Damage of the top and bottom of column



图4 FW-1破坏状况

Fig. 4 Damage condition of specimen FW-1

## 2.2 组合墙试件 FW-2

水平荷载加至 60 kN 时,组合墙的下部砌块首先出现少许微裂缝。加载至 80 kN 时,砌块上裂缝数量增多且范围分布较广。

加载至 100 kN 时,从滞回曲线变化趋势判断试件进入屈服状态,此后按位移控制加载。砌块表面裂缝逐渐密集,灰缝砂浆开始脱落。

水平位移加载至 14 mm 时,砌块表面脱落点增多,墙体中部肋梁肋柱上出现大量裂缝。水平位移增至 20 mm 时,砌块与肋梁肋柱接触面出现滑移并呈增大趋势,中间肋格内砌块压碎比较严重,边肋柱的柱底水平通缝宽度达 3 mm。

继续加载至 23 mm,砌块脱落范围增大,水平荷载降至 99 kN,较极限荷载下降 16.3%,层间位移角达到 1/65。综合墙体破坏状态、水平荷载下降程度及相应的层间位移角,估计墙体破坏接近大震破坏状态时,停止加载。试件最终破坏状况见图 5。



图5 FW-2破坏状况

Fig. 5 Damage condition of specimen FW-2

## 2.3 组合墙加固框架试件 FW-4

水平荷载加至 90 kN 时,在靠近框架柱中部砌块上首先出现两条斜裂缝,框架柱下部距底梁 20 cm 以及梁柱节点处附近产生多条短裂缝;加载至 120 kN 时,组合墙中下层框格中产生少许斜裂缝。

当荷载达到 240 kN,出现砂浆表层脱落,框格中主要产生沿对角线方向交叉裂缝,框架柱上部出现水平通缝。

水平荷载加载至 360 kN,从滞回曲线变化趋势判断试件进入屈服状态,此后按位移控制加载。水平位移加载至 25 mm 时,框架柱上部预埋钢板边缘处混凝土突起,梁柱节点处裂缝宽度达 3 mm,砌块上裂缝宽度最大达 5~6 mm。

水平位移加至 35 mm,砌块脱落严重,框架柱上部有混凝土压碎脱落,柱底混凝土出现多条竖向裂缝,此时位移角达到 1/50,停止加载,试验结束。试件最终破坏情况如图 6。



图6 FW-4破坏状况

Fig. 6 Damage condition of specimen FW-4

根据上述各试件破坏过程及破坏特点的对比分析可知:

1)组合墙加固框架试件的破坏过程基本上遵循填充砌块-混凝土框格-外框架的破坏顺序,能够发挥组合墙多重抗震防线的特点。

2)框架(FW-1)和组合墙加固框架(FW-4)在水平荷载作用下的整体变形均为剪切型,两者框架柱的破坏形式类似,均为压弯破坏。

3)加固试件 FW-4 内部组合墙的破坏现象与组合墙试件 FW-2 的宏观破坏特点有着一定的差异。组合墙板 FW-2 单独受力时,主要破坏区域集中在框格中层及底层,而加固试件 FW-4 内部组合墙的破坏区域则基本均匀地分散在框格的各层。

分析破坏差异的原因在于,组合墙单独承受水平荷载时,墙板的底层框格、中层框格水平变形较上层框格大;而对于组合墙加固框架 FW-4,外框架的

整体剪切变形将强制组合墙的顶层框格、中层框格及底层框格协同变形,且变形量接近,导致两种受力状态下组合墙的宏观破坏特点存在一定差异。外框架对内部组合墙的强制整体剪切变形作用有助于组合墙更充分发挥其抗震性能。

### 3 组合墙加固框架试验结果分析

#### 3.1 钢筋应变

组合墙加固框架 FW-4 在构成上包括外框架及内部组合墙板,其钢筋应变布置见图 7,空框架 FW-1 的框架柱钢筋应变布置与 FW-4 相同,组合墙 FW-2 的肋梁肋柱钢筋应变布置除了两端肋柱应变布置与 FW-4 略有不同外,其他肋梁肋柱应变布置均相同。

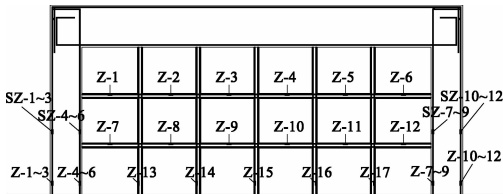


图 7 钢筋应变布置图

Fig. 7 Layout of the steel strains

相同位置的框架柱、肋梁钢筋的典型应变曲线对比见图 8,对于 3 片试件钢筋应变数据反映的总体规律,简要分析如下:

1) 框架柱钢筋应变:对于 FW-1 和 FW-4 的外框架,两片试件的框架柱钢筋应变变化规律相似,即在不同加载方向下交替承受拉力和压力,与 FW-4 试验现象中观察的框架柱破坏特点一致。

2) 组合墙钢筋应变:对于 FW-2 和 FW-4 的内部组合墙,肋梁及肋柱钢筋应变变化规律相似,其中,肋梁以受拉机制承担水平荷载,肋柱直接承担水平荷载的程度较小,主要通过和肋梁形成框格及与框格内部加气混凝土砌块形成斜压杆机制承担水平荷载。

由以上对钢筋应变的分析可见,一方面,组合墙加固框架后,无论框架的受力机制还是组合墙的受力机制,与两者各自单独承受荷载时的受力机制在规律性方面是基本相同的。另一方面,无论框架柱钢筋应变还是框格钢筋应变,相同荷载下 FW-4 的应变数据相对小一些,反映了 FW-4 中框架与组合墙协同受力,共同分担外荷载的受力特点。

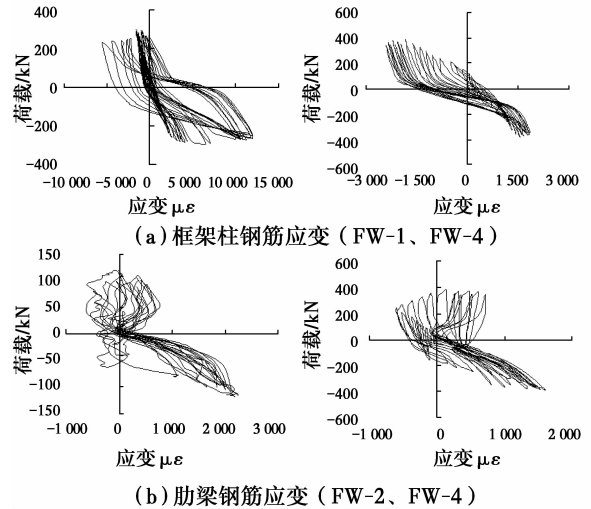


图 8 荷载-钢筋应变曲线

Fig. 8 Load-strain curves of steel bars

#### 3.2 承载力分析

取各试件的水平承载力为两个加载方向承载力绝对值的平均值,屈服荷载为按通用屈服弯矩法确定的屈服位移所对应的荷载;极限荷载为试验过程中试件承受的最大荷载,破坏荷载取峰值荷载的 85%,试验结束而荷载未下降到极限荷载的 85% 时,取试验结束时的荷载为破坏荷载。各试件不同阶段的荷载位移值列于表 2。

表 2 试件荷载、位移实测值

Table 2 Experimental results of the specimens

试件编号	开裂	屈服	极限	破坏	$\theta$	
FW-1	荷载	105.4	237.3	297.7	253.0	1/27
	位移	3.5	12.3	33.0	59.1	
FW-2	荷载	41.2	96.7	118.2	100.5	1/67
	位移	1.2	5.7	12.5	22.2	
FW-4	荷载	148.6	327.1	388.1	368.7	1/46
	位移	4.4	14.1	21.7	35.0	

注:表中数值是正反两个方向的平均值,荷载的单位是 kN,位移的单位是 mm; $\theta$  为层间位移角。

由表 2 可知:

1) 组合墙加固框架结构试件 FW-4 的开裂荷载、屈服荷载、极限荷载和破坏荷载分别比空框架试件 FW-1 提高了 41.0%、37.8%、30.4%、45.7%。2 个试件外框架尺寸和配筋相同,表明组合墙加固框架后承载力有较大幅度提高。

2) 对于极限承载力,组合墙加固框架试件 FW-4 的极限荷载为 FW-1 与 FW-2 试件极限荷载直接叠

加结果的93.3%,加固试件极限承载力并不是FW-1和FW-2的直接叠加,而略小于空框架与组合墙单独受力时对应荷载之和。

为了进一步了解组合墙加固框架后承载力变化情况以及两者之间的协同工作性能,以层间位移角近似反映试件所经受地震作用大小,比较不同层间位移角下试件承载力情况。现行建筑抗震设计规范引入了基于性能的抗震设计思想,综合国内外研究情况<sup>[11-13]</sup>,可将结构性能水准划分为5个等级,分别为完好、轻微损坏、轻~中等破坏、中等破坏、严重破坏,各性能水准下框架结构的层间位移角指标本文取为1/550、1/300、1/200、1/100、1/50,分别对应于结构承受小震、小中震、中震、中大震、大震作用。

不同位移角对应的荷载大小具体数据见表3,分析如下:

表3 不同位移角对应的荷载大小

Table 3 Capacity results at different displacement angle

试件 编号	≤1/550 小震	1/300 小中震	1/200 中震	1/100 中大震	≥1/50 大震
FW-1	90.5	148.7	191.5	261.4	293.6
FW-2	62.3	89.7	105.1	114.5	100.5
FW-4	108.4	191.6	246.9	346.8	371.7
$\alpha_1$	1.20	1.29	1.29	1.33	1.27
$\alpha_2$	0.71	0.80	0.83	0.92	0.94
$\alpha_3/\%$	57.5	46.8	42.6	33.0	27.0

注:试件FW-2试验结束时对应的层间位移角为1/65,暂取试验结束时的荷载为层间位移角1/50时对应的荷载。表中: $\alpha_1 = F_{FW-4}/F_{FW-1}$ , $\alpha_2 = F_{FW-4}/(F_{FW-1}+F_{FW-2})$ , $\alpha_3 = F_{FW-2}/F_{FW-4}$ 。

1)将 $\alpha_2$ 定义为组合墙加固框架后两者的“协同工作系数”。根据表中数据,小震作用时FW-4承载力仅为FW-1+FW-2的0.7倍,表明较小的层间位移角下,组合墙与框架之间的协同工作性能略差;中震作用时,FW-4承载力约为FW-1+FW-2承载力的0.8倍;中大震及大震时,FW-4承载力约为FW-1+FW-2承载力的0.9倍,表明组合墙加固框架在较大地震作用下,能较充分地发挥两者各自承载力,协同工作性能较好。

2)将 $\alpha_3$ 定义为组合墙的“名义剪力分担率”,即组合墙在加固框架后分担的地震作用比例。根据表中数据,小震作用阶段组合墙的名义剪力分担率最大,占比为57.5%,即小震时组合墙分担超过50%的地震作用;随着层间位移角增加,组合墙损伤程度

超前于外框架,组合墙的名义剪力分担率逐渐减小,但在大震作用阶段仍达到30%以上。

由上述分析可见,采用组合墙加固框架结构在提高承载力方面是有效的加固方法。对于实际框架结构,如果框架发生的是柱底破坏及框架梁端部破坏,通常来说,框架自身的承载力要小于框架柱底、柱顶破坏对应的承载力,在加固所用的组合墙不变的情况下,其加固效果理论上会更好一些。

### 3.3 滞回曲线

滞回曲线是反复荷载下构件的荷载-变形关系曲线,是评定构件抗震性能的重要依据。三榀试件顶点水平荷载与位移的滞回曲线如图9所示。

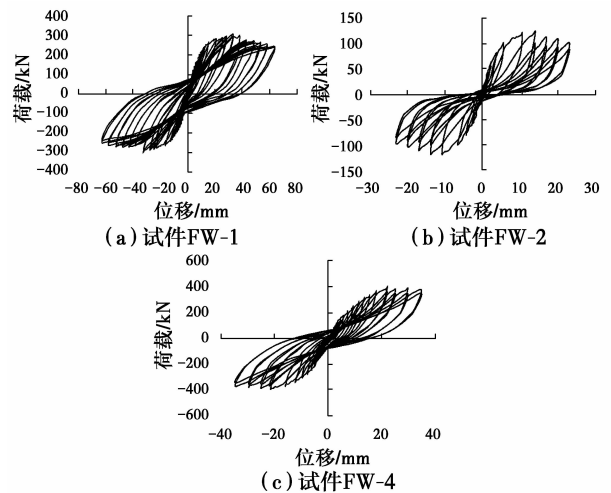


图9 试件滞回曲线

Fig. 9 Hysteresis curve of specimens

弹塑性阶段,试件FW-1滞回环呈梭形,荷载零点附近出现捏拢现象;试件FW-2由于砌块大量开裂,反向加载时砌块有个闭合过程,荷载基本不变而变形持续发展,剪切滑移变形比较明显,滞回曲线向反S形发展;试件FW-4的滞回环形状总体表现为梭形,但在加载后期也受到组合墙变形规律的影响而带有一定的反S形特征。

### 3.4 变形分析

试验的试件FW-2和FW-4于试验结束后将采用置换加气混凝土砌块法进行加固试验,在试件层间位移角达到或接近1/50且承载力下降至极限荷载的85%以下时即停止加载,3片试件最大层间位移角见表3。

结合承载力试验数据可知,试件FW-4停止加载时的最大层间位移角为1/46,已满足了现行规范对结构抗震加固的延性要求,但此时承载力仅仅下

降 5%，下降幅度较小。

另一方面，从 FW-4 滞回曲线变化趋势可见，承载力达到极限荷载后下降比较缓慢，若继续加载至荷载下降为极限荷载 85% 时，FW-4 的变形可继续增大，因此，组合墙加固框架具有与普通框架结构接近的变形能力。

### 3.5 等效刚度分析

3 片试件达到开裂荷载、屈服荷载及极限荷载时对应的位移和承载力不等，为了便于比较试件刚度变化情况，与承载力分析思路一致，采用相同层间位移角对应的等效抗侧刚度进行对比分析。

等效抗侧刚度取往复荷载作用下正、反向荷载的绝对值之和除以相应正、反向位移绝对值之和，各试件在不同层间位移角下的等效刚度计算结果见表 4，分析如下：

表 4 不同位移角下等效抗侧刚度值

Table 4 Stiffness results at different displacement angle

试件 编号	$\leq 1/550$ 小震	1/300 小中震	1/200 中震	1/100 中大震	$\geq 1/50$ 大震
FW-1	31.4	27.9	24.1	16.4	9.2
FW-2	23.7	18.3	14.8	6.9	3.7
FW-4	37.5	34.6	30.5	21.9	11.2
$\beta_1$	1.19	1.24	1.27	1.34	1.22
$\beta_2$	0.68	0.75	0.78	0.94	0.87

注： $\beta_1 = K_{FW-4}/K_{FW-1}$ ， $\beta_2 = F_{FW-4}/(F_{FW-1} + F_{FW-2})$

1) 组合墙加固框架的等效抗侧刚度较空框架提高了 1.2~1.3 倍，反映了组合墙对框架加固后的刚度贡献。从数据上看，组合墙加固框架的等效抗侧刚度提高程度和承载力提高程度(表 3)基本一致。

2) 将 FW-4/(FW-1+FW-2) 定义为组合墙加固框架后两者在等效抗侧刚度方面的“协同工作系数”。根据表中数据，从小震作用到中大震作用阶段，FW-4 分别约为 FW-1+FW-2 等效抗侧刚度的 0.7 倍、0.8 倍及 0.9 倍，表明组合墙加固框架在较大地震作用下，两者协同工作性能较好。

3) 刚度退化速度方面，结合 FW-1、FW-4 的滞回曲线分析，组合墙加固框架的刚度退化速度较框架单独受力时略缓慢，有利于改善中大地震作用下结构的抗震性能。

### 3.6 耗能能力分析

耗能能力反映了结构或构件在地震作用下非弹性变形、吸收能量的能力，本文采用滞回环面积法对

试件耗能能力进行评价。各片试件滞回环面积随位移变化的关系曲线见图 10。

受力初期，试件 FW-2 滞回环面积在随着荷载增加而增加。中震阶段之后，由于组合墙的加气混凝土砌块本身属于脆性材料，随着荷载增大组合墙内部砌块先期破坏后相继退出工作；另一方面，组合墙单独受力时其破坏区域集中在墙体竖向中部和下部，因此，FW-2 的滞回环面积及耗能能力在中震阶段之后处于一个较缓慢增长的过程。

试件 FW-1、FW-4 滞回环面积总体随着荷载增加逐渐增大，耗能能力逐渐增强。以位移也即层间位移角为参数分析，小震阶段组合墙加固框架耗能能力为空框架的 1.3 倍，小中震阶段即达到 1.8 倍，继续加载两者的耗能比值呈现下降趋势，逐渐下降至 1.3 倍。由图 10 曲线关系直观可见，受组合墙耗能变化特点的影响，试件 FW-4 耗能能力与 FW-1 的差值随荷载缓慢增加。

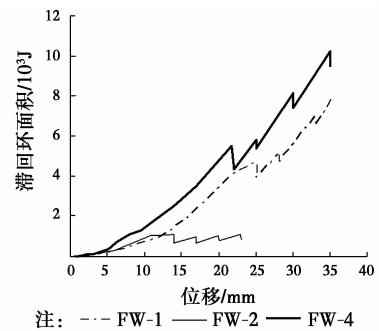


图 10 滞回环面积 (kN·mm) 对比

Fig. 10 Comparison of the area of hysteresis loop

## 4 结论

1) 组合墙加固框架中外框架的破坏形态与空框架单独受力时破坏形态类似，本文试验中，主要表现在柱脚和梁柱节点处发生破坏。受外框架的整体剪切变形约束作用，加固试件中组合墙破坏性态与组合墙单独受力时有所不同，前者破坏程度在整个墙体分布更为均匀，有利于其充分发挥自身的抗震能力。

2) 各试件在小震作用到大震作用下的承载力、等效抗侧刚度对比分析表明，组合墙加固框架后承载力、抗侧刚度有较大幅度提高，较大地震作用阶段组合墙与框架具有良好的协同工作性能。本文试验中，中大震及大震阶段组合墙加固框架的承载力、等效刚度约为两者单独受力之和的 0.9 倍，能较充分

地发挥各自性能。刚度退化速度方面,组合墙加固框架的刚度退化速度较框架单独受力时略缓慢,亦有利于改善中大地震作用下结构的抗震性能。

3)RC加气混凝土砌块组合墙加固框架试验表明,组合墙加固框架能够提高框架整体的承载力、刚度及耗能能力,是一种简便易行、效果可观的加固方法。

#### 参考文献:

- [1] 清华大学土木工程组,西南交通大学土木工程组,北京交通大学土木工程组.汶川地震建筑震害分析[J].建筑结构学报,2008,29(4):1-9.  
Tsinghua University Civil Structure Group, Southwest Jiaotong University Civil Structure Groups, Beijing Jiaotong University Civil Structure Group. Analysis of earthquake damage on buildings in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29 (4): 1-9. (in Chinese)
- [2] 徐有邻.汶川地震震害调查及对建筑结构安全的反思[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.  
XU Y L. Damage investigation of Wenchuan earthquake and reconsideration of building structure safety [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)
- [3] LI X J, ZHOU Z H, YU H Y, et al. Strong motion observations and recordings from the great Wenchuan earthquake [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 7(3): 235-246.
- [4] 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)
- [5] 建筑工程抗震设防分类标准:GB 50223—2008[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.  
Standard for classification of seismic protection of building constructions: GB 50223—2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)
- [6] LIU P, YAO Q F. Dynamic reliability of structures: the example of multi-grid composite walls [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2010, 36(4): 463-479.
- [7] 黄炜,王国铨,姚谦峰,等.框支密肋壁板结构托梁内力计算[J].土木建筑与环境工程,2010,32(1):66-71.  
HUANG W, WANG G Q, YAO Q F, et al. Calculation of the internal force for the joist of frame-supported multi-ribbed slab structure [J]. Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32 (1): 66-71. (in Chinese)
- [8] LIU P, GUO M. An experimental study of multi-grid composite walls [J]. Advances in Structural Engineering, 2012, 15(3): 495-507.
- [9] JIA Y J, YUAN Q. Research on shear resistant capacity and reliability of multi-ribbed composite wall in high-rise building [C]//International Symposium on Environmental Ecology and Technology of Concrete, 2005: 669-675.
- [10] 郭猛,袁泉,常鹏,等.基于水平薄弱层破坏准则的密肋复合墙受剪承载力计算[J].建筑结构学报,2012,33(9):148-153.  
GUO M, YUAN Q, CHANG P, et al. Calculation method for shear bearing capacity of multi-grid composite wall based on horizontal weak-layer failure criteria [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33 (9): 148-153. (in Chinese)
- [11] ELNASHAI A S. Advanced inelastic static(pushover) analysis for earthquake applications [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2001, 12(1): 51-69.
- [12] 黄悠越.基于构件性能的RC框架结构层间位移角性能指标限值研究[D].广州:华南理工大学,2012.  
HUANG Y Y. Research on the story drift limits of RC frame structures based on the components performance [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [13] 程斌,薛伟辰.基于性能的框架结构抗震设计研究[J].地震工程与工程振动,2003,23(4):50-55.  
CHENG B, XUE W C. Studies on performance-based seismic design of frame structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23 (4): 50-55. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)