DOI:10.11918/202112059

新型装配式剪力墙抗震性能试验

樊禹江[1,2],葛 俊[2],艾斌平[2],熊二刚[2],王社良[3]

(1.长安大学 建筑学院,西安 710061;2.长安大学 建筑工程学院,西安 710061;
3.西安建筑科技大学 土木工程学院,西安 710055)

摘 要:针对强震作用下典型装配式剪力墙结构的破坏机理和薄弱环节,提出一种具有耗能减震功能的新型装配式剪力墙。采用模型试验和数值模拟相结合的方法,设计制作了4片缩尺比1∶1.54、剪跨比1.52的新型装配式剪力墙试件,并对其进行了相应的抗震性能试验,系统分析了螺栓数量、轴压比和边缘构件纵筋配筋率对试件破坏模式、滞回性能、承载能力、变形性能、刚度退化及耗能能力的影响规律。试验结果表明:各试件破坏模式与相同剪跨比的现浇剪力墙基本一致,呈弯剪型破坏;但新型装配式剪力墙具有更为优异的滞回性能和耗能能力,其在破坏点的耗能值显著高于普通现浇墙体;当螺栓数量减少时,新型装配式剪力墙承载能力无明显变化,但滞回性能降低、墙体变形加剧;轴压比或边缘构件纵筋配筋率的降低会导致剪力墙承载能力降低和极限位移增大。最后采用ABAQUS软件建立了相应试件的有限元模型,模拟结果与试验结果吻合较好,表明所建模型的正确性,能够将其应用于新型装配式剪力墙的分析之中。

关键词:装配式剪力墙;耗能减震;抗震性能;有限元分析
中图分类号:TU375 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2023)05-0078-10

Experimental study on seismic behavior of a new fabricated shear wall

FAN Yujiang[1,2], GE Jun[2], AI Binping[2], XIONG Ergang[2], WANG Sheliang[3]

(1. School of Architecture, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 3. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Considering the failure mechanism and weaknesses of traditional fabricated shear wall structures under strong earthquakes, a new type of fabricated shear wall with functions of energy dissipation and shock absorption was proposed. On the basis of model test and numerical simulation, seismic performance tests were carried out on four specimens with scale ratio of 1∶1.54 and shear span ratio of 1.52. Further analysis was conducted to investigate the effects of bolt number, axial compression ratio, and reinforcement ratio of edge members on the seismic performance of the new fabricated shear wall, including failure modes, hysteretic performance, bearing capacity, displacement ductility, stiffness degradation, and energy dissipation capacity. Test results show that the four specimens experienced shear compression failure, which was the same as the cast-in-place shear wall with the same shear span ratio. However, the proposed shear wall had better hysteretic performance and energy dissipation capacity, and the energy dissipation capacity was higher than that of the cast-in-place shear wall at the failure point. When the number of bolts decreased, the hysteretic performance of the new fabricated shear wall decreased, the wall deformation increased, while the bearing capacity remained almost unchanged. When the axial compression ratio or reinforcement ratio of edge members decreased, the bearing capacity decreased, and the ultimate displacement increased. Finally, the finite element model of the specimens was established by ABAQUS program. Comparisons of numerical results and test results showed a good agreement, verifying the correctness of the model, which can be applied to the analysis of the new fabricated shear wall.

Keywords: fabricated shear wall; energy dissipation and shock absorption; seismic performance; finite element analysis

装配式建筑凭借其绿色、节能、可持续发展等优势成为中国现阶段的重要发展方向。作为装配式建筑的重要组成部分,装配式剪力墙结构同样迎来了巨大发展契机[1-4]。为此,诸多学者基于“等同现浇”的要求,针对装配式剪力墙常用水平连接方法进行了大量理论与试验研究,得出了一些可供工程应用参考的研究结论和设计构造建议[5-8]。但这些仍很难避免在较大地震作用下装配式剪力墙结构首

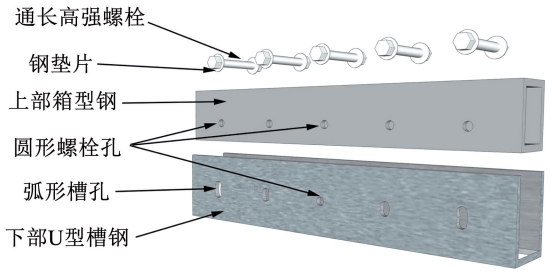
收稿日期:2021-12-14;**录用日期**:2022-04-18;**网络首发日期**:2022-08-30
网络首发地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20220830.1231.002.html
基金项目:国家自然科学基金青年项目(51808046);陕西省重点研发计划(2023-YBSF-315)
作者简介:樊禹江(1987—),男,副教授,硕士生导师
通信作者:樊禹江,fanyujiangchd@163.com

先破坏于水平连接，之后承载力迅速降低的问题。因而有必要探索一种新型装配式剪力墙水平连接方法，改善或改变传统水平连接处的受力行为，从而提高装配式剪力墙的抗震性能。邵旭东等[9]将 UHPC 灌浆材料应用于套筒接头，通过重力式灌浆技术有效降低了不利施工因素导致的节点连接薄弱风险；赵斌等[10]提出一种“螺栓 - 钢连接件 - 套筒”形式的水平接缝方案，并进行了低周往复加载试验，结果表明，该水平接缝方案可有效传递钢筋内力，同时为墙体提供可靠的竖向连接；李宏男等[11-12]将提出的耗能阻尼器应用于装配式剪力墙，通过放大阻尼器部位变形进而减小水平连接部位的应力集中，保证了水平连接部位的稳定；马哲昊等[13-14]基于“摇摆耗能”理论，将提出的人工消能塑性铰节点应用于预制结构，并完成了拟静力试验和数值模拟，结果表明，人工消能塑性铰能够有效地将塑性损伤控制在节点附加钢板上，大大降低了墙体及水平接缝部位损伤；黄远等[15]在无黏结预应力预制剪力墙墙角处设置了耗能角钢，较大地提高了预制墙体的耗能能力；张锡治等[16]提出了一种复合齿槽 U 型筋搭接连接装配式剪力墙，相应的抗震性能试验结果表明，该连接方案可靠，同时对墙体底部具有强化作用。

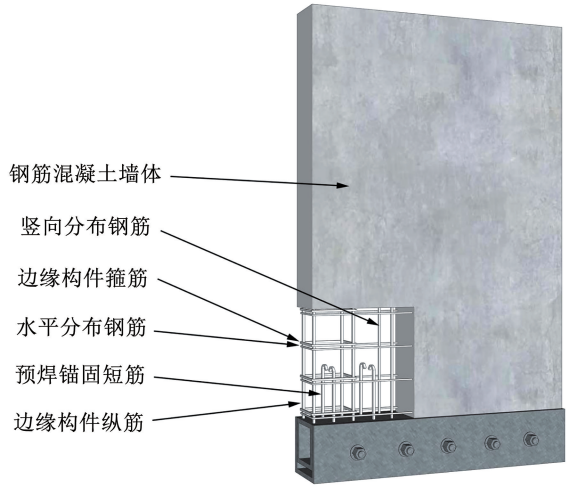
在上述研究的基础上，本文提出了一种新型装配式剪力墙结构，使其具有足够承载力的同时，亦能够依靠水平连接装置摩擦耗能，进而保护主体结构。设计制作了 4 片缩尺比 1∶1.54、剪跨比 1.52 的新型装配式剪力墙试件，并对其进行了相应抗震性能试验，系统研究不同螺栓数量、轴压比和边缘构件纵筋配筋率条件下各试件破坏模式、滞回性能、承载能力、变形性能、刚度退化及耗能能力等变化规律，最后基于试验结果建立了相应结构有限元分析模型。上述研究所得新型装配式剪力墙结构减震机理和一般规律，为相应结构地震响应分析和优化设计方法提供了理论基础，同时为其在高烈度地区的推广应用提供了技术支撑。

1　新型装配式剪力墙设计与构造

本文提出的新型装配式剪力墙由普通钢筋混凝土墙体、上部箱型钢、下部 U 型槽钢、摩擦钢垫片及高强螺栓组成。其中上部箱型钢、下部 U 型槽钢通过钢垫片及高强螺栓连接以构成水平摩擦抗剪装置，具体构造见图 1。箱型钢与 U 型槽钢均选用 Q345 钢板，根据尺寸要求裁切、焊接而成。箱型钢上表面预焊弯钩角度 135°，弯钩长度为 $4d$（d 为锚固短筋直径）的带肋钢筋，再将剪力墙内部钢筋网架端部焊接于上部箱型钢板上，最后浇筑混凝土。箱型钢两边对称开设 5 个直径 33 mm 圆形孔，U 型钢板中心位置开设直径 33 mm 圆形孔，两侧开设宽度为 33 mm，±2° 的圆弧形螺孔滑道，通过直径为 30 mm的通长高强螺栓连接。对于该新型装配式剪力墙，当其遭受较小水平荷载时，整体等同于现浇剪力墙；当结构遭受较大水平荷载时，剪力墙协同水平装置发生摩擦转动，由水平装置大量消耗外部能量；当结构转动至限位点后，整体结构等同现浇墙体，结构所受剪力及弯矩由装置限位与上部墙体共同承担。



(a) 水平连接装置



(b) 新型装配式剪力墙

图 1　新型装配式剪力墙构造设计

Fig. 1　Structural design of new fabricated shear wall

2　试验概况

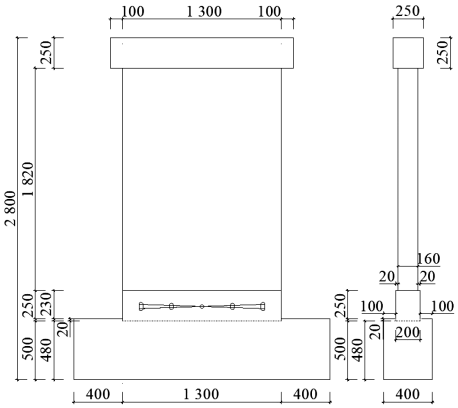
2.1　试件设计

设计制作了 4 片缩尺比例为 1∶1.54 的新型装配式剪力墙试件，具体尺寸为 1 300 mm（长）×160 mm（厚）×1 820 mm（高），剪跨比 1.52，混凝土等级 C30，钢筋等级 HRB400，其余参数见表 1，典型试件 PFSW 尺寸及配筋见图 2。

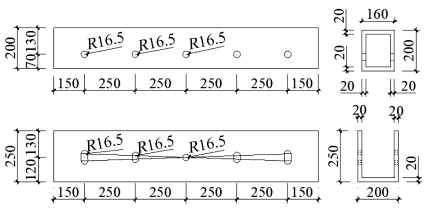
表 1　试件设计参数

Tab. 1　Design parameters of specimens

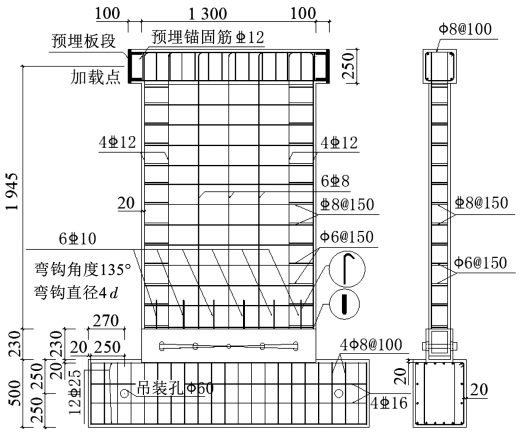
编号	轴压比	边缘构件纵筋配筋率/%	螺栓数量/个	螺栓等级
PFSW	0.25	1.40	5	10.9
PFSWB-3	0.25	1.40	3	12.9
PFSWA-0.15	0.15	1.40	5	10.9
PFSWS-0.98	0.25	0.98	5	10.9



(a) 试件尺寸



(b) 水平连接装置尺寸



(c) 配筋详图

图 2　典型试件 PFSW 尺寸及配筋

Fig. 2　Dimensions and reinforcement arrangement of specimen PFSW

2.2　材性试验

现场浇筑试件时，采用同批次 C30 混凝土。留注标准立方体试块各 3 组，并在同等条件下养护，试验测得其立方体抗压强度 30.7 MPa，弹性模量 30 900 N/mm^2。对于钢筋材性，针对直径 8 mm、10 mm及 12 mm 的 HRB400 级钢筋分别留取 3 根，通过钢材拉伸试验，依次得到钢材屈服强度，抗拉强度和弹性模量，见表 2。

表 2　钢筋力学性能

Tab. 2　Mechanical properties of steel bars

型号	直径/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/10^5 MPa
HRB400	8	525	638	1.98
	10	486	604	2.05
	12	513	655	2.02

2.3　试验加载及测量方案

试验于西安建筑科技大学教育部结构与抗震重点实验室进行。具体试验时，首先对高强螺栓施加一定预紧力以避免竖向加载时试件发生损伤，之后采用 1 000 kN 液压千斤顶对试件施加竖向荷载，具体为 371.8 kN(PFSWA-0.15)和 619.7 kN(PFSWB-3、PFSW、PFSWS-0.98)。持荷约 1 min，待试件稳定后，采用 1 000 kN MTS 液压作动器对试件施加水平低周往复荷载，加载制度见图 3。具体采用位移控制，并依据规范[17]设计了 3 个加载阶段：1)阶段Ⅰ，水平位移为 15 mm，螺栓预紧力共 8 级，具体以 20 kN为增量施加 110 kN 至 250 kN 的预紧力，每一级预紧力下位移循环加载 3 次；2)阶段Ⅱ，水平位移依次为 30 mm、60 mm、70 mm、80 mm，螺栓预紧力控制为 250 kN，每级位移加载循环一次；3)阶段Ⅲ，当在某一方向加载至实验室滚轴装置无法继续工作或作动器水平荷载急剧下降，反方向亦无法满足继续加载要求时，认为试件达到极限状态并停止试验。

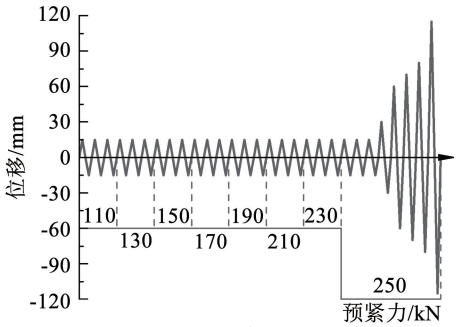
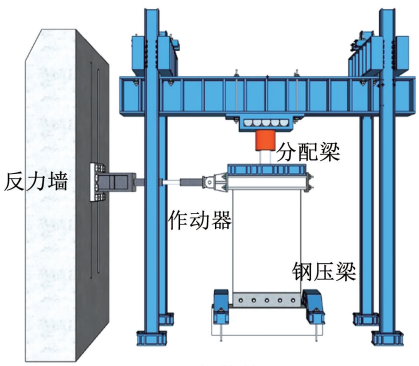


图 3　加载制度

Fig. 3　Loading history

试验加载见图 4。试件底梁两端布置钢压梁，通过地锚螺栓与刚性底座连接固定，MTS 作动器连接于试件上部加载梁西侧，规定外推为正，内拉为负。采用两个量程分别为 0 ~ 500 N·m、720 ~ 2 000 N·m 的扭矩扳手对高强螺栓施加预紧力，并通过压力传感器标定预紧力与相应扭矩的关系，压力数值通过压力传感器显示终端获取，扭力数据由扭矩扳手读出，螺栓预紧力与扳手扭矩关系见图 5。在水平荷载加载阶段Ⅰ，为防止预紧力衰退产生误差，每级预紧力均在循环加载后通过扭矩扳手复拧。



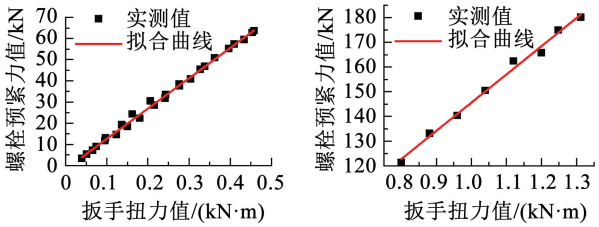
(a) 加载装置



(b) 加载现场

图 4　试验加载

Fig. 4　Test setup



(a) 0~500 N·m　　(b) 720~2 000 N·m

图 5　预紧力－扭矩关系曲线

Fig. 5　Preload-torque relation curves

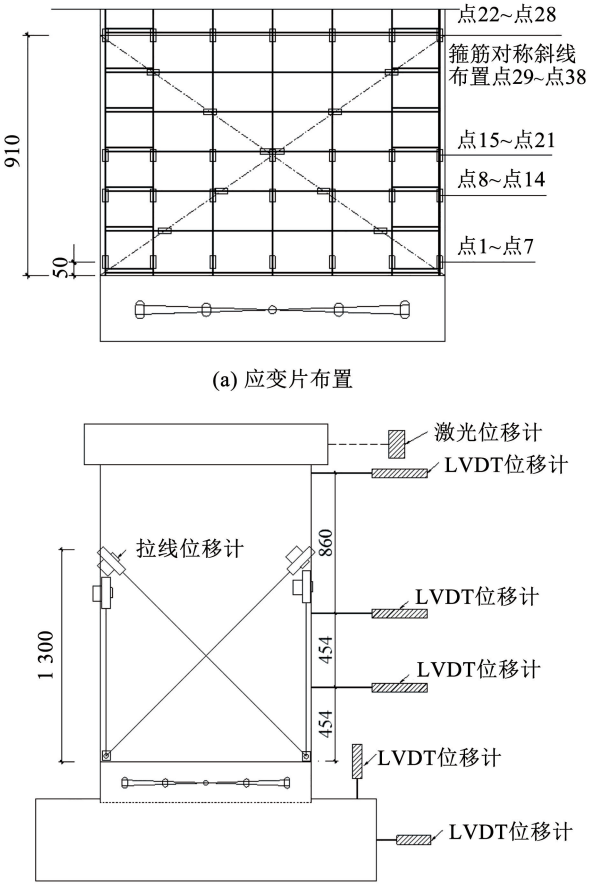
对试件下半部墙体钢筋及 U 型钢板螺孔周围进行应变监测，两侧对称布置应变片，同时，沿剪力墙高度分布 3 个 LVDT 位移计，以获取墙体水平方向变形，距墙体底部 1 945 mm 位置布设激光位移计，与作动器内置感应器对比以提高精度。距 U 型钢板上部 1 300 mm 处采用 3M 胶固定拉线位移计，以监测加载过程中试件弯曲及剪切变形；在底梁顶部及端部分别布设高灵敏 LVDT 位移计，监测底梁是否存在滑移，应变片及位移计布置见图 6。

3　试验现象及分析

3.1　试验现象

试件 PFSW。加载阶段Ⅰ：当预紧力加载至 170 kN时，东西两侧墙角出现第一条微小裂缝；当预紧力加载至 250 kN 时，距 U 型钢板上方约 150 mm 的墙角处出现水平及斜向裂缝，原有微小裂缝与水平裂缝呈贯通趋势；加载阶段Ⅱ：当水平荷载达到 165.4 kN 时，水平裂缝开始横向贯通，墙体受拉侧出现新的裂缝，同时 TDS540 监控器显示受拉钢筋开始屈服；加载阶段Ⅲ：正向加载至 99 mm 时，墙角受压区混凝土脱落，外侧纵筋暴露；反向加载至 99 mm时，墙体“X”型主裂缝部位出现最大宽度为 5 mm裂缝；继续加载至约 114.8 mm 时，水平荷载无法维持，试验结束。

试件 PFSWB-3。加载阶段Ⅰ：试件未出现裂缝，混凝土及钢筋仍处于弹性阶段；加载阶段Ⅱ：当水平荷载达到 109 kN 时，U 型钢板上侧混凝土墙体开始出现多条裂缝，裂缝在墙角处呈半圆形；当水平荷载达到 200 kN，U 型钢板上侧混凝土墙体出现新的水平裂缝，原有裂缝缓慢斜向发展；当加载至 80 mm，约 2/3 墙高处出现向下发展且逐渐变宽的斜向裂缝，受压墙角部位混凝土开始脱落；加载阶段Ⅲ：正向加载至 122.07 mm，受压墙角一侧出现宽度为 4 mm 的裂缝；反向加载至 95.1 mm，墙体主要裂缝呈“X”型，墙角处混凝土破碎严重，边缘纵筋弯曲严重；继续加载至 122.1 mm，水平荷载骤降，试验结束。



(a) 应变片布置

(b) 位移计布置

图 6　测点布置

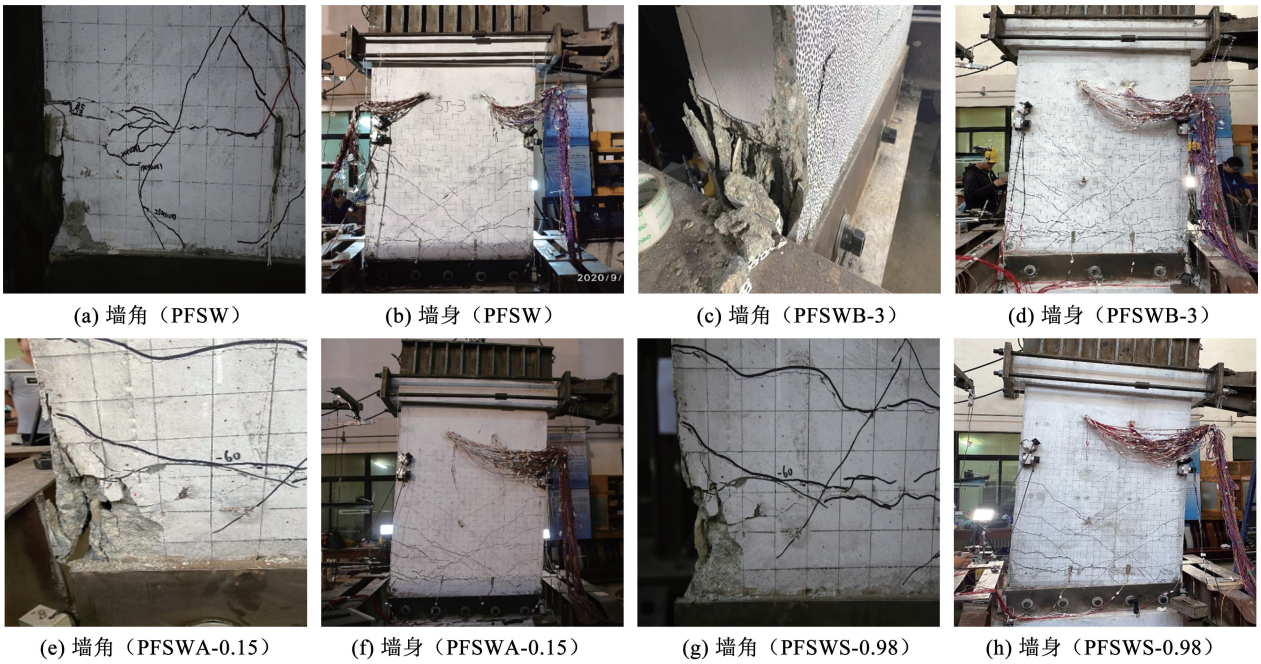
Fig. 6　Layout of strain and displacement gauges

试件PFSWA-0.15。加载阶段Ⅰ：当预紧力加载至 150 kN 时，墙角处出现第一条微小裂缝；预紧力加载至 250 kN，墙角处裂缝逐渐贯通，观测到最外侧受拉钢筋应变明显增大；加载阶段Ⅱ：加载至 60 mm，距 U 型钢板上侧 250 mm 处形成呈横向贯通趋势的水平裂缝；加载阶段Ⅲ：正向加载至 100 mm，墙角受压区出现宽度为 6 mm 的裂缝；反向加载至 116 mm，墙体受拉侧出现最大宽度为 11 mm 的横向裂缝，墙体主要裂缝呈“X”型；继续加载至 150 mm，滚轴装置无法继续滑动，试验结束。

试件 PFSWS-0.98。加载阶段Ⅰ:当预紧力加载至 150 kN 时,受拉侧墙角端部开始出现微小裂缝;当预紧力加载至 250 kN 时,受拉侧墙角裂缝逐渐向下开展,同时受拉侧墙体表面出现宽度为 0.15 mm 的裂缝;加载阶段Ⅱ:加载至 55 mm,约 1/4 墙高处出现新的斜向裂缝;加载阶段Ⅲ:正向加载至 87 mm 时,距 U 型钢板上侧 200 mm 处出现宽度为 7 mm 的裂缝;反向加载至 120 mm 时,在“X”型主裂缝位置出现最大宽度为 4 mm 的裂缝,此时受压区外侧钢筋暴露,混凝土大块脱落;继续加载至 124 mm 时,水平荷载骤降,试验结束。

3.2 试件破坏模式

各试件最终破坏见图 7。4 个试件均为弯剪型破坏,具体表现为斜裂缝开展至墙角处混凝土压溃,边缘构件竖向纵筋屈服,该破坏模式与相同剪跨比设计的普通剪力墙基本一致。在加载完毕后,各试件底部水平连接部位未发生破坏,仅钢垫片与 U 型钢板间有明显磨损,见图 8,表明所设计的新型装配式剪力墙水平连接构造可靠,连接钢板能够在震后重新拆卸组装,可以再次应用。

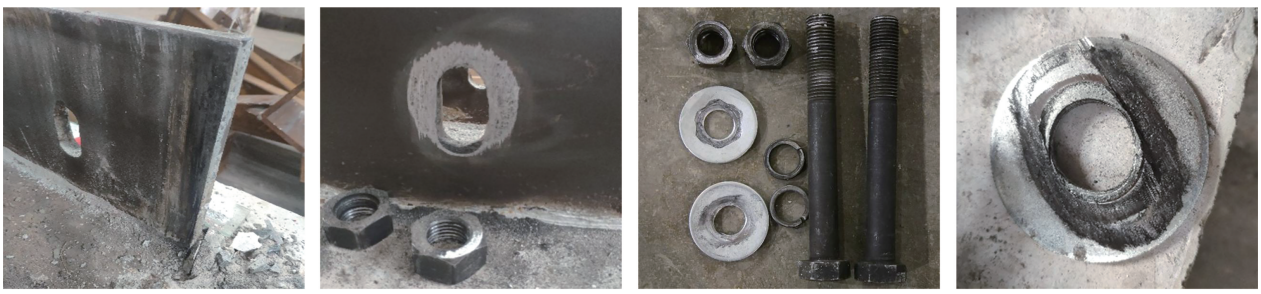


(a) 墙角(PFSW) (b) 墙身(PFSW) (c) 墙角(PFSWB-3) (d) 墙身(PFSWB-3)

(e) 墙角(PFSWA-0.15) (f) 墙身(PFSWA-0.15) (g) 墙角(PFSWS-0.98) (h) 墙身(PFSWS-0.98)

图 7 各试件破坏模式

Fig. 7 Failure modes of specimens



(a) U型槽钢内表面 (b) U型槽钢外表面 (c) 高强螺栓 (d) 钢垫片

图 8 水平连接处磨损情况

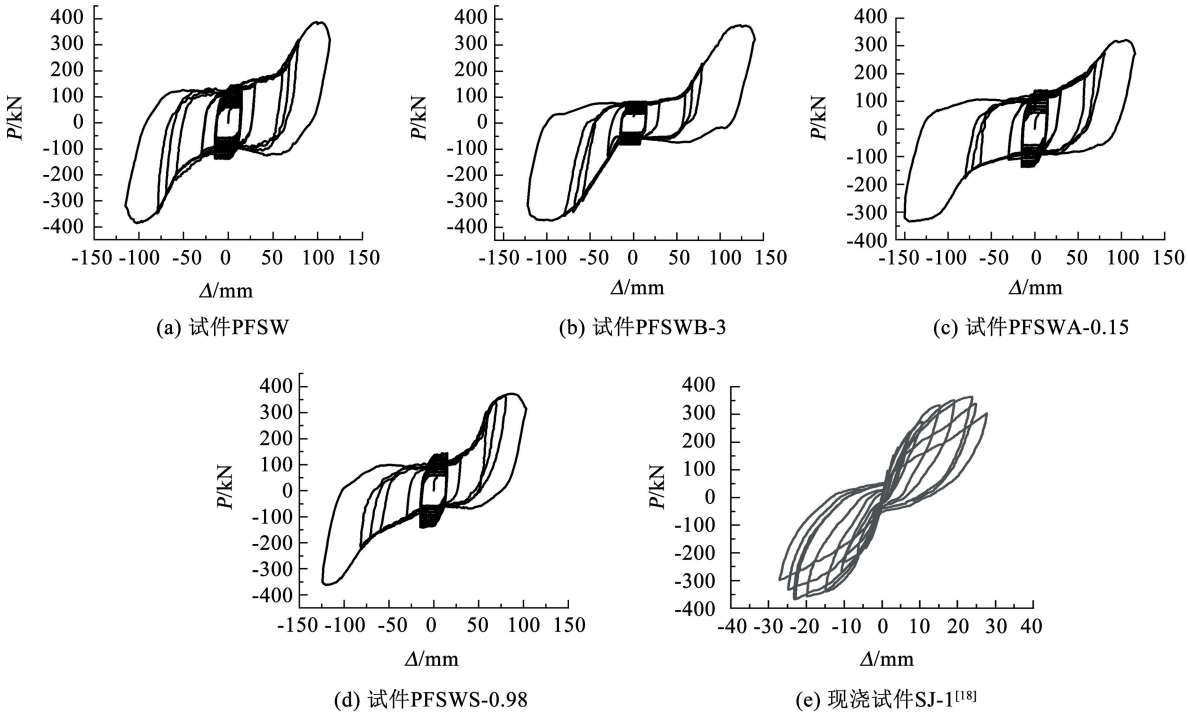
Fig. 8 Damage status of horizontal connection

4 试验结果分析

4.1 滞回性能

由试验数据进一步得到各试件水平荷载 – 位移($P-\Delta$)曲线,见图 9。可以发现,与严涛[18]完成的现浇试件 SJ-1 相比,相同构造的试件 PFSW 曲线更加饱满,具有明显的水平滞回段,且该水平滞回段在加载阶段Ⅰ表现明显,曲线基本呈方形。在水平滞回段内,水平荷载主要由墙体底部箱型钢与 U 型钢间摩擦力承担,墙体损伤程度较低且基本维持。在加载阶段Ⅰ,随着螺栓预紧力的增大,各试件的水平滞回段对应荷载增大,同时,滞回曲线呈“梭形”发

展趋势，耗能能力降低。相较 5 颗螺栓的试件，3 颗螺栓试件 PFSWB-3 的滞回性能较差，曲线“捏缩”更为明显，表明螺栓数量的减少会削弱新型装配式剪力墙的滞回性能。



(a) 试件PFSW　(b) 试件PFSWB-3　(c) 试件PFSWA-0.15

(d) 试件PFSWS-0.98　(e) 现浇试件SJ-1[18]

图 9　各试件荷载 – 位移曲线

Fig. 9　Load–displacement curves of specimens

4.2　骨架曲线

由试验所得滞回曲线结果进一步得到相应骨架曲线，见图 10。

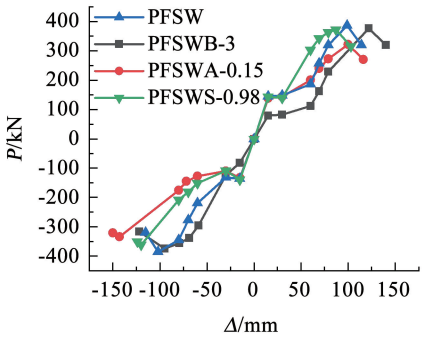


图 10　各试件骨架曲线(预紧力 250 kN)

Fig. 10　Skeleton curves of specimens (preload 250 kN)

可以发现，各试件骨架曲线特征明显，主要分为以下 4 个阶段：1）墙体处于弹性且并未开始滑动时，曲线呈线性增长；2）水平装置协调摩擦转动滑移，骨架曲线几乎水平；3）墙体屈服；4）墙体破坏。

在加载阶段Ⅰ，试件 PFSWB-3 的水平承载力较试件 PFSW 明显降低，说明当预紧力一定时，螺栓数量的减少会削弱钢板间的预紧作用，导致水平承载力降低；在加载阶段Ⅱ，试件 PFSWA-0.98 的弹性刚度较其余 3 个试件恢复更为迅速，说明边缘构件纵筋配筋率对新型装配式剪力墙的工作性能有一定影响。

4.3　承载能力及变形性能

试件的主要特征点见表 3。可以发现，试件 PFSWB-3 的开裂荷载、屈服荷载与试件 PFSW 基本相同，极限荷载较 PFSW 仅降低 2.66%，说明螺栓数量对新型装配式剪力墙承载力影响不大。试件 PFSWA-0.15、PFSWS-0.98的承载能力较试件 PFSW 均有所降低。试件PFSWA-0.15的屈服荷载与极限荷载分别降低22.34%和15.01%，试件 PFSWS-0.98 对应分别降低 9.82% 和 4.85%，说明轴压比或边缘构件纵筋配筋率的降低均对结构承载力有较明显的削弱作用。在螺栓预紧力相等的条件下，由于螺栓数量较少，竖向荷载对试件 PFSWB-3 的偏心作用被放大，试件 PFSWB-3 的变形能力明显大于试件 PFSW；相较试件 PFSW，试件 PFSWA-0.15、PFSWS-0.98 的屈服位移分别降低 10.96% 和 25.34%，但极限位移有所提高。

表 3 主要荷载特征点

Tab. 3 Values of main feature points

试件	开裂点			屈服点		极限点		破坏点
	F_{cr}/kN	F_{Ncr}/kN	加载阶段	F_y/kN	Δ_y/mm	F_m/kN	Δ_m/mm	Δ_u/mm
PFSW	108.4	170	Ⅰ	269.9	73.0	385.70	99.50	114.40
PFSWB-3	109.0	250	Ⅱ	269.9	90.0	375.45	108.59	131.05
PFSWA-0.15	88.5	130	Ⅰ	209.6	65.0	327.80	120.50	133.00
PFSWS-0.98	95.8	150	Ⅰ	243.4	54.5	367.02	103.55	113.50

注：F_{cr}为开裂荷载，F_y为屈服荷载，F_m为极限荷载，Δ_y为屈服位移值，Δ_m为极限点位移值，Δ_u为破坏点位移值，F_{Ncr}为开裂点预紧力值。

4.4 刚度退化

采用割线刚度[19]对螺栓预紧力为 250 kN 时各试件刚度退化情况进行分析，计算见式(1)，剪力墙刚度退化结果见图 11。

$$K_i = \frac{|+P_i| + |-P_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \tag{1}$$

式中：K_i为试件在第 i 级加载时的割线刚度，$+P_i$、$-P_i$分别为试件在第 i 级循环加载时正反方向的峰值点荷载，$+\Delta_i$、$-\Delta_i$分别为试件在第 i 级循环加载时正反方向峰值点位移。

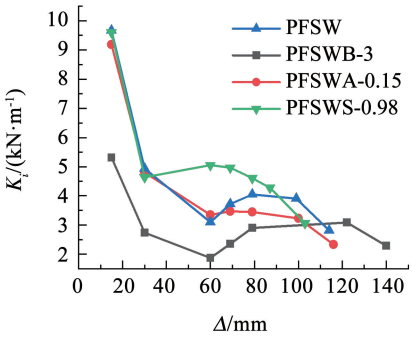


图 11 刚度退化曲线

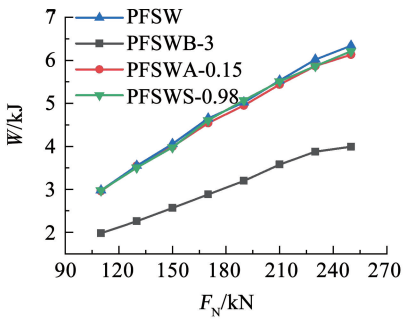
Fig. 11 Stiffness degradation curves

由图 11 可知，各试件刚度退化趋势基本一致，呈先快速下降，再小幅爬升，最后下降的规律。其主要原因如下：当上部墙体发生转动，下部螺栓未达螺孔限位时，由于转动位移对墙体水平侧移的放大作用，导致试件刚度快速下降，而在该过程，墙体无明显损伤，因此对刚度下降无贡献；在加载阶段Ⅱ，下部螺栓由滑动状态达到螺孔限位，处于“卡死”状态，上部墙体此时主要承担了水平荷载，试件刚度再次增大；最后，随着上部墙体裂缝的发展，损伤累积，试件刚度开始下降。

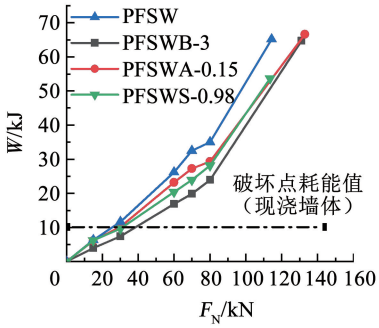
当螺栓预紧力均为 250 kN 时，试件 PFSWB-3 的刚度在加载阶段Ⅰ、Ⅱ均明显小于其余 3 片试件，说明螺栓数量的减少对新型装配式剪力墙刚度有削弱作用；试件PFSWS-0.98的刚度退化速率明显高于其余 3 个试件，说明较低的边缘构件纵筋配筋率不利于墙体刚度的维持；在加载阶段Ⅰ，试件 PFSW 与试件PFSWA-0.15的刚度退化曲线基本重合，但在加载阶段Ⅱ、Ⅲ，试件PFSWA-0.15的刚度退化速率高于试件 PFSW，说明轴压比的提高能够延缓新型装配式剪力墙刚度退化速率。

4.5 耗能能力

由图 9 计算曲线累积滞回面积，分析各试件的累积耗能 W。同时为研究新型装配式剪力墙的耗能效果，将试件 PFSW 与相同构造的现浇普通剪力墙[18]在破坏点的耗能值进行对比，进而得到：1）加载阶段Ⅰ，各试件在不同预紧力 F_N下的累积耗能，见图 12(a)；2）螺栓预紧力为 250 kN，各试件在不同位移加载下的累积耗能，见图 12(b)。



(a) 累积耗能-预紧力曲线



(b) 累积耗能-位移曲线

图 12 耗能曲线

Fig. 12 Energy dissipation curves

由图 12(a)可知，各试件的耗能能力随螺栓预紧力的增大而增大，且在 15 mm 位移等幅加载下基

本呈线性关系。试件 PFSW 的累积耗能值略高于试件PFSWA-0.15和试件PFSWS-0.98，说明在预紧力一定时，轴压比或边缘构件纵筋配筋率的增大能小幅提升试件的耗能能力。此外，试件 PFSWB-3 在各级预紧力下的耗能能力均明显小于其余 3 个试件，说明随着螺栓数量的减少，新装配式剪力墙的耗能能力明显下降。根据经典库仑定律：

$$F_f = \mu F_b \tag{2}$$

$$W_f = F_f S \tag{3}$$

式中：F_f为接触面摩擦力，μ 为摩擦系数，F_b为摩擦面总预紧力，S 为摩擦路径，W_f为摩擦耗能。

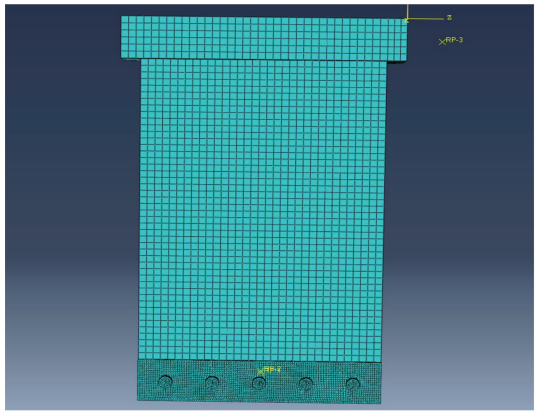
结合式(2)、式(3)可得，在 15 mm 往复加载过程中，墙体仍处于弹性阶段，其对累积耗能贡献极小，认为累积耗能 W 近似等于摩擦耗能 W_f。由于各试件的底部钢板摩擦面尺寸一致，在往复位移相同时，可近似认为各试件摩擦路径 S 相同。因此，螺栓数量的减少直接导致摩擦面总预紧力 F_b减小，使得累积耗能 W 降低。

由图 12(b)可知，预紧力为 250 kN 时，各试件的耗能能力随加载位移的增大而增大。在加载位移相等时，试件 PFSW 的耗能值高于其余 3 片试件，说明轴压比、边缘构件纵筋配筋率的增大能够提高结构耗能能力。现浇墙体[18]在破坏点的耗能值约为 10 150.2 kN·mm，试件 PFSW 在破坏点的耗能值约为 62 366 kN·mm，试件 PFSW 的耗能值约为现浇墙体[18]的 6 倍，表明新型装配式剪力墙较大地提高了剪力墙耗能能力，具有良好的消能减震效果。

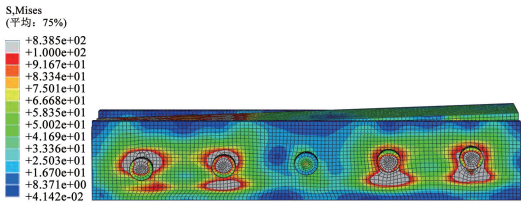
5　有限元模拟分析

5.1　模型建立

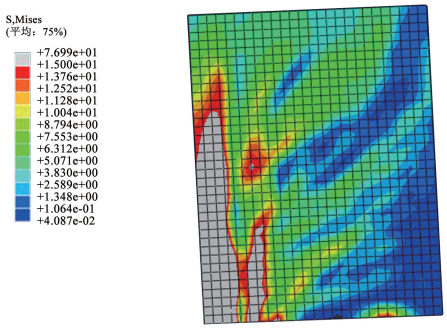
根据前述新型装配式剪力墙拟静力试验结果，采用 ABAQUS 有限元分析软件对其滞回特性进行数值模拟，探讨高精度有限元模型建立方法。混凝土墙板、螺杆及下部装置均采用 C3D8R 单元，墙体内部钢筋采用 T3D2 单元，同时为模拟墙体与下部箱型钢的固端连接，采用墙体内钢筋端部与下部箱型钢单元共用节点的方式，并将其刚度设置为无限大。混凝土本构采用 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》中建议的塑性损伤模型。考虑到试验结果中墙体弹塑性阶段的滞回曲线捏缩较为明显，采用方自虎团队开发的 UMAT 程序[20]确定钢筋本构关系。墙体底部箱型钢与 U 型钢之间采用软件中常规接触属性，模型中接触面摩擦因数取 0.17，同时将 U 型钢中心螺栓作用定义为“铰”以模拟相对转动。为保证高强螺栓在整个加载过程的工作性能，施加每级预紧荷载前均对螺栓与垫片的贴合效果进行验证。典型试件 PFSW 的有限元模型及应力云图见图 13。



(a) 有限元模型



(b) 水平连接装置应力云图



(c) 墙体应力云图

图 13　试件 PFSW 数值模拟

Fig. 13　Numerical simulation of specimen PFSW

5.2　模拟结果分析

图 14 为模拟所得试件 PFSW 的荷载 – 位移曲线与试验结果对比。可以看出，二者整体变化规律基本一致。与试验结果相比，模拟所得试件极限承载力降低约 9.7%，模拟曲线水平滞回段更为平稳，且在加载阶段Ⅱ，墙体弹性刚度恢复更快。分析认为：1)模型所采用的混凝土损伤模型与实际有一定差异，导致加载至较大位移时，模拟结果与墙体实际累积损伤差异变大；2)模拟墙体底部钢板间摩擦转动时，摩擦界面模型趋于均匀化，加之往复加载的低速加载过程放大了实际摩擦界面不均匀的作用效果，导致模拟结果与试验结果存在一定偏差。对比结果总体表明，特征点无明显偏差，模拟结果与试验

结果吻合较好,说明所建模型能够应用于新型装配式剪力墙的模拟分析之中。

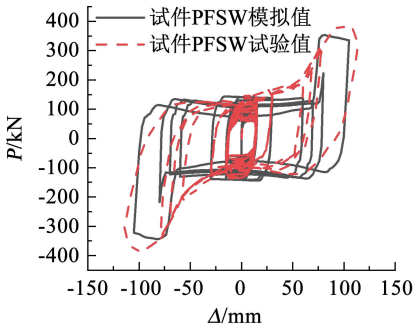


图 14 模拟结果与试验结果对比(试件 PFSW)

Fig. 14 Comparison of numerical and test hysteretic curves (specimen PFSW)

6 结 论

针对提出的新型装配式剪力墙结构,对设计的 4 片试件进行了低周往复荷载试验,根据试验结果系统研究了不同螺栓数量、轴压比和边缘构件纵筋配筋率对所提剪力墙抗震性能的影响。结合试验数据并基于 ABAQUS 软件,进一步探讨了相应的建模方法。具体得出以下结论:

1)新型装配式剪力墙破坏模式与相同剪跨比的普通剪力墙一致,为弯剪破坏。墙体破坏后,其底部水平连接部位未出现损坏,水平连接构造可靠。

2)新型装配式剪力墙滞回曲线饱满,具有明显的水平滞回段,在该阶段,墙体底部钢板摩擦耗散地震能量,进而抑制墙体损伤开展,同时新型装配式剪力墙在破坏点的耗能值显著高于普通现浇墙体,验证了新型装配式剪力墙良好的耗能减震效果。

3)相较典型试件 PFSW,试件 PFSWB-3(配置 3 颗螺栓)的承载力基本不变,但其水平连接部位摩擦预紧作用较弱,导致滞回性能大幅减弱,墙体侧移增大,刚度降低和耗能能力降低;试件PFSWA-0.15(轴压比为 0.15)的屈服荷载降低 22.34%,极限荷载降低 15.01%,同时极限位移增大;试件 PFSWS-0.98(边缘构件纵筋配筋率为 0.98%)的滞回性能减弱,屈服荷载与极限荷载均有所降低,但墙体侧移得到一定控制。为提高新型装配式剪力墙抗震性能,建议在设计时合理增加螺栓配置数量。

4)通过 ABAQUS 软件建立了新型装配式剪力墙模型(试件 PFSW),并与试验结果对比验证了所建模型的正确性,建模方法为新型装配式剪力墙结构的深入研究提供依据。

参考文献

[1]VOX G, BLANCO I, SCHETTINI E. Green facades to control wall surface temperature in buildings[J]. Building and Environment, 2018, 129: 154. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.12.002

[2]姜绍飞, 赵剑, 连晟航. 螺栓连接装配式剪力墙恢复力模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(4): 55
JIANG Shaofei, ZHAO Jian, LIAN Shenghang. Restoring force model for bolted-connection assembled shear wall[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(4): 55. DOI: 10.11918/202106068

[3]陈云钢, 刘家彬, 郭正兴, 等. 装配式剪力墙水平拼缝钢筋浆锚搭接抗震性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(6): 83
CHEN Yungang, LIU Jiabin, GUO Zhengxing, et al. Test on seismic performance of precast shear wall with reinforcements grouted in holes and spliced indirectly in horizontal connections[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(6): 83

[4]赵作周, 周剑, 候建群, 等. 装配式混凝土剪力墙结构水平缝抗剪机理及承载力计算方法综述[J]. 建筑结构, 2015, 45(12): 40
ZHAO Zuozhou, ZHOU Jian, HOU Jianqun, et al. Review of studies on shear resisting mechanisms and calculating formulas of shear resisting capacity of horizontal joints in fabricated reinforced concrete shear wall structures[J]. Building Structure, 2015, 45(12): 40. DOI: 10.19701/j.jzjg.2015.12.008

[5]钱稼茹, 韩文龙, 赵作周, 等. 钢筋套筒灌浆连接装配式剪力墙结构三层足尺模型子结构拟动力试验[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(3): 26
QIAN Jiaru, HAN Wenlong, ZHAO Zuozhou, et al. Pseudo-dynamic substructure test on a 3-story full-scale model of prefabricated concrete shear wall structure with rebars splicing by grout sleeves[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(3): 26. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2017.03.003

[6]李宁波, 钱稼茹, 刘时伟, 等. 部分竖向分布钢筋套筒挤压连接的预制剪力墙抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(7): 36
LI Ningbo, QIAN Jiaru, LIU Shiwei, et al. Experimental study on seismic behavior of pre-cast shear walls with partial vertical distributed steel bars pressed sleeve splicing[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(7): 36. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2016.07.003

[7]WU Dongyue, LIANG Shuting, GUO Zhengxing, et al. The development and experimental test of a new pore-forming grouted precast shear wall connector[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016, 20(4): 1462. DOI: 10.1007/s12205-015-0071-3

[8]薛伟辰, 古徐莉, 胡翔, 等. 螺栓连接装配整体式混凝土剪力墙低周反复试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(增刊2): 221
XUE Weichen, GU Xuli, HU Xiang, et al. Experimental study of assembled monolithic concrete shear wall with bolted connection under low reversed cyclic loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(Sup.2): 221. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2014.s2.036

[9]邵旭东, 刘也萍, 邱明红, 等. 采用 UHPC 灌浆材料大口径全灌浆连接套筒接头的性能研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(2): 81
SHAO Xudong, LIU Yeping, QIU Minghong, et al. Research on performance of large diameter grout-filled splice sleeve joints with UHPC[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(2): 81. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2020.02.007

[10]赵斌, 王庆杨, 吕西林. 采用全装配水平接缝的预制混凝土剪力墙抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(12): 48
ZHAO Bin, WANG Qingyang, LÜ Xilin. Research on seismic behavior of precast concrete walls with fully assembled horizontal

joints[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(12): 48. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.12.006

[11]李宏男，李元龙，黄宙，等. 新型旋转放大式黏弹性阻尼器性能试验研究[J]. 工程力学，2021，38(2)：134
LI Hongnan, LI Yuanlong, HUANG Zhou, et al. Experimental study on the properties of a new rotation-magnified viscoelastic damper[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(2): 134

[12]张偲严，李宏男，李超. 装配式剪力墙高效阻尼器耗能连接的简化模型研究与数值分析[J]. 建筑结构学报，2019，40(10)：61
ZHANG Caiyan, LI Hongnan, LI Chao. Simplified model development and numerical simulation of a high-efficiency energy-dissipating joint for prefabricated concrete shear walls[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(10): 61. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.0038

[13]马哲昊，张纪刚，梁海志，等. 装配式人工消能塑性铰节点低周往复试验数值模拟研究[J]. 土木工程学报，2020，53(增刊2)：162
MA Zhehao, ZHANG Jigang, LIANG Haizhi, et al. Numerical research on prefabricated frame joint based on artificial dissipative plastic hinge under low-reversed loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(Sup.2): 162. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2020.s2.025

[14]马哲昊，张纪刚，梁海志，等. 装配式人工消能塑性铰框架－摇摆墙抗震性能研究[J]. 地震工程与工程振动，2021，41(1)：151
MA Zhehao, ZHANG Jigang, LIANG Haizhi, et al. Research on the seismic performance of the prefabricated frame-rocking wall structure based on artificial dissipative plastic hinge [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(1): 151. DOI: 10.13197/j.eeev.2021.01.151.mazh.018

[15]黄远，易展辉. 带耗能角钢无黏结预应力预制剪力墙抗震性能[J]. 建筑科学与工程学报，2019，36(3)：74
HUANG Yuan, YI Zhanhui. Seismic behavior of unbonded prestressed tendon precast shear walls with energy dissipation angle steel[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2019, 36(3): 74

[16]张锡治，李星乾，章少华，等. 复合齿槽 U 型筋搭接连接装配式剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报，2020，41(11)：79
ZHANG Xizhi, LI Xingqian, ZHANG Shaohua, et al. Experimental study on seismic behavior of prefabricated shear wall with composite alveolar connection and U-type reinforcements overlap[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(11): 79. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.0417

[17]建筑抗震试验规程：JGJ/T 101—2015[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2015
Specification for seismic test of buildings: JGJ/T 101—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015

[18]严涛. 不同连接方式对装配式剪力墙抗震性能的影响[D]. 长沙：湖南大学，2017
YAN Tao. The influence of seismic behavior of precast shear wall with different connection modes[D]. Changsha: Hunan University, 2017

[19]钟铭. 钢筋混凝土柱低周疲劳全过程累积损伤性能简化分析方法[J]. 土木工程学报，2016，49(8)：84
ZHONG Ming. Simplified method for analysis of damage characteristic of RC columns under and after low cyclic loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(8): 84. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2016.08.010

[20]方自虎，简旭阳，周尧，等. 考虑屈曲的钢筋滞回模型[J]. 武汉大学学报(工学版)，2016，49(2)：254
FANG Zihu, JIAN Xuyang, ZHOU Yao, et al. Hysteretic model of reinforced bar considering buckling[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(2): 254. DOI: 10.14188/j.1671－8844.2016－02－016

（编辑　苗秀芝）