

修复震损装配式剪力墙抗震性能试验研究

王 坦^{1,2}, 马先前¹, 李立巍², 刘 俊¹, 郝银龙²,
周志杰¹, 曹艺博², 窦立军¹

(1. 长春工程学院 土木工程学院, 吉林 长春 130012; 2. 吉林省土木工程抗震减灾重点实验室, 吉林 长春 130012)

摘要: 对震损建筑进行加固修复能快速恢复震后的正常生活秩序, 降低灾后重建的资金投入。随着装配式建筑的广泛应用, 有必要针对装配式建筑震损修复后的抗震性能开展研究。本文采用两种不同方法对震损的装配式剪力墙进行修复, 分别是高强灌浆料置换破损混凝土法和植筋并用钢筋网片包裹增大截面法。采用拟静力试验和有限元分析, 对比修复的震损装配式剪力墙与原剪力墙在破坏模式、承载能力、延性、耗能能力、刚度退化等方面的变化, 以综合评价两种方法修复剪力墙的抗震性能。研究表明, 两种修复方法都能够使装配式剪力墙的承载能力得到恢复, 延性和耗能能力得到提高; 使用植筋并用钢筋网片包裹增大截面法修复的试件破坏特征是钢筋网片拉断, 其约束作用充分发挥, 震损修复效果更好。采用的两种修复方法, 施工简便、成本低, 为此类结构的震损修复提供有益参考。

关键词: 震损修复; 装配式剪力墙; 增大截面法; 抗震性能

中图分类号: TU375.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)02-0227-08

Experimental study on seismic performance of prefabricated shear wall for repairing earthquake damage

WANG Tan^{1,2}, MA Xianqian¹, LI Liwei², LIU Jun¹, HAO Yinlong²,
ZHOU Zhijie¹, CAO Yibo², DOU Lijun¹

(1. School of Civil Engineering, Changchun Institute of Engineering, Changchun 130012, China;

(2. Jilin Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Earthquake Resistance and Disaster Reduction, Changchun 130012, China)

Abstract: Strengthening and repairing the earthquake-damaged buildings can quickly restore the normal life order after the earthquake and reduce the capital investment in post-disaster reconstruction. With the wide application of prefabricated buildings, it is necessary to study the seismic performance of prefabricated buildings after earthquake damage repair. In this paper, two different methods are used to repair the earthquake-damaged prefabricated shear wall, which are the method of replacing damaged concrete with high-strength grouting material and the method of planting steel bar and enlarged cross-section wrapped with steel mesh. The pseudo-static test and finite element analysis are used to compare the changes of failure mode, bearing capacity, ductility, energy dissipation capacity and stiffness degradation between the repaired earthquake-damaged prefabricated shear wall and the original shear wall, so as to comprehensively evaluate the seismic performance of the shear wall repaired by the two methods. The study shows that the two repair methods can restore the bearing capacity of the prefabricated shear wall, improve the ductility and energy dissipation capacity. The failure characteristic of the specimen repaired by the steel bar planting and enlarged cross-section method is that the steel mesh is broken, its restraint effect is brought into full play, and the effect of earthquake damage repair is better. The two repair methods adopted have the advantages of simple construction and low cost, which provide useful reference for the earthquake damage repair of this kind of structures.

Key words: earthquake damage repair; prefabricated shear wall; enlarged section method; seismic performance

收稿日期: 2022-07-11

修改稿日期: 2023-02-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108207); 吉林省科技发展计划项目(20210506010ZP); 吉林省自然基金项目(20200201227JC)

第一作者: 王 坦(1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事装配式建筑、结构防灾减灾相关研究。E-mail: tm_wt@ccit.edu.cn

通信作者: 窦立军(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事装配式建筑、结构防灾减灾相关研究。E-mail: ljddou63@163.com

近年来,装配式建筑结构由于施工效率高、节能环保、经济效益好等优点得以广泛应用,装配式剪力墙建筑发展迅速,应用较广泛。多次震后调查发现,剪力墙遭受不同程度的破坏,对震损建筑进行加固修复不仅能够快速恢复灾区的正常生活秩序,还能节约大量人力物力,具有极高的经济价值,符合可持续发展战略。

国内外学者已开展了剪力墙的修复加固试验研究,主要加固方法有外包钢加固法,粘钢加固法,纤维材料加固法等方法。梅许江、苏明周等^[1]对角钢加固剪力墙墙肢底部进行了试验研究,证明了角钢加固剪力墙方案是可行的,能提高剪力墙承载能力和延性。潘亮等^[2]通过模型试验对粘贴钢板法与高性能砂浆混合加固的方法对两层单跨结构进行了抗连续倒塌性能试验,经加固后的结构承载能力明显增强,抗倒塌能力提升显著,梁铰形成时间早于柱铰且比柱铰数量多,试验结果符合结构抗震设计的基本要求; Bing Li and Chee Leong Lim^[3]采用注胶修补的方式修补墙身裂缝,之后粘贴 FRP 修复,研究发现 CFRP 和 GFRP 板能够提高墙体的强度和刚度,CFRP 对于强度的恢复比 GFRP 更好,加固试件的刚度、延性及耗能能力相比原始试件得到提高。张远森、余江滔等^[4]对 ECC 修复震损剪力墙抗震性能进行了试验研究,结果表明: ECC 加固能够基本恢复剪力墙承载能力,提高延性、耗能能力及脚部钢筋利用率,避免了剪力墙塑性铰区混凝土压溃和钢筋屈曲,使剪力墙破坏模式由脆性破坏变为延性破坏。

对修复后震损装配式剪力墙的抗震性能的研究较少。刘香、薛鸿杰^[5]采用增大截面法和粘钢加固法对两片震损装配式剪力墙进行修复,研究发现在受损情况相同的情况下,高轴压比装配式剪力墙试件采用增大截面法加固后试件和采用粘钢加固法相比,加固后试件的承载力和延性有较为明显的增加,抗震性能更好;李如博^[6]采用 CFRP 网-ECC 加固法对受损严重的新型装配式剪力墙结进行修复,修复后的墙体抗震性能超过原墙体,承载能力、耗能能力和延性性能强于原试件。

这些加固方法,能够较好的恢复剪力墙的抗震性能,但采用较多的钢材、纤维布材或板材,修复加固成本较高。因此有学者提出了采用高强灌浆料加固 RC 梁能有效提高 RC 梁的抗弯承载力、截面刚度^[7];适当的植筋间距对新老混凝土间黏结性能有较好的影响。余文成^[8]通过试验发现采用高强灌浆料作为新增材料加固偏心受压柱,偏心受压柱的极限承载能力得到了较大的提高,原构件混凝土和高强灌浆料加固层间能很好地协同工作。廖新雪^[9]通过试验对比发现单面增大截面法加固剪力墙和双面

增大截面法加固剪力墙在耗能能力、变形能力等接近,但后者极限承载力是前者约 1.26 倍。

综合分析,使用高强灌浆料修复装配式震损剪力墙施工方便、造价成本低,在此基础上新提出一种外包钢筋网片修复方法,通过试验研究和有限元分析,为装配式剪力墙结构震损修复提供参考。

1 震损预制剪力墙修复方案

为了研究以上两种方法在震损装配式预制剪力墙抗震性能修复中的应用效果,本文分析了已完成的装配式剪力墙试验的震损破坏的程度,分别采用高强度灌浆料置换破损混凝土和植筋增大截面并包裹钢筋网片法进行了修复,并通过试验、有限元对比分析其抗震性能。

原有装配式剪力墙试验是设计了 2 个短肢剪力墙试件,采用低周反复荷载试验模拟地震破坏效果。试验设计和破坏情况如图 1 所示。墙高 1 800 mm,墙截面高 800 mm,墙厚 160 mm,基础底座截面尺寸为 1 200 mm×500 mm,详见图 1。采用 C35 混凝土,底座钢筋和墙体纵筋、分布筋采用 HRB400 钢筋,墙体箍筋和拉筋采用 HPB300 钢筋。

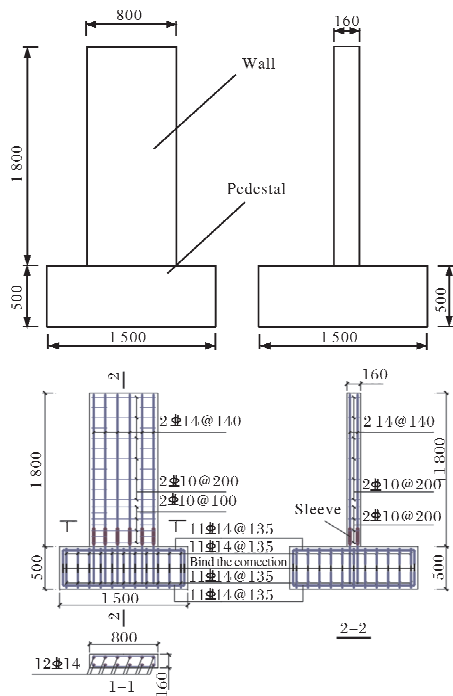


图 1 PSW1 剪力墙试件及配筋详图

Fig. 1 Details of specimens and reinforcement of PSW1 shear wall

PSW1(图 2)为套筒灌浆连接装配式剪力墙试件的破坏形态,为压弯破坏,受拉钢筋屈服,受压混凝土压碎剥落,裂缝分布较为均匀,受拉区钢筋强度发挥充分,塑性铰从墙身底部开展到套筒顶截面。墙体主要裂缝及受损混凝土区域都集中在底座以上 500 mm,且混凝土压碎破坏主要集

中在墙脚, 因此采用高强灌浆料置换破损混凝土进行震损加固。



图2 试件 PSW1 破坏图

Fig. 2 PSW1 failure diagram of specimen

PSW2(图3)模拟了套筒灌浆缺陷(墙体两端部的套筒钢筋伸入的锚固长度不足)对于墙体抗震性能的影响的破坏形态, 仍为压弯破坏, 墙肢两端受拉钢筋拔脱破坏, 受压混凝土压碎剥落。剪力墙底部混凝土破碎严重, 因此, 采用在墙端两侧底座对称植入两根钢筋并用钢筋网片包裹约束, 再用高强灌浆料置换破损混凝土。



图3 PSW2 破坏图

Fig. 3 PSW2 failure diagram of specimen

2 震损预制剪力墙修复过程

2.1 修复过程

修复工作在吉林省土木工程抗震减灾重点实验室进行, 现场进行支模和灌浆料浇筑。高强灌浆料置换破损混凝土法试件 CRPSW, 是在试件 PSW1 在完成拟静力试验后, 剪力墙墙肢脚部混凝土

土压溃。首先凿除破损区域的混凝土, 沿开裂的主裂缝进行混凝土清除, 并凿除试件破损处的混凝土, 重新在两侧的套筒钢筋处黏贴新的应变片, 然后进行吹灰、冲洗、支模和浇筑灌浆料(图4)。

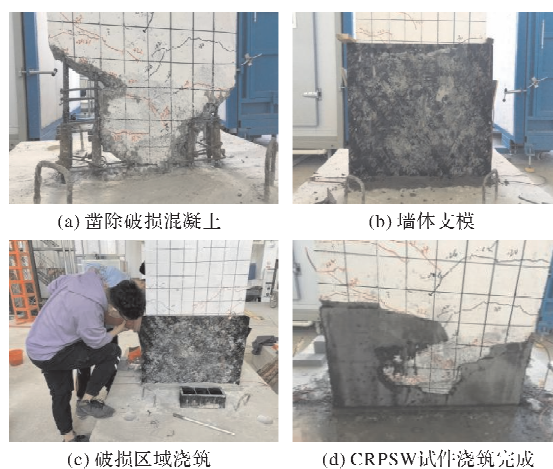


图4 试件 CRPSW 制作过程

Fig. 4 CRPSW manufacturing process of specimen

植筋并用钢筋网片包裹增大截面法试件 NRPSW, 是在试件 PSW2 完成拟静力试验后进行, 由于缺陷两侧受拉钢筋拔脱, 主要破坏是墙肢与底座之间脱离较大, 因此, 选择植筋后钢筋网片包裹增大截面法进行震损修复, 首先在墙体两端底座位置打孔, 植入直径 14 mm 的钢筋, 钢筋伸入底座 280 mm, 伸出底座 700 mm。墙体外表面凿毛, 深度不小于 5 mm, 用钢筋网片(60 * 60 mm)包裹, 支模, 浇筑灌浆料(图5)。

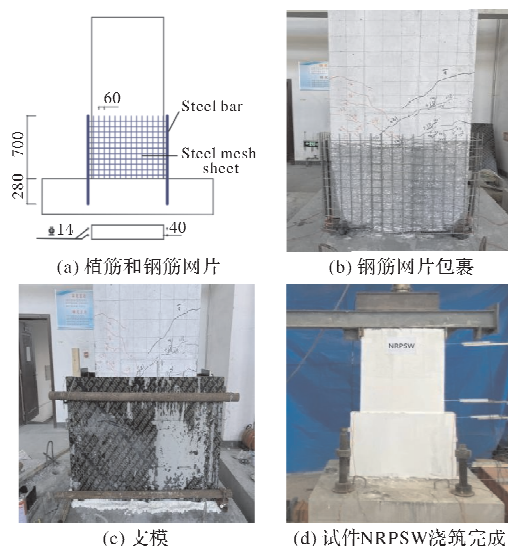


图5 试件 NRPSW 制作过程

Fig. 5 NRPSW manufacturing process of specimen

2.2 材料特性

2.2.1 灌浆料

采用高强灌浆料型号为 G-092, 由中德新亚生产。流动度 310 mm, 最大颗粒直径小于等于 2 mm, 膨胀率为 0.12。每组留置 3 个灌浆料试块

(40 mm×40 mm×160 mm)与墙体同条件养护,使用微机控制抗压试验机测定灌浆料试块的抗压强度为 87.1 MPa,满足要求。



图 6 微机控制抗压试验机

Fig. 6 Microcomputer-controlled compression testing machine

2.2.2 钢筋网片

本次试验采用 60×60 mm 孔, 1.8 mm 粗的热镀锌钢筋网片, 抗拉强度为 220 N/mm²。

3 加载装置与加载方案

3.1 加载装置

通过 MTS 电液伺服作动器施加水平荷载, 通过电液伺服千斤顶施加竖向荷载。为限制加载过程中基础台座的位移, 利用地锚螺栓杆把基础台座固定在实验室地面上(图 7)。

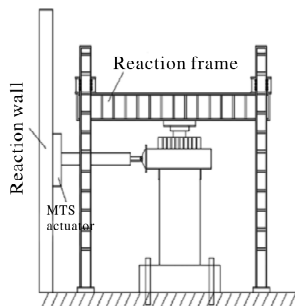


图 7 试验加载示意图

Fig. 7 Schematic diagram of test loading

3.2 加载制度

本次试验通过拟静力试验加载方案模拟水平地震作用下修复后震损装配式剪力墙的抗震性能。剪力墙试件的试验轴压比均为 0.15, 即施加轴向压力 380 kN。

水平往复荷载采用荷载和位移混合控制, 首先采用力控制加载, 开裂前从 0 kN 开始每 10 kN 反复一次, 直至试件开裂。试件开裂后转为位移加载, 从 0 mm 开始, 每 3 mm 依次递加, 每个循环反复三次。加载到荷载为峰值荷载的 85% 以下, 试验停止。加载过程中设推力为正, 拉力为负。试验水平荷载加载制度如图 8。

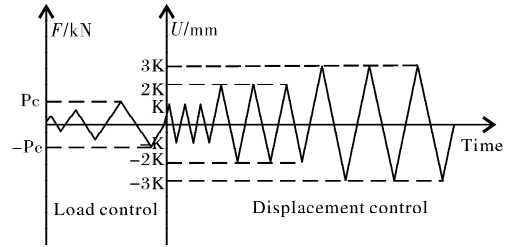


图 8 水平荷载加载制度

Fig. 8 Horizontal load loading system

4 试验现象分析

4.1 CRPSW 破坏过程

高强灌浆料置换破损混凝土法试件 CRPSW 在拟静力试验过程中可以分为四个阶段(见图 9):

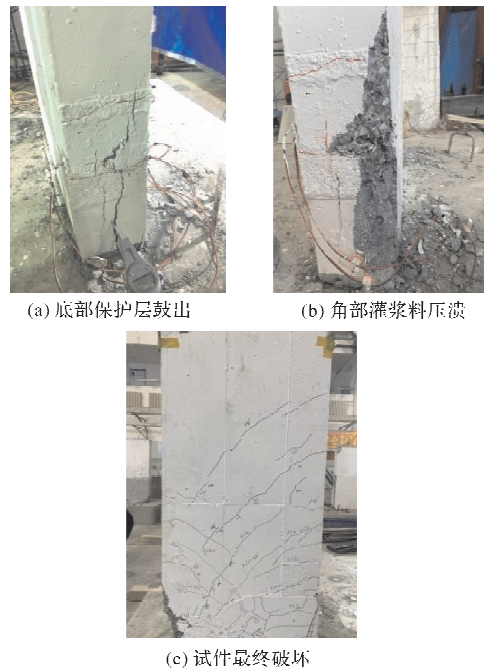


图 9 CRPSW 试件破坏图

Fig. 9 Failure diagram of CRPSW specimen

(1)开裂, 正向水平力达到 120 kN 时, 在混凝土与高强灌浆料的黏结界面首先出现微小裂缝;

(2)屈服, 裂缝出现后, 试件回零改用位移控制, 循环三次。前五级加载中受拉区裂缝由底部向上开展, 每级加载循环后裂缝出现部分延长。位移加载至 12 mm 时, 正向水平力达到 179 kN, 应变采集显示竖向边缘钢筋受拉屈服;

(3)峰值, 随着水平位移的不断增大, 裂缝沿黏结面发展成斜裂缝并延伸穿过高强灌浆料, 并不断发展至墙脚, 形成明显的交叉裂缝。位移加载至 30 mm, 达到峰值荷载 203 kN;

(4)破坏, 位移 48 mm 时, 受压灌浆料压碎, 裂缝分布较为均匀, 正向和负向水平荷载低于峰值荷载的 85%, 加载结束。试件表现为压弯破坏。

4.2 NRPSW 破坏过程

植筋并用钢筋网片包裹增大截面法试件

NRPSW 拟静力试验, 试件在开裂、屈服、峰值和破坏四个阶段的现象如下(图 10):

(1)开裂, 在水平力达到 120 kN 之前, 外包加固层表面没有明显损伤, 处于弹性工作状态; 正向水平力达到 120 kN 时, 外包加固层距地梁顶部 700 mm 处(拼缝处) 出现第一条水平裂缝;

(2)屈服, 开裂裂缝出现后, 试件回零改用位移控制, 循环三次. 前三级加载中受拉区裂缝由底部向上开展, 每级加载循环后裂缝出现部分水平延长. 位移加载至 13 mm 时, 正向水平力达到 203 kN, 应变采集显示竖向边缘钢筋受拉屈服;

(3)峰值, 墙体与外包加固部分出现分离, 且有继续扩大的趋势, 墙底角处裂缝变宽且出现多条分支裂缝, 位移加载至 40 mm 时, 荷载达到最大值 249 kN;

(4)破坏, 位移 60 mm 时, 外包加固层钢筋网片外侧混凝土部分剥落, 此时拼缝处主裂缝宽度达到 3 mm, 外包加固层与原墙体脱离, 钢筋网片被拉断, 墙体失去外包层约束, 正向和负向水平荷载低于峰值荷载的 85%, 加载结束. 试件表现为压弯破坏.

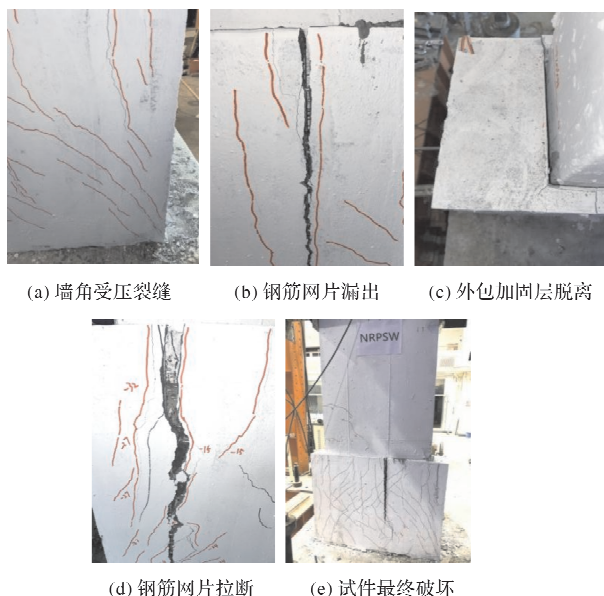


图 10 NRPSW 试件破坏图

Fig. 10 NRPSW specimen failure diagram

5 试验结果分析

因为 PSW1 为无缺陷装配式剪力墙试件, 所以将 CRPSW、NRPSW 试件的试验结果均与 PSW1 试件对比, 综合评价两种方法修复的震损剪力墙的抗震性能.

5.1 滞回曲线

通过拟静力试验得到 PSW1, CRPSW, NRPSW 的滞回曲线, 如图 11. 通过比较滞回曲

线, 可以发现:

(1)试件 CRPSW 在屈服前, 荷载位移曲线狭长, 随变形的加大, 滞回环相比 PSW1 表现出较明显的捏拢效应, 随着曲线斜率减小, 刚度因反复荷载开始退化, 峰值荷载后, 位移增加, 残余变形增大, 如图 11(b);

(2)NRPSW 试件在加载初期, 荷载与位移基本成线性关系, 滞回环相比 PSW1 稍显尖瘦, 试件处于弹性阶段, 包围面积小, 耗能能力弱. 试件 NRPSW 进入屈服后, 表现出一定的强度强化, 滞回环面积不断变大, 耗能能力增强. 在达到峰值位移时, 滞回曲线包围面积进一步增大, 峰值之后试件承载力下降缓慢, 无明显的捏拢效应, 试件 NRPSW 表现出较好的耗能和延性特征, 如图 11(c).

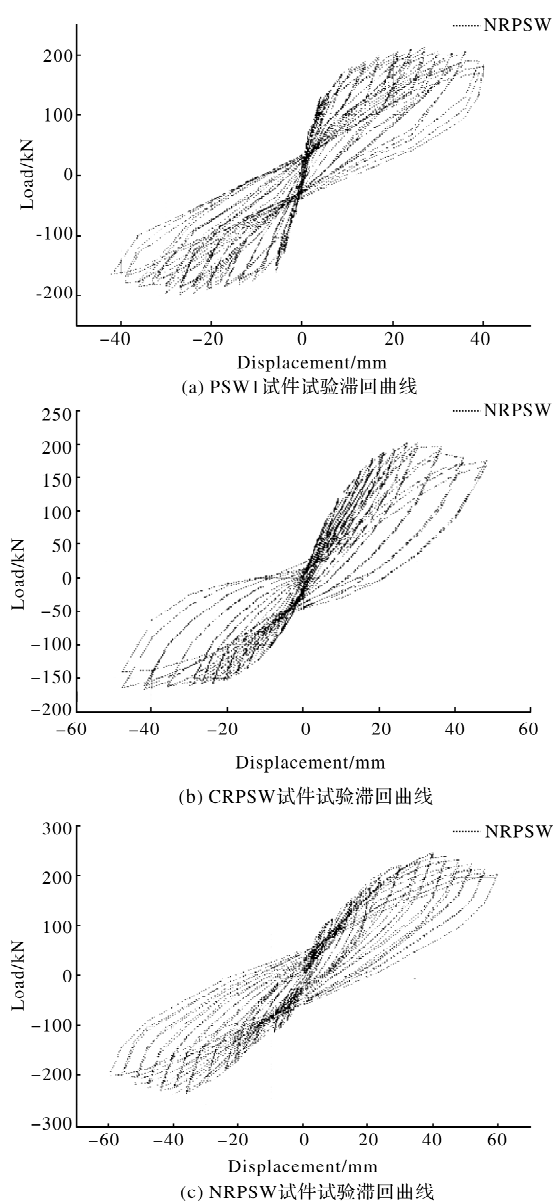


图 11 三片剪力墙试件试验滞回曲线

Fig. 11 Hysteresis curve of three shear wall specimens

5.2 骨架曲线与承载力分析

由试验可以得出各试件承载力信息, 详见表 1, 骨架曲线如图 12. 试件正向荷载稍大于反向荷载, 分析其原因是试件在正向加载后先产生损伤, 反向加载能力降低. 试件 CRPSW 正向屈服荷载较

原试件 PSW1 上升了 5%, 负向屈服荷载较试件 PSW1 下降了 8%, 正向和负向峰值荷载较试件 PSW1 分别下降 4%和 15%, 正向极限荷载较试件 PSW1 分别下降 2%, 负向极限荷载与试件 PSW1 相近.

表 1 各试件承载力信息表

Tab. 1 Information table of bearing capacity of each specimen

试件 编号	开裂荷载 /kN		开裂位移 /mm		屈服荷载 /kN		屈服位移 /mm		峰值荷载 /kN		峰值位移 /mm		极限荷载 /kN		极限位移 /mm	
	正	负	正	负	正	负	正	负	正	负	正	负	正	负	正	负
PSW1	120	120	2.8	3.1	170	160	9.84	10.41	212	197	26	26	179	164	40	42
CRPSW	120	120	4.1	4.3	179	147	11.68	11.25	203	167	30	42	175	165	48	48
NRPSW	120	120	5.0	5.2	203	189	13.23	13.89	249	230	40	40	205	195	60	60

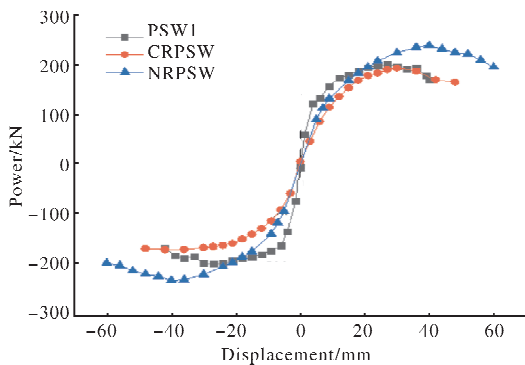


图 12 试件骨架曲线

Fig. 12 Skeleton curve of specimen

试件 NRPSW 在承载力上升更为明显, 正向和负向屈服荷载较试件 PSW1 分别上升 19%和 18%, 正向和负向峰值荷载较试件 PSW1 分别上升 17%和 16%, 正向和负向极限荷载较试件 PSW1 分别上升 14%和 18%. 可见试件通过植筋增大截面法加固后, 承载力提高.

5.3 刚度退化

通过试验得到的峰值荷载值及其对应的位移, 可计算试件在不同加载时刻的刚度变化. 试件 PSW1 与试件 CRPSW, NRPSW 割线刚度下降比较见图 13.

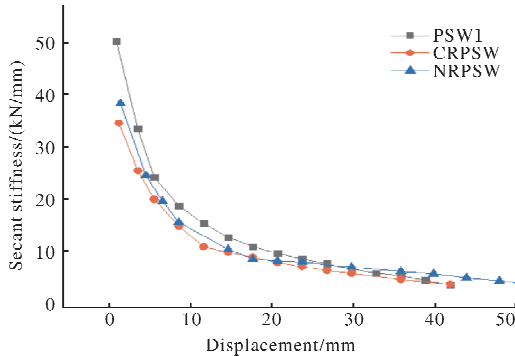


图 13 割线刚度

Fig. 13 Secant stiffness

(1) 与试件 PSW1 相比, 试件 CRPSW 和 NRPSW 的初始刚度较小, 分别为初始试件刚度的 69.2%和 76.5%, 一是因为墙体内部存在震损后没有修补的微裂缝, 二是高强灌浆料的弹性模量比普通混凝土低;

(2) 试件 PSW1 与试件 CRPSW, NRPSW 的割线刚度随着水平的继续增加而不断下降, 试件 NRPSW 的割线刚度下降速率小于试件 PSW1.

5.4 延性系数

通常用位移延性系数来衡量构件延性的大小, 即指构件承载力下降到 85%最大承载力时的极限位移与其屈服位移之比. 表 2 为试件 PSW1 与试件 CRPSW, NRPSW 的正向加载及反向加载时的位移延性系数. 通过比较可知, 采用高强灌浆料修复的试件 CRPSW 较原试件 PSW1 屈服位移和极限位移正方向分别上升了 18%和 20%, 负方向上升了 8%和 14%. 采用增大截面法修复的试件 NRPSW 较原试件 PSW1 屈服位移和极限位移正方向分别提高了 34%和 50%, 负方向提高了 33%和 42%, 说明试件 CRPSW 和 NRPSW 的延性都高于试件 PSW1.

表 2 各试件延性信息表

Tab. 2 Ductility information table of each specimen

试件 编号	屈服位移/mm		极限位移/mm		延性系数	
	正方向	负方向	正方向	负方向	正方向	负方向
PSW1	9.84	10.41	40	42	4.07	4.03
CRPSW	11.68	11.25	48	48	4.11	4.27
NRPSW	13.23	13.89	60	60	4.54	4.32

5.5 能量耗散能力

试件耗散的能量可以用滞回曲线的面积反映, 面积越大, 结构的耗能性能越好图 14(a). 等效黏

滞阻尼系数可以反映耗能能力, 计算公式如下。

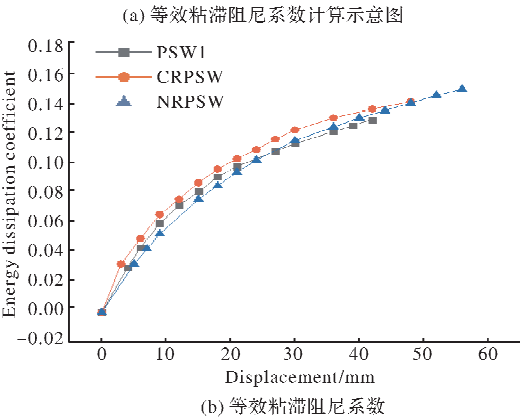
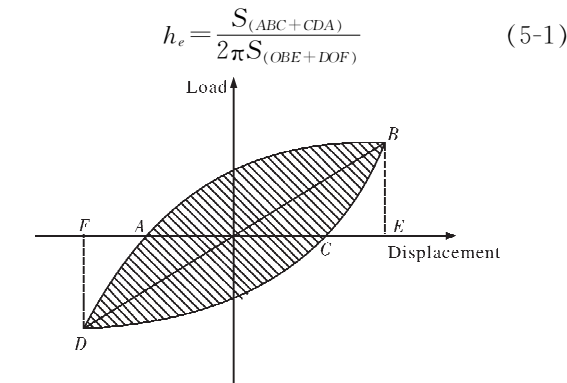


图 14 等效黏滞阻尼系数计算示意图及试验黏滞阻尼系数

Fig. 15 Calculation diagram of equivalent viscous damping coefficient and experimental viscous damping coefficient

表 3 等效黏滞阻尼系数

试件编号	PSW1	CRPSW	NRPSW
等效黏滞阻尼系数	0.128	0.140	0.151

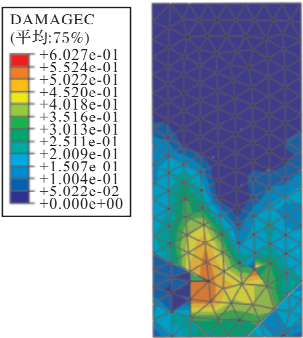
由图 14(b)可知, 试件屈服前耗能较小, 屈服后耗能增加. PSW1 试件的等效黏滞阻尼系数最大为 0.128, 高强灌浆料修复的试件 CRPSW 等效黏滞阻尼系数较 PSW1 上升了 9%, 植筋增大截面法修复的试件 NRPSW 等效黏滞阻尼系数较 PSW1 上升了 20%(表 3). 可以得出, 通过两种方式加固修复后的试件的耗能能力都有提高。

5.6 有限元多参数分析

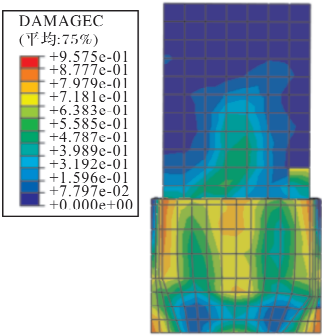
为进一步研究修复震损装配式短肢剪力墙抗

震性能试验, 采用 ABAQUS 有限元进行分析, 选取合适的有限元模型参数, 建立模型, 模拟试验条件加载, 模拟结果与试验结果对比分析(表 4), 确定模型的有效性。

试件 CRPSW 和 NRPSW 的有限元模拟的混凝土受压损伤, 钢筋骨架应力图和套筒应力图如图 16 所示, 由图分析可以得到, CRPSW 试件首先在新旧混凝土接触面处开始破坏, 这与试验时的破坏现象相符, 试验后期, 试件会随着位移的持续加载塑性铰上移, 破坏时剪力墙底部被压溃, 钢筋弯曲. NRPSW 试件首先从外包加固层开始破坏, 破坏位置与试验外包加固层开始出现裂缝位置一致, 墙体失去外包层约束后破坏. 有限元模拟的结果与试验结果的破坏形态相同。



(a) CRPSW有限元模拟结果



(b) NRPSW有限元模拟结果

图 16 有限元模拟结果

Fig. 16 Finite element simulation results

表 4 有限元承载力信息表

Tab. 4 Information table of finite element bearing capacity

试件编号	轴压比	屈服荷载/kN	屈服位移/mm	峰值荷载/kN	峰值位移/mm	极限荷载/kN	极限位移/mm
PSW1*	0.15	178	10.79	222.46	26	193.57	40
CRPSW*	0.15	188	13.35	225.27	30	190.92	48
NRPSW*	0.15	216	15.01	292.31	40	250.35	60
CRPSW**	0.35	192	11.92	242.15	24	207.24	42
CRPSW***	0.55	211	12.26	265.17	21	218.32	36
NRPSW**	0.35	230	13.60	339.64	36	263.64	56
NRPSW***	0.55	246	14.07	380.65	30	264.86	52

6 结论

本文采用两种震损剪力墙修复方法,高强度灌浆料置换破损混凝土和植筋增大截面并包裹钢筋网片法,其施工方便、造价低。通过拟静力试验和有限元分析,得到了不同方式修复震损装配式预制剪力墙抗震性能参数,主要得到以下结论:

(1)采用高强灌浆料置换破损混凝土修复后的试件 CRPSW 与原装配式剪力墙试件的破坏特征都为压弯破坏,两侧钢筋屈服,墙底部角部压溃;采用增大截面法修复后的试件 NRPSW 为压弯破坏,外包层内的钢筋网片拉断之后达到极限承载力,外包层在加载末期与墙体分离,充分发挥了钢筋网片的约束作用;

(2)试件 CRPSW 较之原试件 PSW1,震损装配式剪力墙经过加固后的承载能力基本得到恢复,在保证承载能力的前提下,剪力墙的延性提高,墙体耗能能力得到提高。试件 NRPSW 对比原试件 PSW1,修复的外包层在加载中发挥了很好地约束作用,试件承载力得到提高,试件有更好的延性;

(3)通过对修复震损装配式短肢剪力墙试验试件进行有限元分析,得到不同轴压比下两种震损修复方法的剪力墙试件抗震性能,分析结果表明,较大的轴压比会导致延性降低,但采用两种修复方法的剪力墙承载力都有显著提高,NRPSW 试件比 CRPSW 试件的延性和承载力都更高;

(4)修复后的试件耗能能力和延性都有提高。可根据震损情况确定相应的修复方法,提高结构的震损修复效率和质量。

参考文献 References

[1] 梅许江,苏明周,石韵等.角钢加固剪力墙墙肢底部试验研究.西华大学学报(自然科学版),2012,31(5),86-90
MEI Xujiang, SU Mingzhou, SHI Yun et al. Experimental study on the bottom of shear wall limbs strengthened by angle steel[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2012, 31(5), 86-90.

[2] 潘亮,刘伯权,雷拓,等.RC空间框架结构竖向倒塌分析模型及验证[J].长安大学学报(自然科学版),2018,38(3):64-70,79.
PAN L, LIU BQ, LEI T et al. RC space frame structure vertical collapse analysis model and validation[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2018, 38(03): 64-70, 79.

[3] LI B, LIM C L. Tests on seismically damaged reinforced concrete structural walls repaired using fiber-reinforced polymers[J]. Journal of Composites for Construction, 2010, 14(5), 597-608

[4] 张远森,余江滔,陆洲导,等.ECC修复震损剪力墙抗震性能试验研究.工程力学,2015,32(1),72-80
ZHANG Yuanmiao, YU Jiangtao, LU Zhouguang et al. Experimental study on the seismic performance of ECC repaired seismic damaged shear walls[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(1), 72-80.

[5] 刘香,薛鸿杰,吕鹏.加固受损装配式短肢剪力墙抗震性能研究[J].建筑结构,2019,49(11):28-32,13
LIU Xiang, XUE Hongjie, LV Peng. Study on seismic performance of reinforced damaged assembled short-limb shear walls[J]. Building Structure, 2019, 49(11): 28-32+13.

[6] 李如博,蒋隆敏,王球.CFRP网复合砂浆加固短肢剪力墙连梁抗震性能试验研究[J].湖南工业大学学报,2020,34(3):49-55.
LI Rubo, JIANG Longmin, WANG Qiu. Experimental study on the seismic performance of CFRP mesh composite mortar reinforced short limb shear wall connecting beams[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2020, 34(03): 49-55.

[7] 冷玉坤,刘均利,余文成等.高强灌浆料加固既有RC梁抗弯性能分析[J].华侨大学学报(自然科学版),2022,43(1):51-58.
LENG Yukun, LIU Junli, YU Wencheng et al. Analysis of flexural performance of existing RC beams reinforced with high-strength grout[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science Edition), 2022, 43(01): 51-58.

[8] 余文成,王子恒,刘均利,等.灌浆料加固钢筋混凝土偏心受压柱研究[J].洛阳理工学院学报(自然科学版),2021,31(3):44-49,72.
YU Wencheng, WANG Ziheng, Liu Junli, et al. Research on reinforcing reinforced concrete eccentric compression columns with grout[J]. Journal of Luoyang Institute of Technology (Natural Science Edition), 2021, 31(03): 44-49, 72.

[9] 廖新雪,林文修,黎桢君,等.单、双面增大截面法加固剪力墙抗震性能对比研究[J].建筑结构,2017,47(S2):395-399.
LIAO Xinxue, LIN Wenxiu, LI Anjun et al. Comparative study on the seismic performance of shear walls strengthened by single and double-sided increased section method [J]. Building Structure, 2017, 47(S2): 395-399.

(编辑 桂智刚)