

增大截面法加固震损预制装配式 剪力墙的抗震性能试验

刘 香,张国丰,宋 浩,李 娟

(内蒙古科技大学建筑与土木工程学院,内蒙古 包头 014010)

摘 要 目的 采用增大截面法加固已震损预制装配式剪力墙,并对其进行抗震性能研究,为现有工程中类似构件加固提供设计依据。方法 采用力与位移混合加载制度对震损预制装配式剪力墙进行低周反复荷载试验。结果 经过合理和可靠的加固,试件的破坏形态为压弯破坏;加固后的预制剪力墙承载力有所提高,并且具有良好的延性变形和耗能性能。研究表明,加固后的装配式剪力墙抗震性能与受损前基本一致。结论 对于预制装配式剪力墙来说,采用增大截面法是有效的抗震加固方法。

关键词 预制装配式剪力墙;震损;增大截面法;抗震性能;加固

中图分类号 TU375

文献标志码 A

Research on Seismic Behavior of Earthquake-damaged Pre-cast Shear Wall Strengthened by Enlarging Cross-section

LIU Xiang, ZHANG Guofeng, SONG Hao, LI Juan

(School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, China, 014010)

Abstract: Seismic behavior of earthquake-damaged pre-cast shear wall specimen with full scale strengthened by enlarging cross-section method was studied in this paper, so as to provide references for the engineering field. Earthquake-damaged pre-cast shear wall were tested under cyclic loading. In this loading system, force and displacement control were used. The experimental results show that after reasonable and reliable reinforcement, the failure modes of the wall was compression and bending failure; the pre-cast shear wall had a improvement effect on increasing the ultimate bearing capacity after strengthened, while maintaining good ductile deformation and energy dissipation ability. The study indicated that the seismic performance of rehabilitated pre-cast shear wall before seismic damage under a certain damage level. Enlarging cross-section is very effective seismic strengthening method for pre-cast shear wall.

收稿日期:2018-03-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51768056);内蒙古自治区自然科学基金项目(2013MS730);包头市科技局计划项目(2014X1003-1)

作者简介:刘香(1964—),女,教授,主要从事结构动力分析、混凝土结构抗震等方面研究。

Key words: pre-cast shear wall; seismic damage; enlarge cross-section; seismic behavior; strengthen

预制装配式剪力墙结构是当前结构工程界研究热点,其特点符合可持续发展、绿色节能的建设要求^[1-2].在欧美等发达国家,对预制混凝土结构的研究成果较多^[3-6],预制装配式混凝土剪力墙结构建筑已十分普及,并且在地震中表现出了良好的抗震性能,很多预制装配式剪力墙结构几乎没有被破坏,局部加固修复后就可以恢复使用^[7],所以合理的加固修复对于震损结构而言十分重要.目前国内对加固钢筋混凝土剪力墙结构的抗震研究取得了一定的成果^[8-14],国外的加固剪力墙技术也很成熟^[15-18],但对于预制装配式剪力墙结构震损后的加固研究并不多见.基于此,笔者对震损后预制装配式剪力墙采用增大截面法加固,然后对其进行拟静力试验.研究表明,加固后的预制剪力墙承载力有所提高,并且具有良好的延性变形和耗能性能,对于预制装配式剪力墙来说,采用增大截面法是有效的抗震加固方法.

1 试 验

1.1 试件设计

试件 PW 取于包头市改造工程某单元楼施工图,配筋、混凝土强度、钢筋强度等均与原设计一致,试件尺寸及配筋见图 1.后浇拼缝位于地梁上方 600 mm 处,下部墙体与地梁支模浇筑,上部墙体与加载梁支模浇筑,下部墙体预留出 120 mm 的钢筋与上部墙体钢筋采用直螺纹套筒灌浆连接.钢筋均采用 HRB400 级钢,选用 C30 商品混凝土,采用材质为铸铁的 D-16 直螺纹灌浆套筒,长度 120 mm,外径 47 mm,宽口端钢筋容许长 100 mm.套筒内部与后浇拼缝处灌注专用 E40 灌浆料,28 d 轴心抗压强度可达到 80 MPa,流动度 ≥ 190 mm,膨胀率为 0 ~ 0.38%.试件在实验室组装完成后进行低周

反复荷载试验,加载过程中保持竖向荷载为 450 kN,轴压比为 0.18.

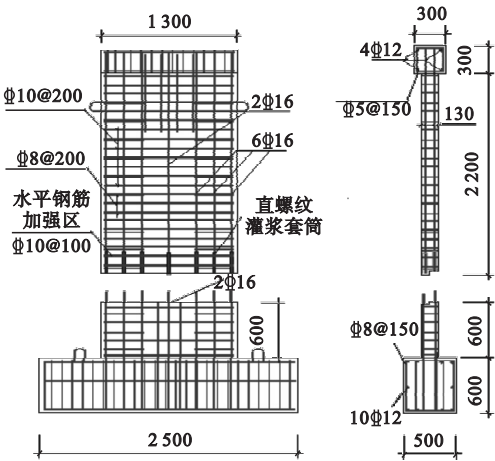
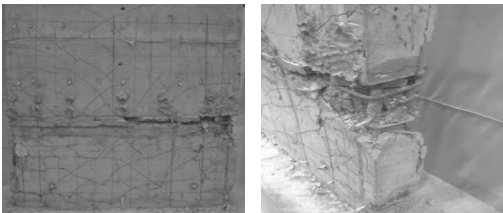


图 1 试件 PW 尺寸及配筋图

Fig. 1 Size and reinforcement of specimen

1.2 受损分析

试件 PW 的混凝土强度采用回弹法判定,混凝土抗压强度约为 30 MPa.墙体裂缝集中在地梁以上 1 800 mm,且分布不均匀,大多数裂缝宽度在 0.4 ~ 1 mm,在距地梁顶部 700 mm 处有一条宽为 4 ~ 6 mm 的贯通裂缝,贯通缝处以上主要以斜裂缝为主,以下主要以水平裂缝为主.当试件 PW 顶端位移达到 ± 68 mm、位移角为 1/41 时,顶层水平荷载分别为 296.2 kN 和 -304.7 kN,墙底角部和拼缝处混凝土脱落,部分钢筋外露,竖向钢筋均已屈服,且后浇拼缝处的最外侧竖向钢筋已发生弯曲变形,属于严重损伤状态.试件破坏形态见图 2.



(a) 裂缝分布 (b) 墙角破坏

图 2 试件 PW 破坏形态

Fig. 2 Failure patterns of specimen

2 试件加固及试验方案

2.1 加固方法

试件 PW 采用增大截面法加固,墙两侧暗柱用钢筋网片双面加固,加固层宽 520 mm,植入 4 根直径为 12 mm、间距 150 mm 纵向钢筋.在加固层纵筋外侧沿墙高设置 U 形箍筋,箍筋间距 150 mm,加密区间距 75 mm,与纵筋焊接形成封闭矩形环.在钢筋外面灌入 45 mm 厚的 E40 灌浆料,加固区高度 1 850 mm.考虑到地梁钢筋较为密集,且施工技术有限,试验没有将钢筋直接植入到地梁里,而是选择钢筋与角钢焊接,然后将角钢粘贴在剪力墙底部并用化学锚栓固定.角钢选用 Q235 级 160 mm×160 mm×10 mm 等边角钢,8.8 级 M8 和 M16 化学锚栓,锚栓布置满足文献[19]构造要求.截面及配筋如图 3 所示,加固后试件编号为 JGPW.试件加固制作流程:材料及设备准备→角钢定位,化学螺栓孔定位并钻孔→墙面凿毛并剔除松动混凝土→清理孔洞→焊接加固层钢筋网→安装并固定钢筋网→支模、灌浆及养护.

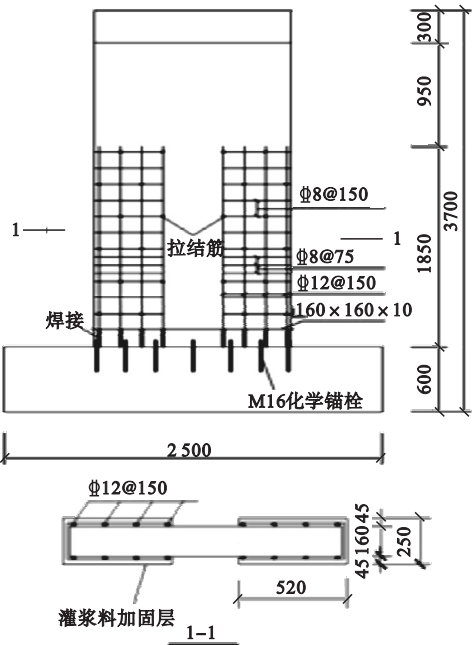


图 3 加固后试件 JGPW 截面
Fig. 3 Strengthened pre-cast wall section

2.2 材性试验

钢筋均选用 HRB400 级钢,钢材选用 Q235 级钢,屈服强度、极限强度和弹性模量实测力学性能见表 1.采用 E40 灌浆料,浇筑时预留 3 组 40 mm×40 mm×160 mm 试件,与加固后的剪力墙同条件养护,实测力学性能见表 2.

表 1 钢材力学性能

Table 1 Material properties of steel

钢材	直径和厚度/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/GPa
纵筋 HRB400	12	434	584	201
箍筋 HRB400	8	487	597	201
角钢 Q235	10	330	465	200

表 2 灌浆料实测强度

Table 2 Grouting material measured

时间/d	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa
3	34	4.5
7	50	8.1
28	65	8.9

2.3 加载方案和测量内容

加载装置如图 4 所示.为了模拟实际墙体上端传来的竖向荷载和水平无约束情形,加载系统包括竖向和水平加载系统两部分.试验开始时先在加载梁上端施加竖向荷载,预压后加至 450 kN 后保持恒定不变.竖向千斤顶顶端与反力架之间有一个滑槽,可随试件水平位移而水平滑动,使竖向荷载恒定竖直向下.水平荷载通过 MTS 电液伺服作动器施加,作用在剪力墙加载梁两端,加载点与顶梁的轴心重合,加载时规定千斤顶外推时为“+”,向内拉时为“-”.将承力架调到适当高度,然后用吊车将试件吊装入加载区域,根据红外线定位仪的定位将试件调节至指定位置,用 4 个地脚螺栓锚固在地下室顶板孔内,以保证试件在加载时水平加载方向没有位移产生.



图 4 加载装置

Fig. 4 Loading device

试验采用力 - 位移混合控制的加载制度,墙体屈服以前采用力控制加载,每级加载 20 kN,加载后每级往复一次;墙体屈服后进行水平位移控制加载,每级 2.5 mm,往复三次;以墙体顶部加载点水平力下降至峰值荷载的 85% 以下,或当顶点水平位移足够大时,停止加载. 试验测量内容主要有试件顶梁加载点的水平位移、墙体不同高度的水平位移、开裂荷载、屈服荷载、极限荷载以及钢筋、钢板应力应变关系. 应变片布置见图 5,位移计布置见图 6.

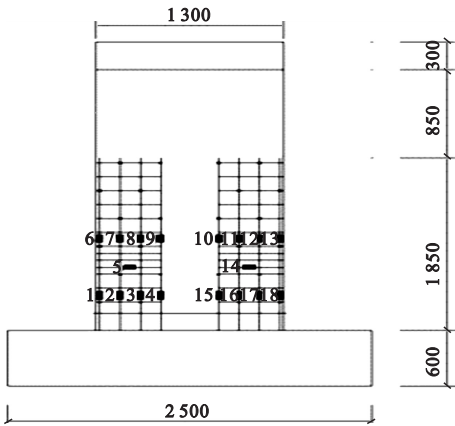


图 5 试件加固层钢筋应变片布置图

Fig. 5 Specimens of reinforced layer steel strain gauge layout

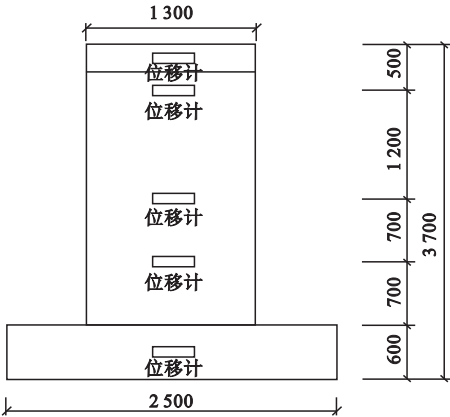


图 6 位移计布置图

Fig. 6 Layout of displacement meter

2.4 破坏过程

试件在水平力达到 120 kN 之前,加固层表面没有明显损伤,处于弹性工作状态;水平推力达到 120 kN 时,西侧加固层距地梁顶部 700 mm 处(拼缝处)出现了第一条水平裂缝;拉力达到 140 kN 时,东侧拼缝处也出现横向裂缝;水平力达到 180 kN 时,拼缝处的裂缝增长,墙体产生许多新裂缝,集中在距地梁顶部 1 000 mm 范围内. 随后试件进入到位移加载阶段,墙体加固层距地梁顶部 700 mm范围内有多条横向裂缝产生,且拼缝处的裂缝沿水平方向延伸;加载至 ± 22.5 mm时,拼缝处的裂缝贯穿整个加固层,并向墙面延伸,宽度达到 0.5 mm;顶部位移 ± 30 mm 时,拼缝处裂缝宽度达到 1 mm,混凝土开始局部脱落,原有横向裂缝开始斜向 45°发展;顶部位移 ± 45 mm 时,墙体底部角钢与粘钢胶出现分离现象,墙底角处裂缝变宽且出现多条分支裂缝;顶部位移 ± 60 mm时,试件脚部加固层大部分混凝土开始受压脱落,加固层钢筋网片最外侧钢筋裸露,此时拼缝处主裂缝宽度达到 2 mm. 当墙体顶端水平位移达到 68 mm 时,正向水平荷载达到峰值荷载的 85%,而负向水平荷载仍能达到峰值的 90%,加载结束. 试件表现为压弯破坏,钢筋受拉屈服,混凝土被压碎,拼缝处出现一条较为明显、宽度较大的通缝.

试件破坏形态如图 7 所示.

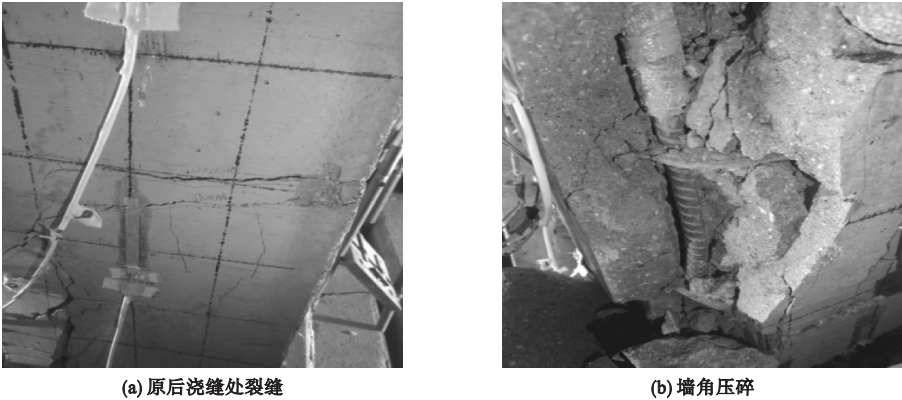


图 7 试件破坏状态

Fig. 7 Failure pattern of specimen

3 结果分析

3.1 滞回曲线

试件 JGPW 在低周反复荷载下滞回曲线如图 8 所示. 从图中可以看出, 加载初期, 试件滞回曲线环绕面积较小, 处于线弹性阶段, 残余应变小, 对其卸载后试件恢复原有状态; 继续对试件加载, 试件进入弹塑性阶段、塑性阶段, 滞回曲线随位移的增加由弓型向反 S 型过渡, 并伴有轻微的捏缩现象; 随着位移逐级增加, 试件滞回曲线所包围的面积逐渐增大, 滞回曲线形状呈现较为饱满的梭形, 具有较好的耗能能力.

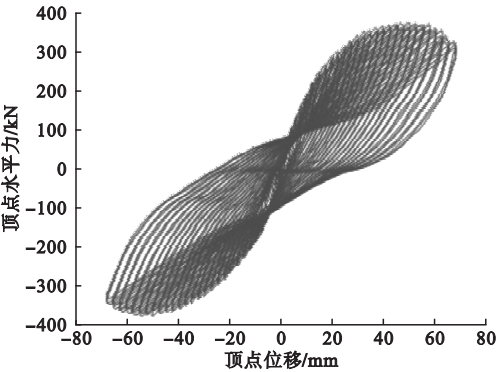


图 8 试件滞回曲线

Fig. 8 Hysteretic curves of specimen

3.2 骨架曲线对比分析

为便于比较, 将试件加固前后骨架曲线绘于图 9. 根据骨架曲线, 可得到试件特征点

对应结果(见表 3). 由骨架曲线和各特征点对比分析得到:

(1) 试件两次加载过程中都经历了弹性、弹塑性和破坏 3 个阶段, 且弹性阶段和弹塑性阶段的过渡并不明显. 试件 JGPW 与 PW 的正向骨架曲线变化基本一致, 负向骨架曲线在进入弹塑性后略有差别, 但基本趋势相近.

(2) 试件 JGPW 的开裂荷载比 PW 提高了 16.4%, 开裂位移提高了 8.9%, 峰值荷载提高了 6.0%, 峰值位移提高了 43.1%, 极限荷载提高了 6.9%, 极限位移仅降低 0.1%. 说明增大截面法加固可以有效提高剪力墙的力学性能, 钢筋网对试件的承载力也起到了主要作用.

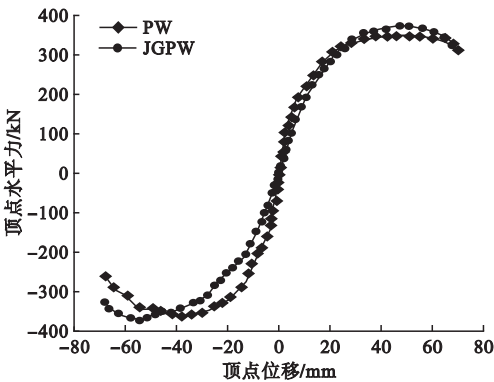


图 9 试件骨架曲线

Fig. 9 Skeleton curves of specimens

表 3 试件骨架曲线各特征点

Table 3 Each feature point of the specimen skeleton curve

试件	方向	开裂荷载/kN	开裂位移/mm	峰值荷载/kN	峰值位移/mm	极限荷载/kN	极限位移/mm
PW	正向	114.8	1.97	348.4	35.71	296.2	68.12
	负向	107.6	3.05	358.5	37.70	304.7	67.87
JGPW	正向	134.1	5.43	374.6	50.22	313.1	67.80
	负向	132.2	5.62	373.9	54.47	328.4	68.09

3.3 刚度退化对比分析

试件刚度退化曲线如图 10 所示。

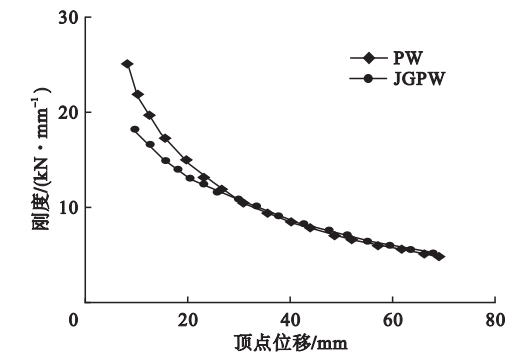


图 10 试件刚度退化曲线

Fig. 10 Stiffness degradation curves of specimens

由图可知,试件在加载过程中,刚度变化程度大致相同,都随着位移的变大而减小,加固后塑性变形阶段刚度退化性能较好。试件

在开裂后,刚度快速减小,试件 JGPW 的初始刚度略低于 PW 的初始刚度;进入屈服阶段后刚度依然减小,但是速度较缓;继续对其加载刚度下降比较缓慢,此时试件 JGPW 的刚度退化曲线与 PW 刚度退化曲线基本重合,反映出加固后的试件可以恢复到原来的刚度退化性能。

3.4 延性系数对比分析

延性是指材料的结构、构件或构件的某个截面从屈服开始到达最大承载能力以后,承载能力还没有明显下降期间的变形能力。用延性系数 μ (85%峰值荷载对应的位移与屈服位移之间的比值)表示。试件各特征值的层间位移角 $\theta=\Delta/H$ 和延性系数 μ 见表 4,其中 $H=2\,800\text{ mm}$ 。

表 4 各特征点层间位移角和位移延性系数

Table 4 Inter-story drift ratio and ductility coefficient

试件编号	开裂位移角	屈服位移角	峰值位移角	极限位移角	延性系数
PW	1/1 115	1/319	1/76	1/41	7.74
JGPW	1/467	1/291	1/54	1/41	6.73

从表 4 可以看出,试件 JGPW 的开裂位移角大于 PW 的开裂位移角,说明增大截面法使用的灌浆料对限制试件的开裂效果较为明显。试件 JGPW 比 PW 的延性系数仅降低了 13%。由于增大了墙体截面尺寸,改变了试件整体的结构效应,所以会对结构的延性变形能力有一定的影响。但试件 JGPW 峰值位移角为 1/54、极限位移角为 1/41,体现了较好的弹塑性变形能力,满足“大震不倒”的

抗震要求。

3.5 耗能性能对比分析

能量耗散系数用某循环滞回环所包围的面积与滞回环卸荷段至横坐标之间三角形面积之比来定义^[20]。表 5 给出了试件加固前后,在各个位移点处的能量耗散系数。可以看出,试件 JGPW 的能量耗散系数与 PW 大致在同一水平上,说明加固后试件依然具有较好的耗能性能。

表 5 试件在各位移循环处的能量耗散系数

Table 5 Energy dissipation coefficients at various stages of displacement

试件	各位移点处对应能量耗散系数					
	位移 10 mm	位移 20 mm	位移 30 mm	位移 40 mm	位移 50 mm	位移 60 mm
PW	0.35	0.44	0.57	0.79	1.06	1.10
JGPW	0.38	0.49	0.58	0.71	0.85	0.97

4 有限元模拟

笔者采用 ABAQUS 对本次试验进行模拟,验证试验结果的准确性,在此基础上改变试验材料相关参数,对比不同参数下加固受损预制装配式剪力墙的抗震性能.

4.1 模型建立

为减少计算步,模拟时采用荷载-位移混合加载制度,每级只循环一次.混凝土、拼缝处的灌浆料和加固层的灌浆料均采用三维八节点六面体减缩积分实体单元 C3D8R,钢筋采用二节点三维线性桁架单元 T3D2,在满足研究需要与计算精度前提下,对模型进行合理简化,以改善模型收敛性并提高计算

效率.计算过程中,认为墙体与地梁和加载梁之间结合紧密,不存在滑移;忽略钢筋与混凝土、粘结剂与相邻材料之间的粘结滑移.各部分部件进行组装时,加载梁与上部墙体之间、地梁与下部墙体之间、套筒与相邻材料之间均采用 tie 命令进行绑定,钢筋与混凝土之间采用 embedded 命令进行固定,边界条件则是固定地梁的地面.将加固预制装配式剪力墙的加固层定义成生死单元,在第一个荷载步求解中,将加固层杀死,使其不参与工作,在第二个荷载步中重新激活加固层单元,使其参与受力,从而达到实际受力的效果.增大截面加固的 JG1 试件模型如图 11 所示.

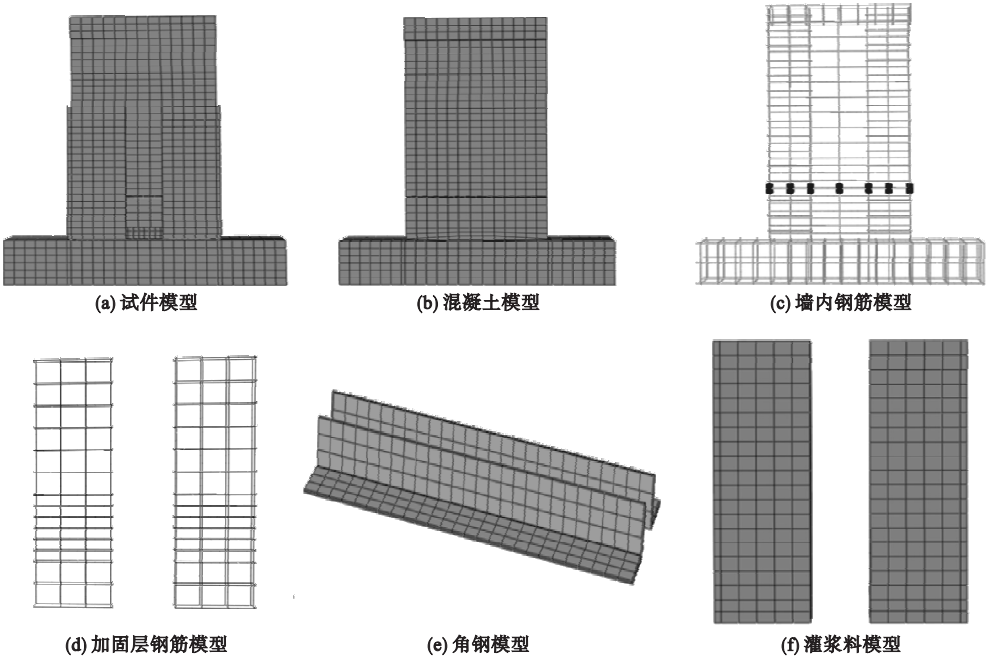


图 11 JG1 有限元模型

Fig. 11 JG1 finite element model

4.2 结果分析

通过对 JG1 施加低周反复荷载,得到加

固层灌浆料 Mises 应力云图如图 12 所示,加固层钢筋 Mises 应力云图如图 13 所示.

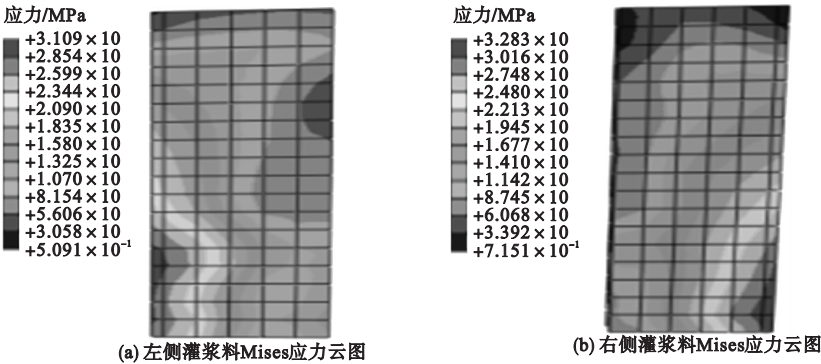


图 12 灌浆料 Mises 应力云图

Fig. 12 Mises stress plot of grouting material

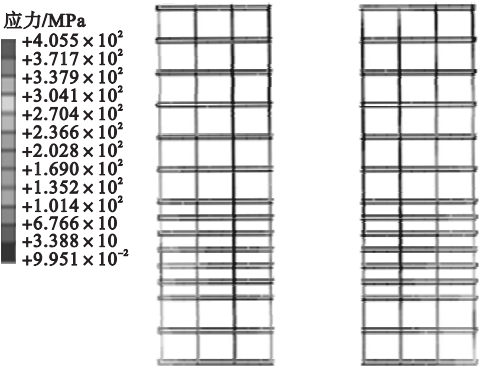


图 13 钢筋 Mises 应力云图

Fig. 13 The stress plot of reinforced Mises

图 12 与图 13 为 JG1 达到峰值时加固层灌浆料和钢筋的应力云图. 从图中可以看出,墙底部角部灌浆料应力最大,主要集中在距地梁顶部 600 mm 范围内;加固层最外侧钢筋应力最大,主要集中在试件中下部. 模拟结果与试验破坏形态规律较为符合,证明了有限元模拟的合理性.

5 结 论

(1)震损试件经过加固后表现出了较好的受力性能,基本恢复到受损前的抗震性能. 加固后扩大截面的部分在加载中发挥了主要受力作用,试件表现出压弯的破坏特征,墙底部角部加固层灌浆料脱落,钢筋外露并屈服.

(2)试件在低周反复荷载下经历了弹

性、屈服和极限 3 个阶段,滞回曲线呈现较为饱满的梭形,加固前后骨架曲线的变化基本一致. 开裂荷载提高了 16.5%,峰值荷载提高了 5.9%,极限荷载提高 6.8%,说明增大截面法可以提高试件的承载力.

(3)试件的刚度退化、延性和能量耗散系数等与震损前相比大致处在同一水平上. 峰值位移角为 1/54,极限位移角为 1/41,延性系数 μ 为 6.73,体现了较好的延性变形能力.

(4)从耗能、承载力、延性等方面来看,加固后的试件基本恢复原来的抗震性能. 因此对震损预制装配式剪力墙采用增大截面法是一种有效的抗震加固方法,可以满足抗震要求.

参考文献

[1] 刘康. 预制装配式混凝土建筑在住宅产业化中的发展及前景[J]. 建筑技术开发,2015,42(1):7-14.
(LIU Kang. Development and outlook of assembled precast concrete building in housing industrialization[J]. Building technique development,2015,42(1):7-14.)

[2] 刘聪,张宏,朱宏宇,等. 装配式绿色建筑设计[J]. 城市建筑,2017(13):33-35.
(LIU Cong, ZHANG Hong, ZHU Hongyu, et al. Prefabricated green building design [J]. Urban construction,2017,(13):33-35.)

[3] SMITH B J, KURAMA Y C, MCGINNIS M J.

- Design and measured behavior of a hybrid precast concrete wall specimen for seismic regions [J]. Journal of structural engineering, 2011, 137(10):1052-1062.
- [4] PEREZ F J, PESSIKI S, SAUSE R. Experimental lateral load response of unbounded post-tensioned precast concrete walls[J]. ACI structural journal, 2013, 110(6):1045-1055.
 - [5] 纪颖波. 我国住宅新型建筑工业化生产方式研究[J]. 住宅产业, 2011(6):7.
(JI Yingbo. Residential new building industrialization production mode research in China [J]. Residential industry, 2011(6):7.)
 - [6] ZHANG Wenying, MAHDAVIAN M, YU Cheng. Different slit configuration in corrugated sheathing of cold-formed steel shear wall [J]. Journal of constructional steel research, 2018, 150:430-441.
 - [7] SHADRAVAN S, RAMSEYER C C. Investigation of wood shear walls subjected to lateral load[J]. Structures, 2018, 16:82-96.
 - [8] 邓宗才, 曾洪超. 层内混杂 FRP 加固混凝土剪力墙抗震性能试验[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(10):1504-1508.
(DENG Zongcai, ZENG Hongchao. Experiment on seismic performance of reinforced concrete shear walls strengthened with hybrid FRP[J]. Journal of Beijing university of technology, 2012, 38(10):1504-1508.)
 - [9] ZHOU Jing, FANG Xiaodan, YAO Zhengqin. Mechanical behavior of a steel tube-confined high-strength concrete shear wall under combined tensile and shear loading[J]. Engineering structures, 2018, 171:673-685.
 - [10] 梅许江, 苏明, 周石韵, 等. 角钢加固剪力墙墙肢底部试验研究[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2012, 31(5):86-90.
(MEI Xujiang, SU Ming, ZHOU Shiyun, et al. Experimentation research on application of angle steel in reinforcement of limb base of a shear wall[J]. Journal of xihua university(natural science), 2012, 31(5):86-90.)
 - [11] 王希端. 聚合物砂浆预应力钢丝绳抗弯加固 RC 旧桥研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学 2017.
(WANG Xiduan. Study on reinforced RC old bridge of polymer mortar prestressed steel wire rope[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.)
 - [12] 潘鹏, 邓开来, 李吉超, 等. 低配筋剪力墙单边抗震加固试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2013, 41(4):471-476.
(PAN Peng, DENG Kailai, LI Jichao, et al. Experimental study on single side strengthening of low-reinforced shear wall [J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2013, 41(4):471-476.)
 - [13] 封卉梅. 不同类型片材加固剪力墙性能比较研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2011.
(FENG Huimei. Comparative research on behavior of reinforced concrete shear wall strengthened with different types of sheet [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2011.)
 - [14] 郭宇. 开洞剪力墙力学性能及加固技术研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2012.
(GUO Yu. Study on mechanical properties and reinforcement technology of shear wall with opening [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2012.)
 - [15] WOODS J E, LAU D T, LI W. Measuring strain fields in FRP strengthened RC shear walls using a distributed fiber optic sensor[J]. Engineering structures, 2017, 152:359-369.
 - [16] MOSALLAM A S, NASR A. Structural performance of RC shear walls with post-construction openings strengthened with FRP composite laminates[J]. Composites part B: engineering, 2017, 488-504.
 - [17] XIE Zhiqiang, YAN Weiming, YU Cheng. Experimental investigation of cold-formed steel shear walls with self-piercing riveted connections [J]. Thin-walled structures, 2018, 131:1-15.
 - [18] 王强, 路炯, 侯康康, 等. 用于剪力墙滞回性能分析的材料本构模型研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(3):402-409.
(WANG qiang, LU Jiong, HOU Kangkang, et al. Research on material constitutive model for analysis of hysteretic performance of shear wall [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018, 34(3):402-409.)
 - [19] 中冶京诚技术有限公司. 钢结构设计规范: GB50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
(China Metallurgical Jing Cheng Technology Co. Ltd. Code for design of steel structures: GB50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.)
 - [20] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范: GB50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
(China Academy of Building Research. Code for seismic design of buildings: GB50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.)