

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.01.006

# HPFL 加固不同受力形式下短肢剪力墙的抗震性能

孙雪阳, 蒋隆敏, 谈俊宇, 易翔

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 对4片1:2缩尺比例的L形截面RC短肢剪力墙进行伪静力试验研究与ANSYS有限元模拟分析, 研究HPFL加固一次受力、二次受力、二次受力且有震损3种受力形式下RC短肢剪力墙的抗震性能。先对各试件试验结果进行比较分析, 研究不同受力形式下加固效果的异同点及其产生原因, 再将试验结果与数值模拟结果进行比较分析。研究表明: HPFL加固的不同受力形式RC短肢剪力墙的抗震承载力、延性、耗能能力都得到了明显改善, 且一次受力加固墙的改善效果最明显, 二次受力、二次受力且有震损的加固墙的改善效果依次减弱, 这是由于加固层应力、应变滞后原构件的程度依次增大所致, 即是由加固层强度的利用率依次降低导致的。

**关键词:** HPFL加固; RC短肢剪力墙; 受力形式; 抗震性能

**中图分类号:** TU398.49

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2018)01-0029-07

## An Experimental Research of Seismic Performance of Short-Leg Shear Walls Strengthened with HPFL Under Different Stresses

SUN Xueyang, JIANG Longmin, TAN Junyu, YI Xiang

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** PA pseudo static test, as well as an ANSYS finite element simulation analysis, has been carried out of four RC short leg shear walls on 1:2 scale ratio, followed by a study of the aseismic performance of the RC short leg shear walls under three loading forms including HPFL reinforcement with the primary loading, secondary loading, and secondary loading with the earthquake damage. First, a comparison and an analysis have been made of the test results of each specimen, followed by a study of the similarities and differences of reinforcement effects under different loading modes, as well as their causes. Then a comparison has been made between the test results and numerical simulation results. The results show that the bearing capacity, ductility and energy dissipation capacity have been significantly improved of the HPFL reinforcement under different seismic forces form RC short shear walls, with an obvious improved effect for the reinforcement walls, and a weakened tendency for the secondary stress with an earthquake effect for the reinforcement walls, due to the increase of the degree of stress and strain lag in the reinforcement, which is caused by the reduction of the utilization ratio of the strength of the reinforced layer in turn.

**Keywords:** high performance ferrocement laminate reinforcement; RC short shear wall; force form; seismic performance

收稿日期: 2017-10-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51741804), 湖南省自然科学基金株洲联合基金资助项目(2016JJ5037), 湖南省大学生研究性学习与创新性实验计划基金资助项目(2016-982)

作者简介: 孙雪阳(1991-), 男, 河南周口人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为新型材料及其在结构加固中的应用, E-mail: 524722042@qq.com

## 0 引言

短肢剪力墙,是指各肢横截面高度与厚度之比的最大值大于4但不大于8的剪力墙,是一种兼具框架结构和剪力墙结构优点的新型结构体系,在多高层体系中已经得到了大量应用。但是可能因设计不当、施工质量低劣、使用改造不当、各种灾害作用、使用环境的腐蚀、设计标准或使用要求提高、施工和使用过程中需要在墙上安装管线而开设洞口或在地震作用下造成墙体的提前损伤等因素,导致短肢剪力墙的结构性能不足。

高性能水泥复合砂浆钢筋网 (high performance ferrocement laminate, HPFL) 加固法,是一种用钢筋网增强的高性能水泥复合砂浆薄层加固结构方法,其加固层基相和界面剂均为水泥基的无机高性能复合材料。高性能水泥复合砂浆钢筋网加固法具有加固效果显著,易于施工,工程造价低廉,对高温不敏感,耐久、抗老化,与原构件混凝土的相容性和协调性能较好,不明显增大构件截面积,环保性能好等优势<sup>[1]</sup>。因此,研究采用HPFL加固短肢剪力墙的抗震性能具有重要意义<sup>[2-3]</sup>。

根据加固时原结构受力形式的不同,高性能水泥复合砂浆钢筋网加固法可分为一次受力加固法和二次受力加固法。其中,一次受力加固法,是指加固时钢筋混凝土结构完全没有承受荷载作用;而二次受力加固法,是指在不完全卸除荷载情况下对钢筋混凝土结构进行加固的方法。本文拟对一次受力、二次受力和二次受力且有震损3种不同受力形式的短肢剪力墙试验模型进行加固,再进行伪静力试验与数值模拟,将未加固对比构件及各加固构件的抗震性能进行比较与分析,以期地震之后的建筑加固和实际工程情况的加固提供参考。

## 1 试验设计

### 1.1 试验模型

本试验研究中,选用4片1:2缩尺比例的L形截面开洞钢筋混凝土 (reinforced concrete, RC) 短肢剪力墙模型,对其进行低周反复荷载作用下的试验,且为了模拟短肢剪力墙上下端的实际约束情况设置了顶梁和底梁。4片L形短肢剪力墙构件分别编号如下:SW0,为未加固的对比构件;SW1,为一次受力加固构件,即完全卸除轴力加固的构件;SW2,为二次受力加固构件,即不卸除轴力加固的构件;SW3,为二次受力下且有震损的加固构件,即不卸除轴力并且原构件在水平低周荷载作用下腹板底部纵筋已经

屈服再进行加固的构件。各试件试验时的轴压比均取为0.2。试件的尺寸及配筋情况如图1所示。

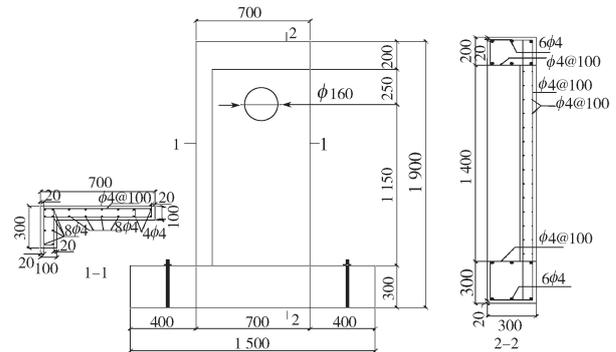


图1 试件尺寸及配筋图

Fig.1 Specimen sizes and reinforcement map

### 1.2 加固方案

对选用的4片1:2缩尺比例L形短肢剪力墙构件的加固方式如表1所示。即作为对比用的试件,不做任何加固,其余3个试件均采用条带构造柱洞口及周边双面加固方式进行加固。对于加固的3片短肢剪力墙:加固层采用的钢筋为直径6mm的HRB335级钢筋,加固层厚度为20mm,加固层箍筋为A6@150,腹板底部加固层300mm范围内采用A6@75的箍筋加密;剪切销钉采用直径为6mm的HRB335级钢筋,参考文献[4],确定剪切销钉埋置深度为60mm,且埋置10d。试件加固层示意图见图2,加固方式实景图见图3。参考相关加固技术规程和施工指南<sup>[5-6]</sup>,加固流程及要点见文献[7]。

表1 各试件加固方式

Table 1 Reinforcement methods for each specimen

试件	轴压比	加固方式	备注
SW0	0.2	未加固	对比试件
SW1	0.2	条带构造柱及 洞口周边加固	一次受力加固
SW2	0.2		二次受力加固
SW3	0.2		二次受力且震损加固

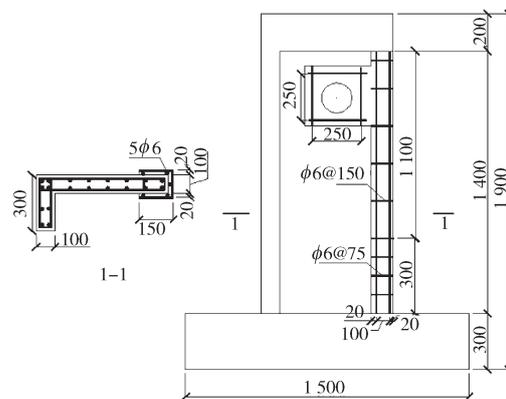


图2 加固层示意图

Fig.2 Reinforcement layer schematic diagram



a) 凿毛      b) 焊接钢筋网      c) 涂抹复合砂浆

图 3 加固方式实景图

Fig. 3 A physical map of the reinforcement mode

### 1.3 加载设备和加载制度

本试验选用的竖向加载装置如图 4 所示, 即采用 50 t 手摇式螺旋千斤顶对短肢剪力墙施加竖向荷载, 为了模拟短肢剪力墙上端的实际位移情况, 在千斤顶与短肢剪力墙试件之间设置了一个滑动装置。水平方向采用 20 t 液压作动器施加低周反复荷载。

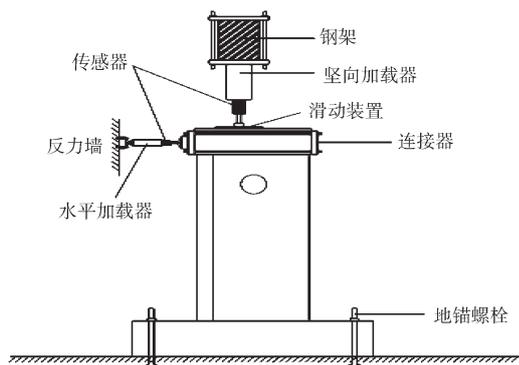


图 4 加载装置图

Fig. 4 Loading device diagram

本试验采用力 - 位移混合控制的加载制度, 具体如图 5 所示。

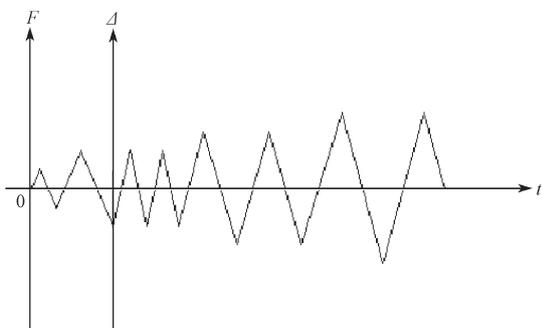


图 5 加载制度

Fig. 5 Loading system

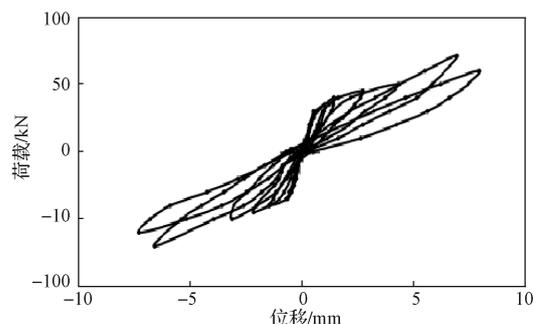
试验前先预加竖向荷载, 且竖向荷载分为 3 级施加到 280 kN 试验加载值, 每级加载为试验加载值的

1/3, 然后保持此值恒定不变。水平往复荷载 (位移) 如图 5 所示逐级加载。试验前期, 采用力控制水平荷载, 每级荷载取 10 kN, 每级荷载循环 1 次; 剪力墙底部纵向钢筋屈服之后, 采用位移控制水平荷载, 位移控制采取钢筋屈服时试件顶部水平位移  $\Delta$  为基本位移, 并以  $\Delta$  的倍数逐级增加, 每级位移循环 3 次, 当荷载下降到极限荷载的 85% 时, 即认为试件被破坏, 停止加载。

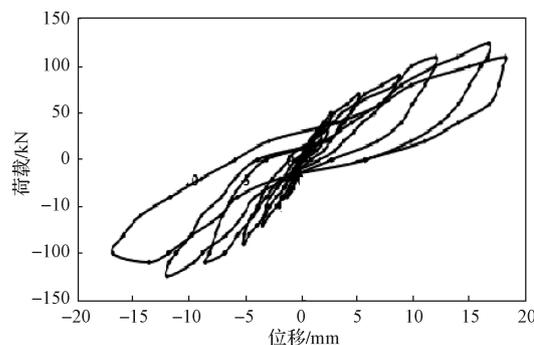
## 2 主要试验结果与分析

### 2.1 滞回曲线

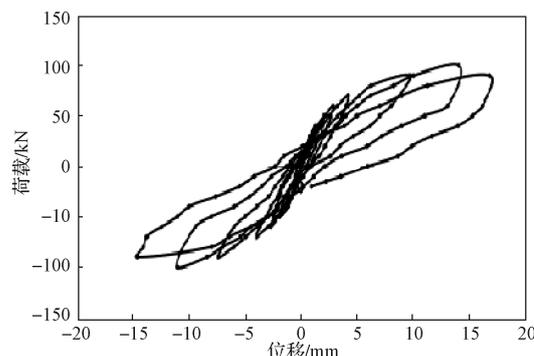
滞回曲线反映结构在反复受力过程中的变形特征、刚度退化及能量消耗, 是确定恢复力模型和进行非线性地震反映分析的依据。本试验所得 4 片 1:2 缩尺比例的 L 形截面开洞钢筋混凝土短肢剪力墙试件的滞回曲线如图 6 所示。



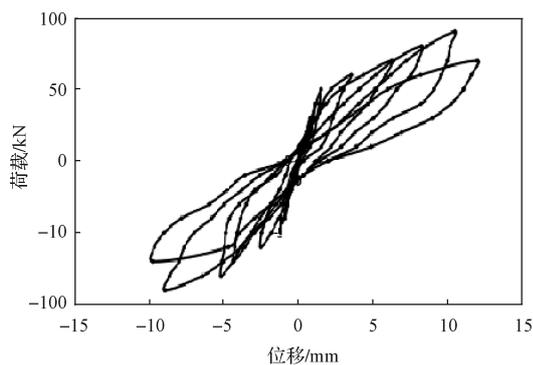
a) 试件 SW0



b) 试件 SW1



c) 试件 SW2



d) 试件 SW3

图 6 各试件的滞回曲线

Fig. 6 Hysteresis curves of each specimen

对图 6 所示各 RC 短肢剪力墙的滞回曲线进行分析可以得知:

1) 在低周反复荷载作用下, 加载初期主要是混凝土受力, 当加载的力较小时, 滞回曲线接近满足胡克定律, 墙体处于线弹性阶段, 其滞回曲线靠得比较近, 加固层此时未参与工作。随着循环次数的增加, 混凝土开裂, 墙体内部的纵筋屈服, 加固层逐步参与工作。试件开裂后, 其刚度退化, 加载同样的力时位移变大, 滞回环所包围的面积增大, 随后试件逐渐进入塑性阶段。

2) 作为对比试件的 SW0 滞回曲线的“捏拢”现象比较严重, 而经 HPFL 加固之后的各试件的滞回曲线, 其“捏拢”现象有了明显的改善, 滞回环的面积有所增加, 表明结构的耗能能力增强, 在地震时可以吸收更多的地震能量。其中, SW1 的滞回曲线最为饱满, 其次为 SW2 的, SW3 的环围面积最小, 这是因为: 在一次受力加固、二次受力加固、二次受力且有震损加固各构件的加固层中, 其应力、应变滞后原构件的程度是依次增大的, 即加固层强度的利用率是依次降低的。

## 2.2 骨架曲线分析

骨架曲线是荷载-位移滞回曲线各峰值点的连线, 其可以定性地衡量墙体的抗震性能, 能大体反映墙体在低周反复荷载作用下的开裂荷载、极限荷载和延性等主要特征<sup>[8]</sup>。试验所得各试件的荷载-位移骨架曲线对比如图 7 所示。

从图 7 所示各试件荷载-位移骨架曲线可以看出, 相对于未加固的试件 SW0, 加固试件 SW1、SW2、SW3 的极限荷载和极限位移都有了明显的提高。在试验加载前期, 水平荷载主要由原试件混凝土承担, 处于弹性阶段, 加固试件 SW1、SW2 和 SW3 的承载力几乎相同。随着水平方向作用力的逐步增大, 水平

荷载由原试件和加固层共同承担, 处于弹塑性阶段, 二次受力加固试件 SW2 和一次受力加固试件 SW1 相比, 其极限荷载和极限位移都会小一些, 这是因为二次受力试件 SW2 在加固前已经受力, 原试件截面已经存在应力与应变。当受到的水平往复荷载增大时, 加固层并不立即参与工作, 应力和应变为零; 当原试件的钢筋屈服时, 加固层发挥的强度仍然很有限, 二次受力加固且已经有震损的试件 SW3 的极限荷载和极限位移更小些。这是因为, 试件 SW3 存在的应力-应变滞后更大, 故加固层与原试件的协同工作性能更差。随后直到最终破坏, 承载力快速下降, 在原试件丧失承载力后, 加固层随之逐渐退出工作, 处于破坏阶段。

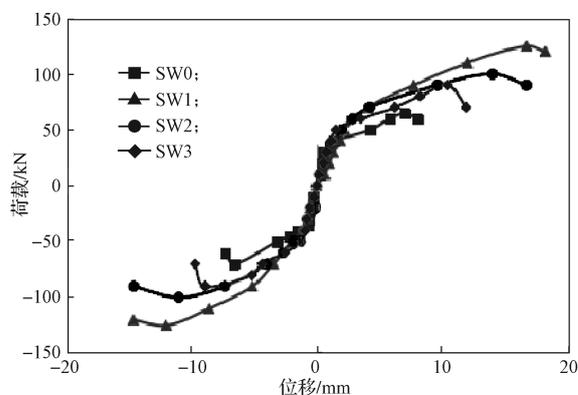


图 7 各试件荷载-位移骨架曲线

Fig. 7 Load-displacement skeleton curves of each specimen

## 2.3 承载力与延性

试验所得各 RC 短肢剪力墙的承载力及位移实测值见表 2。

表 2 墙体的承载力及位移实测值

Table 2 Measured values of the wall bearing capacity and its displacement

试件编号	开裂荷载 / kN	开裂位移 / mm	屈服荷载 / kN	屈服位移 / mm	极限荷载 / kN	极限位移 / mm	延性系数
SW0	35.6	2.28	47.8	4.32	57.3	8.3	1.9
SW1	56.8	3.08	86.4	5.70	108.0	18.6	3.3
SW2	62.9	3.92	80.7	5.78	96.5	17.5	3.0
SW3	48.0	2.34	61.3	4.21	85.0	11.8	2.8

分析表 2 中的数据可以得知: 与未加固试件 SW0 相比, 一次受力加固试件 SW1 的开裂荷载约上升为 SW0 的 1.60 倍, 极限荷载约上升为 SW0 的 1.88 倍, 屈服荷载约上升为 SW0 的 1.81 倍。二次受力加固试件 SW2 的开裂荷载约提高为 SW0 的 1.77 倍, 极限荷载约提高为 SW0 的 1.68 倍, 屈服荷载约提高为 SW0 的 1.69 倍。二次受力下的震损加固试件 SW3

的开裂荷载约提高为 SW0 的 1.35 倍, 极限荷载约提高为 SW0 的 1.48 倍, 屈服荷载约提高为 SW0 的 1.28 倍。可见, HPFL 加固后 3 个试件的开裂荷载、屈服荷载和极限荷载均得到了不同程度的提高, 这是因为 3 个加固试件都采用了试件周边加固, 所以加固层钢筋网片和高性能复合砂浆对腹板边缘起到了约束作用, 抑制了裂缝的发展。比较加固前后 RC 短肢剪力墙的延性系数可以看出, 加固后剪力墙试件的延性得到了大幅改善, 这也是由于 HPFL 加固层对混凝土发挥了约束作用所致。

对于加固层的工作机理, 分析如下: 以 HPFL 加固法对试件进行周边加固, 加固层纵筋与基础梁之间形成了有效的锚固作用, 相当于加固层对腹板起到了暗柱作用, 能够直接发挥其对剪力墙的抗拉作用和抗压作用, 加固层横向钢筋网对短肢剪力墙腹板端混凝土的横向变形起到了有效地约束作用, 而高性能复合砂浆对钢筋网起到保护作用的同时参与受压, 并充分发挥其高强性能, 从而提高了短肢剪力墙的承载力和延性等。

### 3 有限元分析

#### 3.1 模型的建立

本研究的有限元分析选用 ANSYS 软件。由文献 [9] 得知, 混凝土可选用专门的钢筋混凝土单元 SOLID65<sup>[10]</sup>, 原试件钢筋和加固层钢筋均采用 LINK8 单元<sup>[11]</sup>。HPFL 加固法中的基相为高强度混凝土复合砂浆, 增强相为钢筋网。复合砂浆没有统一的本构关系, 但其材料性能与混凝土较为接近, 故有限元分析时假定它与混凝土采用相同的应力-应变关系, 由《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[12]</sup> 中混凝土单轴应力-应变关系确定本试验的本构关系。钢筋应力-应变关系采用理想的塑性模型, 采用双线性等向强化模型 (bilinear isotropic model, BIOS), 应力-应变关系式如下:

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s, \quad \varepsilon_s \leq \varepsilon_y;$$

$$\sigma_s = f_y, \quad \varepsilon_y < \varepsilon_s < \varepsilon_s^0$$

式中:  $\sigma_s$  为钢筋应变为  $\varepsilon_s$  时对应的拉应力;

$\varepsilon_y$  为钢筋屈服时对应的应变值;

$f_y$  为钢筋的屈服应力。

本研究中将钢筋和混凝土作为不同单元, 采用分离式建模, 且假定钢筋与混凝土之间无相对滑移。

#### 3.2 有限元模拟结果与试验结果对比分析

各试件骨架曲线和滞回曲线的试验结果和有限元模拟结果对比分析如图 8 和图 9 所示。

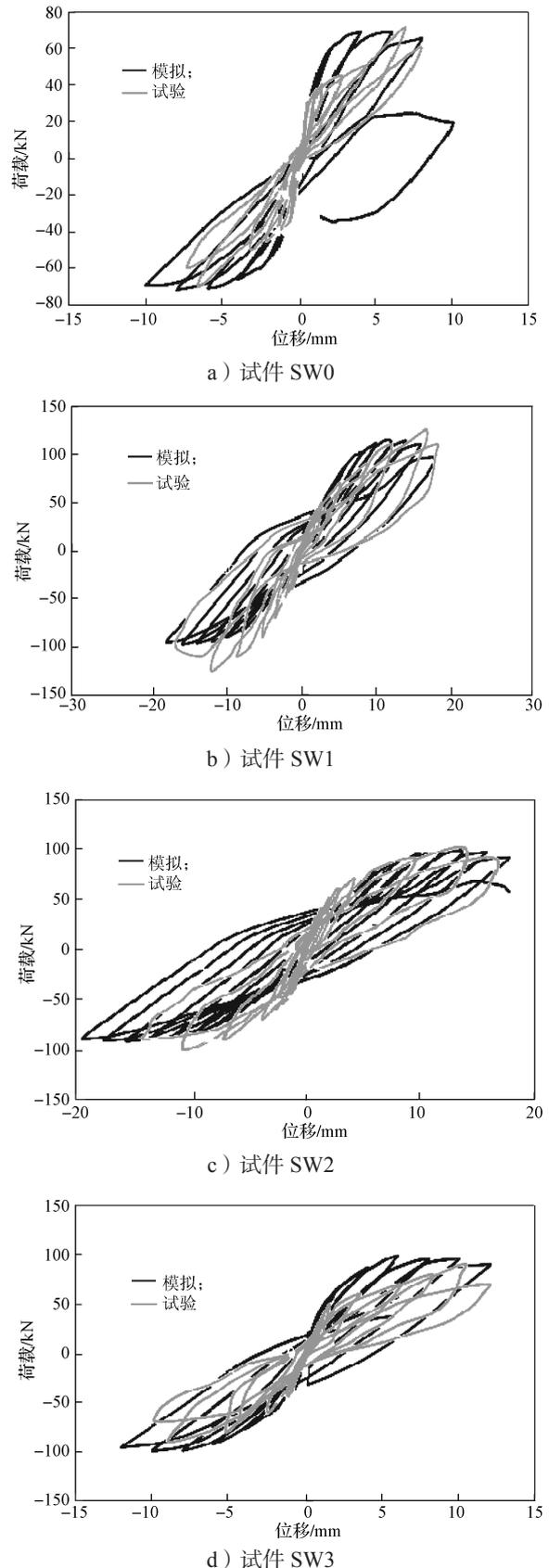


图 8 各试件滞回曲线对比分析图

Fig. 8 Comparison between hysteresis curves of each specimen

由图8可以得知:通过有限元模拟所得各试件的滞回曲线与试验分析所得滞回曲线的吻合度较高,但两者还是有一些差别,其原因可能是有限元模拟在制作试件的材料性能、荷载加载时的方式等都相对较理想化,而试验所用试件的材料性能很复杂,受较多因素的影响,如制作试件所用混凝土的水泥强度和水灰比等,且试验时不可避免地会受到人为因素的影响。

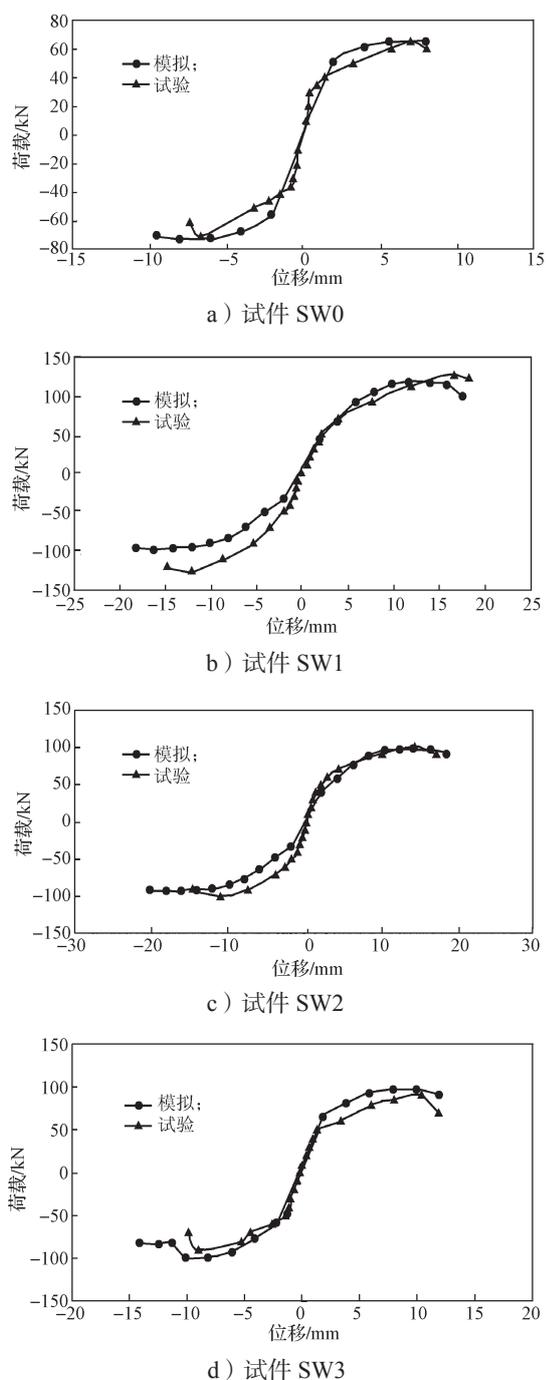


图9 各试件骨架曲线对比分析图

Fig. 9 Comparison between skeleton curves of each specimen

从图9所示对比曲线可知:试验所得骨架曲线和ANSYS有限元分析的骨架曲线基本吻合,且在加载

前期各试件试验和模拟骨架曲线的吻合度较高,而在加载后期试验结果和模拟结果稍有出入。出现这一现象的原因,是由于在试验实际加载过程中,钢筋和混凝土之间存在着滑移,而在模拟过程中并未考虑混凝土和钢筋之间的滑移。总体来说,模拟结果与试验结果在一定程度上可以互为验证。

## 4 结论

本文对一次受力试验模型、二次受力试验模型和二次受力且有震损的试验模型,分别采用HPFL进行边缘暗柱式加固,进行伪静力试验和数值模拟分析,并与未加固试验模型进行了对比分析,研究了不同受力形式下加固前后的滞回曲线、骨架曲线、承载力和延性等,并将数值模拟结果与试验结果进行对比分析,得出如下结论:

1) 通过对各加固试验模型与未加固的试验模型比较,发现加固后其抗震承载力、延性及耗能能力都得到不同程度的改善。这表明HPFL加固法是一种十分有效的短肢剪力墙加固方法。

2) 一次受力加固试验模型的承载力、延性和耗能能力明显高于二次受力加固的试验模型,二次受力且有震损加固的试验模型次之。这是因为在一次受力加固、二次受力加固、二次受力且有震损加固的各构件的加固层中,其应力、应变滞后原构件的程度依次增大,即因加固层与原构件混凝土不能同步工作、其强度利用率依次降低所致。

3) 将ANSYS有限元模拟得到的各试件的滞回曲线和骨架曲线与试验结果对比,吻合程度较高,这在一定程度上互为验证了试验研究和数值模拟结果的可靠性。

4) 试验研究证明,由于HPFL中基相-高性能复合砂浆和高性能无机界面剂中的活性成分能对混凝土损伤部位进行修复和补强,故采用HPFL加固已经有震损的构件,使其恢复和提高其抗震性能成为一种十分有效且具综合优势的方法,其相应的研究成果具有重要的工程实际意义。

### 参考文献:

- [1] 尚守平, 罗杰, 余德军. 高性能水泥复合砂浆钢筋网加固RC受剪梁的高温性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(4): 102-107.
- SHANG Shouping, LUO Jie, YU Dejun. Experimental Study of High-Temperature Behavior of RC Shear Beam Retrofitted with High-Performance Ferrocement Laminate[J]. Journal of Building Structures, 2009,

- 30(4): 102-107.
- [2] 李鹤, 蒋隆敏, 谈俊宇, 等. HPFL 加固震损短肢剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2017, 31(1): 46-52.  
LI He, JIANG Longmin, TAN Junyu, et al. Study on the Seismic Performance of Earthquake-Damaged Short-Pier Shear Walls Reinforced with HPFL[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2017, 31(1): 46-52.
- [3] 贺晶方, 蒋隆敏, 刘星. 开洞大小对短肢剪力墙抗震性能影响的试验研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2016, 30(2): 8-12, 20.  
HE Jingfang, JIANG Longmin, LIU Xing. Experimental Study on the Effect of Opening Size on the Seismic Performance of Short-Pier Shear Wall[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2016, 30(2): 8-12, 20.
- [4] 龙凌霄. 高性能复合砂浆钢筋网加固 RC 梁受弯承载力研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2005.  
LONG Lingxiao. Experimental Study on Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Ferrocement[D]. Changsha: Hunan University, 2005.
- [5] 湖南大学. 高性能水泥复合砂浆钢筋网加固混凝土结构技术规程: CECS 242—2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008: 32-35.  
Hunan University. Technical Specification for Strengthening Concrete Structures with Grid Rebar and Mortar: CECS 242—2008[S]. Beijing: China Planning Press, 2008: 32-35.
- [6] 尚守平. 高性能水泥复合砂浆钢筋网加固混凝土结构设计施工指南 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 39-46.  
SHANG Shouping. Design and Construction Guide of Reinforced Concrete Structure for High Performance Cement Composite Mortar Reinforcement[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2008: 39-46.
- [7] 谈俊宇. HPFL 加固有震损开洞短肢剪力墙抗震性能试验研究 [D]. 株洲: 湖南工业大学, 2016.  
TAN Junyu. An Experimental Research of Seismic Performance of HPFL Strengthened Earthquake-Damaged Short Leg Shear Walls with Holes[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2016.
- [8] 尚守平, 姜巍. HPFL 条带加固眠墙抗剪试验研究 [J]. 震灾防御技术, 2011, 6(3): 231-241.  
SHANG Shouping, JIANG Wei. Research on Shear Strength of HPFL Reinforced Solid Wall[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2011, 6(3): 231-241.
- [9] 何本国. ANSYS 土木工程应用实例 [M]. 3 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2011: 37-42.  
HE Benguo. Application of ANSYS Civil Engineering [M]. 3rd ed. Beijing: China Water & Power Press, 2011: 37-42.
- [10] 王新敏, 李义强, 许宏伟. ANSYS 结构分析单元与应用 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2011: 78-83.  
WANG Xinmin, LI Yiqiang, XU Hongwei. ANSYS Structural Analysis Unit and Application[M]. Beijing: China Communications Press, 2011: 78-83.
- [11] 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 5-6.  
JIANG Jianjing, LU Xinzheng, YE Lieping. Finite Element Analysis of Concrete Structures[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 5-6.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 66-67.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Code for Design of Concrete Structures: GB50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 66-67.

(责任编辑: 廖友媛)