

HPFL 加固震损短肢剪力墙抗震性能试验研究

李 鹤, 蒋隆敏, 谈俊宇, 雄楚悦

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 通过对1片未加固和3片加固的1:2缩尺比例的L形开洞RC短肢剪力墙模型进行低周反复荷载试验, 研究不同受力阶段HPFL加固开洞短肢剪力墙的抗震性能。研究表明: HPFL加固法能够有效提高短肢剪力墙的承载力、延性性能和耗能能力。不加轴力的一次受力加固短肢剪力墙, 其抗震承载力与延性均有大幅度改善; 对于有震损的不卸轴力二次受力加固短肢剪力墙, 其加固效果随其震损程度的增大而降低; 同时, 通过HPFL对试件进行加固可以有效改善试件的抗裂性能。

关键词: HPFL加固法; 受力阶段; 短肢剪力墙; 抗震性能

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2017)01-0046-06

Study on the Seismic Performance of Earthquake-Damaged Short-Pier Shear Walls Reinforced with HPFL

LI He, JIANG Longmin, TAN Junyu, XIONG Chuyue

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

Abstract: A series of low cyclic loading tests have been conducted on short-pier shear walls with one non-reinforced and three reinforced L-shaped RC frames with openings in the ratio of 1:2, followed by a research on the seismic performance of earthquake-damaged short-pier shear walls reinforced with HPFL in different loading phases. Experimental result shows that HPFL reinforcement can effectively improve the bearing capacity, ductility performance and energy dissipation of short-pier shear walls. The shear bearing capacity and ductility of short pier shear walls are to strengthen with one axial force improved greatly, and the reinforcement effect is to increase with the earthquake damage degree lowered for the short pier shear walls with two axial force without earthquake forces. Meanwhile, the reinforcement of the specimens with HPFL helps to effectively enhance the crack resistance of the components.

Keywords: HPFL reinforcement; loading phase; short-pier shear wall; seismic performance

0 引言

短肢剪力墙是由框架结构和剪力墙发展而来的新的结构体系, 具有承载力高、结构布置灵活、建筑空间大等优点, 在现代建筑中逐渐被推广和应用。为满足建筑的正常使用功能, 常常在短肢剪力墙上开设不同的孔洞。在开洞过程中, 剪力墙结构发生损伤,

结构应力会重新分布, 使其承载性能发生变化。

目前, 关于短肢剪力墙的加固方法主要还是一些传统措施, 而关于高性能水泥复合砂浆钢筋网薄层 (high performance ferrocement laminate, HPFL) 加固短肢剪力墙的研究还处于起步阶段。对HPFL加固短肢剪力墙抗震性能的研究, 可为工程实践提供参考, 具有较强的现实意义。国内外对HPFL的加固

收稿日期: 2016-10-12

基金项目: 湖南省自然科学基金株洲联合基金资助项目 (2016JJ5037)

作者简介: 李 鹤 (1989-), 女, 河南驻马店人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为新型材料在结构加固中的应用

E-mail: 1632013655@qq.com

研究主要集中于梁柱等构件,并取得了一些成果。P. Deasayi 等^[1]对普通水泥砂浆钢丝网薄层加固的梁进行了受力性能研究,结果表明,对于均匀分布的钢丝网加固试件,试件的延性与水泥砂浆的强度呈正相关。E. H. Fahmy 等^[2]将混凝土柱加载至极限荷载的 67%, 85%, 100% 后卸载,并用钢丝网砂浆进行加固处理,结果表明,通过加固能够明显提高试件的极限承载力,其延性和耗能能力也有较大提高。B. Kondraivendhan 等^[3]对混凝土抗压柱用钢丝网砂浆进行加固,结果表明,钢丝网砂浆能够对混凝土外部形成约束,从而使混凝土柱的抗压强度得到提高。尚守平等^[4]采用 HPFL 对 6 根约束梁和 3 根未加固的对比梁进行试验研究,结果表明,利用 HPFL 加固法进行加固,梁的抗剪承载力得到显著提高,同时加固措施对斜裂缝的发展具有良好的约束作用;并在试验研究的基础上,提出了加固梁的抗剪承载力公式,且试验结果与理论计算结果吻合良好。蒋隆敏等^[5]对 4 根二次受力偏压柱进行了 HPFL 加固试验,结果表明,二次受力加固柱比一次受力加固柱延性提升幅度更大;二次受力加固柱的高性能砂浆对柱的约束更好,开裂时间更晚。黄忠邦^[6]对用水泥砂浆及钢筋网水泥砂浆面层加固的砖砌体进行试验研究,在水平荷载下,分析其破坏机理,测得相应应变,计算其相应应力,研究结果表明,采用钢筋网水泥砂浆面层加固砖砌体其抗剪性能比采用水泥砂浆加固提高更多。尚守平等^[7]对 HPFL 加固的空斗墙进行水平低周反复荷载作用下的抗震性能研究,结果表明,HPFL 加固后的墙体抗裂性能、抗侧移刚度和极限荷载均得到了提升。

HPFL 加固法应用于梁、板、柱等结构的研究已经取得了较多成果^[8-10],但在混凝土剪力墙方面的应用研究还较少。本文从理论和试验两个方面对 HPFL 加固的短肢剪力墙的承载性能和延性进行研究,并对不同受力阶段短肢剪力墙的加固效果进行对比,以期能为工程实践提供参考。

1 正截面承载力理论计算

1.1 基本假定

1) 原试件与加固部分变形协调一致且符合小变形和平截面假定。

2) 试件达到极限承载力前,加固层与原有混凝土之间不发生剥离破坏,忽略剪切变形影响。

1.2 承载力理论计算

翼缘纵筋合力点存在两种情况,分别为位于翼缘内和腹板内,合力点位置不同则计算方法也存在差

异,具体如图 1 所示。

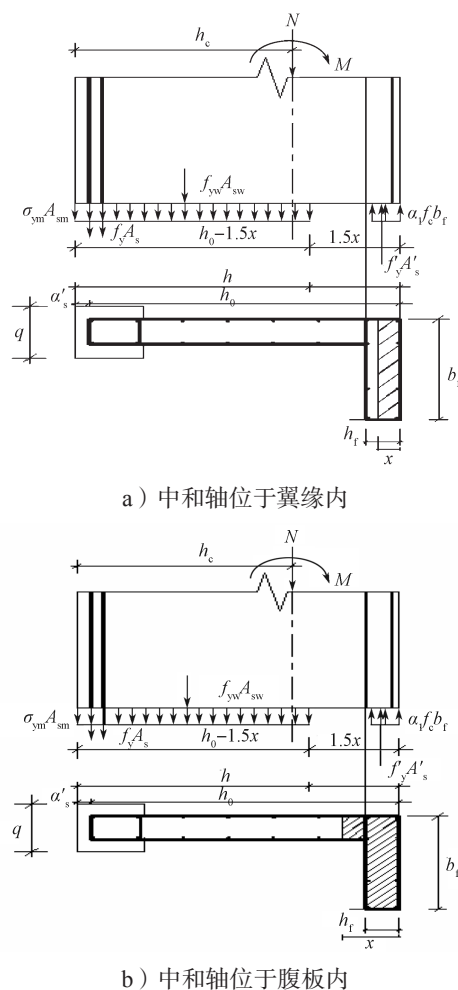


图 1 剪力墙承载力计算简图

Fig. 1 A calculation diagram of the bearing capacity of shear walls

根据基本假定和 GB50010—2010《混凝土设计规范》^[11],可得如下公式。

当中和轴位于短肢剪力墙翼缘内 ($x < h_f$) 时,如图 1a 所示,根据力系平衡和力矩平衡条件可得

$$N + f_y A_s + \sigma_{ym} A_{sm} + f_{yw} \frac{A_{sw}}{h_0} (h_0 - 1.5x) = \alpha_1 f_c b_f x + f'_y A'_s,$$

$$N(h_0 - h_c) + f_y A_s (h_0 - a'_s) + f_{yw} \frac{A_{sw}}{h_0} \cdot \frac{(h_0 + 1.5x)(h_0 - 1.5x)}{2} +$$

$$\sigma_{ym} A_{sm} (h - a'_s) = \alpha_1 f_c b_f x \left(\frac{x}{2} - a'_s \right) + M。$$

式中: N 为剪力墙试件所受的轴力;

f_y, f'_y 分别为原构件腹板端部纵向钢筋抗拉和抗压强度;

A_s, A'_s 分别为原构件腹板端部纵向抗拉和抗压钢筋面积;

σ_{ym}, A_{sm} 分别为加固层纵向钢筋网的抗拉强度和总面积;

f_{yw} , A_{sw} 分别为原构件竖向分布钢筋抗拉强度和总面积;

h_0 为剪力墙截面有效高度;

x 为剪力墙受压区高度;

α_1 为受压区混凝土矩形应力值与混凝土轴心抗压强度设计值的比值, 本文取值为 1.0;

f_c 为原构件混凝土轴心抗压强度设计值;

b_f 为剪力墙受压区翼缘宽度;

h_c 为墙肢剪力墙截面形心到腹板边缘距离;

h 为剪力墙的横截面长度;

a'_s 为短肢剪力墙截面受压钢筋合力点到截面边缘距离;

M 为剪力墙附加弯矩。

当中和轴位于短肢剪力墙腹板内 ($x > h_f$) 时, 如图 1b 所示, 根据力系平衡和力矩平衡得

$$N + f_y A_s + \sigma_{ym} A_{sm} + f_{yw} \frac{A_{sw}}{h_0} (h_0 - 1.5x) =$$

$$\alpha_1 f_c b x + f'_y A'_s + \alpha_1 f_c (b_f - b),$$

$$N(h_c - e_0 - a'_s) + f_y A_s (h_0 - a'_s) +$$

$$f_{yw} \frac{A_{sw}}{h_0} \frac{(h_0 + 1.5x)(h_0 - 1.5x)}{2} + \sigma_{ym} A_{sm} (h - a'_s) =$$

$$\alpha_1 f_c b x (x - a'_s) + \alpha_1 f_c (b_f - b) \frac{h_f}{2} + M。$$

式中: e_0 为轴向力对截面重心的偏心距, $e_0 = M/N$;

h_f 为剪力墙受压区翼缘高度。

根据上述两种情况下短肢剪力墙的承载力和弯矩的理论计算公式, 结合具体工程情况可求得承载力理论值。

2 模型试验研究

2.1 试验模型

本试验主要采用 HPFL 加固法对不同受损程度的开洞短肢剪力墙进行加固, 并对其抗震承载性能进行研究。试验所使用的试件是 4 个 1:2 缩尺比例的 L 形开洞短肢剪力墙, 均采用细石混凝土浇筑。在试件腹板上部开设圆形洞口, 试件高度为 1 400 mm, 箍筋及纵向钢筋采用 $\Phi 4$ 。其中, 一次受力加固为未施加荷载条件下进行加固, 用于模拟可以进行完全卸载加固的情形; 二次受力加固为竖向荷载先加载到轴压比所对应的荷载值再进行加固, 用于模拟实际工程中不能卸除或不能完全卸除竖向荷载所进行的抗震加固情形; 有震损加固为原试件在恒定轴压比所对应的竖向荷载条件下, 施加低周反复荷载作用使钢筋屈服再进行加固, 用于模拟已有地震损伤仍可以进行加固修复, 不卸载条件下进行加固的情形, 模型参数见表 1。

表 1 模型参数

Table 1 Parameters of models

试件编号	开孔直径/mm	轴压比	混凝土等级	腹板宽度/mm	加固情况	备注
SW0	160	0.2	C20	700	未加固	对比试件
SW1	160	0.2	C20	700	条带构造柱及洞口加固	一次受力加固
SW2	160	0.2	C20	700	洞口及双面加固	二次受力加固
SW3	160	0.2	C20	700	洞口及双面加固	震损加固

为防止墙端局部破坏, 在剪力墙试件顶部设计一个 700 mm × 300 mm × 200 mm 的矩形加载梁, 同时沿试件底部设计基础梁, 模拟梁板约束, 并在基础梁两端预留孔洞, 便于安装与锚固。试件模型和应变片布置如图 2 所示。

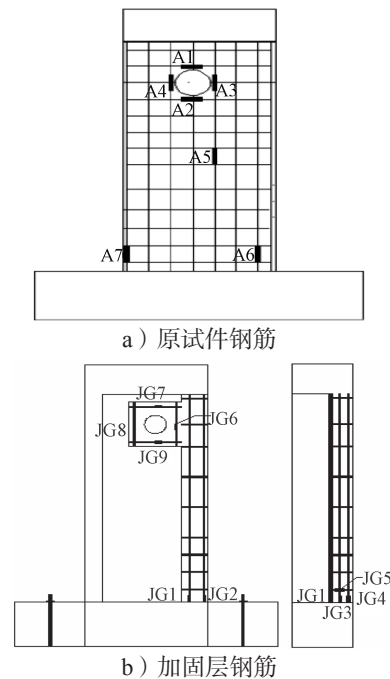


图 2 应变片布置详图

Fig. 2 A detailed picture of strain gauges

2.2 试验加载装置及加载过程

采用规格为 50 t 的螺旋千斤顶进行竖向加载。试件中心与千斤顶中心严格对中, 加载至规定轴心力 (即由轴压比为 0.2 所确定的竖向荷载值 280 kN) 后停止加载, 并保持恒定。水平方向荷载采用 20 t 液压伺服作动器施加, 加载制度为水平低周期反复荷载, 具体加载装置如图 3 所示。

在对试件施加水平荷载前, 为较好地模拟实际地震时构件承受上层建筑自重的情况, 先对试件施加竖向荷载, 竖向荷载采用分级加载, 每级荷载为试验加载值的 1/3, 当荷载值达到 280 kN 时即停止加载, 并维持不变。水平荷载采用低周期反复荷载加载机制, 初始阶段采用荷载控制, 然后采用位移控制。在试

件底部纵向钢筋达到屈服强度以前,采用荷载控制,每级荷载增量为 10 kN,往复循环一次,加载至剪力墙底部纵向钢筋屈服,记录此时柱顶位移值 Δ 。在试件底部纵向钢筋屈服后采用位移控制,以 Δ 为每级位移加载控制量,并逐级增加,单级位移荷载循环 3 次,直至试件破坏。

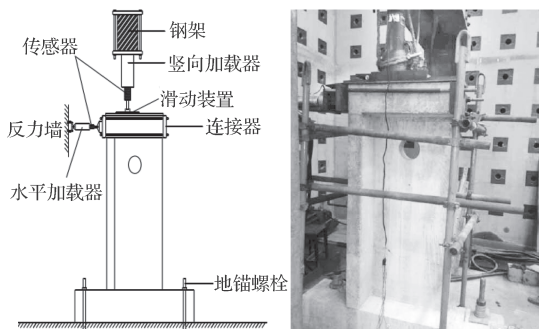
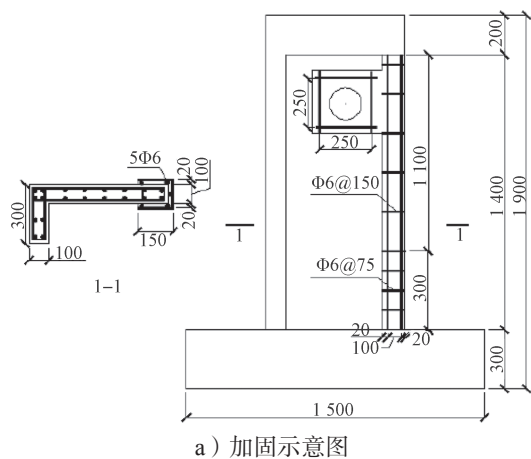


图3 试验加载装置图

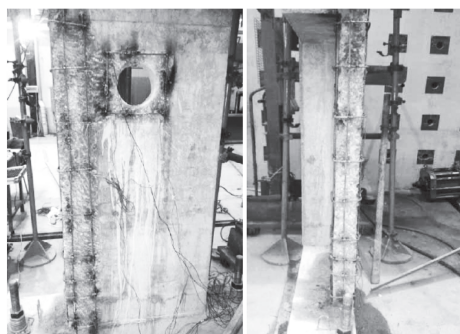
Fig. 3 A diagram of loading devices

2.3 加固方案

试验构件在经过 2.1 节中所述的不同受力阶段后,已达到不同的受损程度,采用 HPFL 加固法对洞口周边及条带构造柱进行双面加固,加固层厚度为 20 mm,加固钢筋和抗剪销钉均为直径 6 mm 的 HRB335 级钢筋,抗剪销钉埋置深度为 60 mm,加固层箍筋采用 $\Phi 6@150$,具体加固方式如图 4 所示。



a) 加固示意图



b) 加固实景图

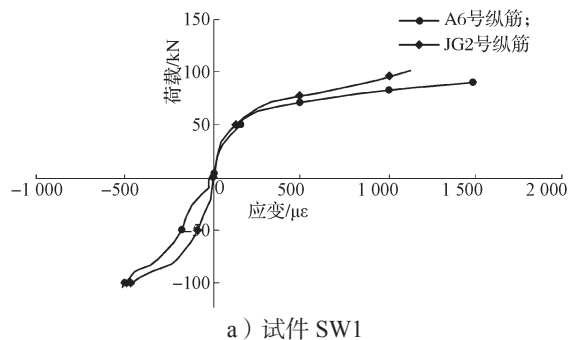
图4 试件加固图

Fig. 4 A diagram of specimen reinforcement

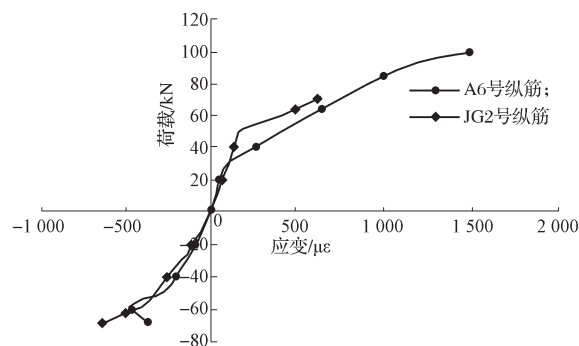
3 试验结果与分析

3.1 钢筋荷载-应变曲线分析

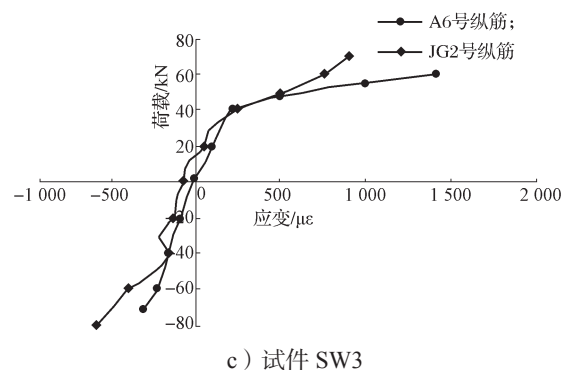
对预先粘贴在钢筋表面的应变片进行数据采集并整理,得到钢筋的荷载-应变曲线,如图 5 所示。



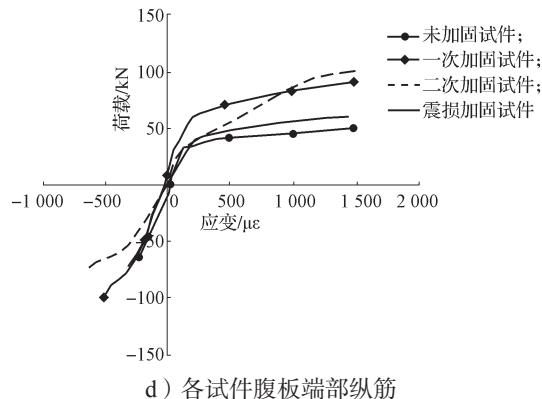
a) 试件 SW1



b) 试件 SW2



c) 试件 SW3



d) 各试件腹板端部纵筋

图5 钢筋荷载-应变曲线

Fig. 5 Reinforcement load-strain curves

由图 5a~c 可知,试件 SW1 在加载过程中加固层与腹板纵筋能够协调变形;试 SW2 和 SW3 加固层钢

筋存在着应变滞后现象,并且随着荷载增大,应变滞后现象更加明显;试件 SW3 加固层应变滞后现象最明显。由图 5d 可知,各试件腹板端纵向钢筋的屈服强度由大到小的顺序为 SW2, SW1, SW3, SW0。这说明 HPFL 加固层有效地对试件腹板端形成了约束,且震损程度越小加固效果越明显。

3.2 滞回曲线分析

滞回曲线是确定恢复力模型和进行非线性地震反应分析的依据,其饱满程度反映整个构件塑性变形能力和抗震能力。根据 4 组对比试验得出的数据,处理后得到试件的滞回曲线如图 6 所示。

由图 6 各构件滞回曲线可知:

1) 在低周反复荷载作用下,各试件在加载初期处于弹性阶段,滞回曲线呈线性变化。试件开裂后,刚度有所退化,滞回环出现明显的弯曲。试件屈服后,随着反复荷载的增大,滞回环所包围的面积增大,滞回环逐渐饱满,残余变形加大,试件进入塑性阶段。

2) 通过对构件不同受力阶段的加固,试件的滞回曲线呈现不同的饱满状态。试件 SW1 的滞回曲线最为饱满,未加固试件 SW0 包围面积最小,有明显的捏紧现象。各构件饱满程度由大到小依次为 SW1, SW2, SW3, SW0,即在受力初期加固对试件抗震性能优化更明显。这说明通过 HPFL 加固能有效提高不同受力形式下 L 形短肢剪力墙的耗能性能,即使是对震损试件也具有良好的加固效果。

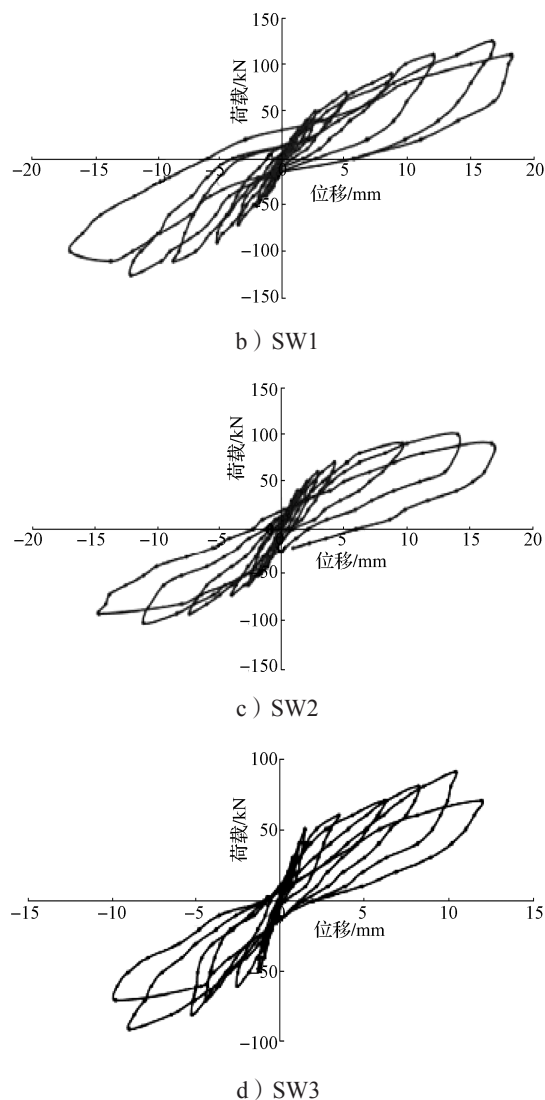
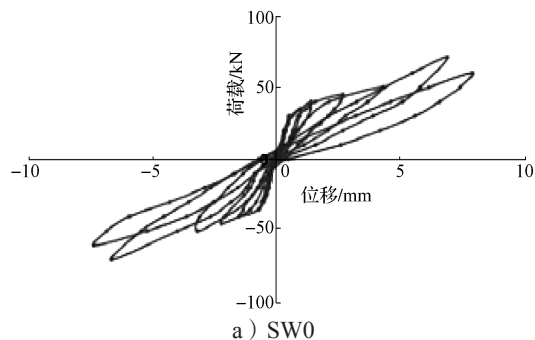


图 6 滞回曲线

Fig. 6 Hysteretic curves

3.3 承载性能分析

构件承载力包括开裂荷载、屈服荷载、极限荷载及位移,通过加载获得具体的试验数据及理论计算值如表 2 所示。

表 2 承载力试验特征值及理论值

Table 2 Characteristic value and theoretical value of bearing strength tests

试件编号	开裂荷载 /kN	屈服荷载 /kN	极限荷载 /kN		延性	极限荷载理论值与试验值的相对误差 /%	加固后与加固前极限荷载比
			试验值	理论值			
SW0	35.6	47.8	57.3	95.2	1.9		
SW1	56.8	86.4	108.0	95.2	3.3	11.9	1.88
SW2	62.9	80.7	96.5	87.3	3.0	9.5	1.68
SW3	48.0	61.3	85.0	81.1	2.8	4.6	1.48

由表 2 可知, HPFL 加固后的 3 个试件的承载性能和延性均有较大提升。承载力方面: SW1 较 SW0 提升 88%, SW2 较 SW0 提升 68%, SW3 较 SW0 提升 48%。这说明在短肢剪力墙破坏前加固能更好地提高结构承载性能。延性方面: 加固后的 3 个构件

延性系数明显增大,且增大趋势与承载性能呈现一致性,这说明 HPFL 加固层能够有效约束混凝土。对于极限荷载,本文得到的理论公式计算值与试验值最大误差为 11.9%,满足工程要求。

4 结论

综上所述,可得如下结论:

1) HPFL 加固能够有效改善短肢剪力墙的抗震性能;加固试件的开裂荷载、屈服荷载、极限承载力、延性等性能都得到不同程度的提高,其中不加轴力的一次受力加固效果最明显;不卸轴力的二次受力加固原构件震损程度越小其加固效果越明显;试验研究中,极限承载力提高幅度可达 48% 以上。

2) HPFL 加固在试件各受力阶段均适用,弹性受力阶段加固效果更好;HPFL 对原构件混凝土能起到很好的约束作用,从而提高试件的承载力、延性以及抗震性能。

3) 用本文推导的公式计算出的短肢剪力墙的极限承载力理论结果与试验结果吻合程度较高,具有较好的实用性与可靠性,能为工程实践与进一步的研究提供参考。

4) 被加固的短肢剪力墙的抗震性能受多种因素的影响,如试验构件的开洞大小与位置。开洞大小与位置对加固效果的影响规律,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] DEASAYI P, KUMAR N N, EL-KHOLY S A. Strength and Behaviour Ferrocement in Shear[J]. Cement and Concrete Composites, 1992, 14(1): 33-45.
- [2] FAHMY E H, SHAHEEN Y B I, KORANY Y S. Repairing Reinforced Concrete Columns Using Ferrocement Laminates[J]. Journal of Ferrocement, 1999, 29(2): 115-124.
- [3] KONDRAIVENDHAN B, PRADHAN B. Effect of Ferrocement Confinement on Behavior of Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(3): 1218-1222.
- [4] 尚守平,刘 洸. HPFL 加固混凝土结构斜截面承载力计算及工程应用[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2011, 38(2): 1-7.
SHANG Shouping, LIU Wei. Calculation of Diagonal Section Resistance and Engineering Application of Strengthening RC Structures Using HPFL[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2011, 38(2): 1-7.
- [5] 蒋隆敏,尚守平,曹 晖. HPFL 二次受力加固 RC 偏压柱试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2010, 33(6): 868-872, 880.
JIANG Longmin, SHANG Shouping, Cao Hui. Experimental Investigation into the Strengthening of Eccentrically Compressed RC Column Using HPFL Under Twice Loading[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2010, 33(6): 868-872, 880.
- [6] 黄忠邦. 水泥砂浆及钢筋网水泥砂浆面层加固砖砌体试验[J]. 天津大学学报, 1994, 27(6): 764-770.
HUANG Zhongbang. The Study on Adopting the Cover with Cement Mortar and the Cover with Reinforcement Mortar to Strengthen Brick Masonry[J]. Journal of Tianjin University, 1994, 27(6): 764-770.
- [7] 尚守平,罗 致,奉杰超,等. HPFL 加固前后空斗墙片抗侧刚度试验[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2010, 35(4): 519-523.
SHANG Shouping, LUO Zhi, FENG Jiechao, et al. Experimental Study on Stiffness of Row Lock Cavity Wall Strengthened with High Performance Ferrocement Laminate (HPFL)[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science), 2010, 35(4): 519-523.
- [8] 颜 军,尚守平,聂 旭. 高性能复合砂浆高温后的抗压强度试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2006, 3(4): 59-62.
YAN Jun, SHANG Shouping, NIE Xu. Experimental Investigation of Compressive Strength of High Performance Composite Mortar After Elevated Temperature[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2006, 3(4): 59-62.
- [9] 黄 艳,蒋隆敏,李红军,等. HPFL 加固双向简支板抗弯性能研究[J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(1): 10-16.
HUANG Yan, JIANG Longmin, LI Hongjun, et al. Study on Flexural Properties of Bidirectional Simply Supported Slab Reinforced with HPFL[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(1): 10-16.
- [10] 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.
- [11] 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: 34-41.
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: 34-41.

(责任编辑: 邓光辉)