

带可更换阻尼器的竖向波形钢板剪力墙及组合墙 抗震性能试验对比研究

王 威, 侯铭岳, 苏三庆, 梁宇建, 向照兴

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为研究一种新型带有可更换阻尼器的波形钢板剪力墙及组合剪力墙的抗震性能, 对该波形钢板剪力墙及组合剪力墙试件进行低周往复初次加载及阻尼器更换后二次加载. 从试件的抗侧承载力、变形和耗能能力、破坏形态、阻尼器的变化等方面, 对波形钢板剪力墙和组合剪力墙进行了相互对比, 及各自加载前后的自身对比. 分析了新型剪力墙试件变形和耗能能力, 承载力退化, 刚度退化的情况. 研究表明: 钢板剪力墙与组合剪力墙在初期加载时滞回曲线几乎重合, 抗震性能接近. 更换阻尼器二次加载时, 钢板剪力墙初次屈曲部位在加载过程中发生应力集中, 变形持续加剧, 引起结构承载力严重劣化. 而组合剪力墙因钢板外混凝土的包裹, 初次加载中未发生屈曲, 更换墙趾耗能构件后剪力墙整体抗震性能有一定提升.

关键词: 剪力墙; 竖向波形钢板; 低周往复加载试验; 可更换阻尼器; 抗震性能

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)01-0038-09

Experimental study on seismic performance of vertical corrugated steel shear wall and composite wall with replaceable damper for contrast

WANG Wei, HOU Mingyue, SU Sanqing, LIANG Yujian, XIANG Zhaoxing

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to study the seismic performance of a new type of corrugated steel plate shear wall and composite shear wall with replaceable damper, the low-cycle reciprocating primary loading and secondary loading of the corrugated steel plate shear wall and composite shear wall specimens had carried out. From the aspects of lateral bearing capacity, deformation and energy dissipation capacity, failure mode and damper change, the corrugated steel plate shear wall and composite shear wall were compared with each other, and the self-comparison before and after loading was made. The deformation, energy dissipation, bearing capacity degradation and stiffness degradation of the new shear wall specimens are analyzed. The results show that the hysteresis curves of the steel plate shear wall and the composite shear wall almost coincide with each other at the initial loading stage, and their seismic performance is consistent. When the damper is replaced for the second loading, the initial buckling position of the steel plate shear wall experiences stress concentration during the loading process, and the deformation continues to aggravate, resulting in serious deterioration of the structure's bearing capacity. However, the composite shear wall is not buckled in the initial loading due to the support package of concrete outside the steel plate, and the seismic performance of the shear wall as a whole is improved after replacing the toe energy-dissipating members.

Key words: shear wall; vertical corrugated steel plate; low cycle reciprocating loading test; replaceable damper; seismic performance

剪力墙是一种常用于高层结构中的重要抗侧力构件, 按构造方式可以分为配筋砌块剪力墙、钢筋混凝土剪力墙、钢板剪力墙和钢板混凝土组合剪力墙, 其中以钢筋混凝土剪力墙最为常用. 但是, 以往震害经验和剪力墙抗震性能研究表明, 钢筋混凝土剪力墙在地震荷载下往往过早发生压弯破坏, 破坏主要集中于墙趾部位, 主要变现为

墙趾混凝土压溃、钢筋鼓曲, 形成一定区域的塑性铰^[1].

为解决传统剪力墙自重大、抗震性能差并且震后难修复的问题, 2011 年, 吕西林^[2]等首次提出了针对钢筋混凝土墙墙趾部位的可更换设想, 即在剪力墙墙趾处设置耗能装置. 地震发生时, 墙趾处耗能装置提前进入屈服^[3], 将塑性变形集中于

收稿日期: 2019-04-17

修改稿日期: 2020-01-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878548, 51578449); 陕西省自然科学基金基础研究计划基金重点资助项目(2018JZ5013)

第一作者: 王 威(1972—), 男, 教授, 主要从事组合结构及高层结构抗震等方面研究. E-mail: wangwgh1972@163.com

耗能装置处以保护母墙,震后更换被破坏的耗能装置实现灾后建筑功能快速恢复^[4].

2012年同济大学吕西林和毛苑君^[5]提出了一种带有可更换墙趾构件的新型剪力墙结构;2013年,吕西林和毛苑君设计5片带可更换墙趾构件的剪力墙试件并进行低周反复加载试验,试验研究表明:带可更换墙趾构件的剪力墙的水平承载能力比普通剪力墙略低,但变形能力是普通剪力墙的2倍,耗能能力明显高于普通剪力墙.2016年同济大学的刘其舟和蒋欢军^[6]等提出一种新型可更换墙脚部件剪力墙,包括防屈曲软钢内芯、钢管混凝土及预紧自填充单元.

在此基础上,设计了新型带有可更换阻尼器的波形钢板剪力墙 RCSPSW (Corrugated Steel Plate Shear Wall with Replaceable damper)和新型带有可更换阻尼器的波形钢板组合剪力墙 RCSPC-SW (Corrugated Steel Plate Composite Shear Wall with Replaceable damper)共两片剪力墙试件,进行了低周反复加载试验,验证了阻尼器的可更换性,比较了剪力墙更换前后抗震性能.

1 试验概述

1.1 剪力墙试件设计以及主要参数

为研究弯剪耦合作用下新型剪力墙的抗震性能^[7-9],本试验控制剪力墙试件剪跨比 λ 为1.5,采用1:2缩尺模型,墙高1978 mm,宽1300 mm.

钢板墙试件 RCSPSW 与组合墙试件 RCSPC-SW 均采用45°波角,3 mm厚的竖向波形钢板.考虑边缘约束构件与母墙的刚度匹配问题,避免边缘约束构件底部受压屈曲,设计边缘约束构件为方管钢型钢 $\square 150 \times 150 \times 10$.顶梁采用型钢 HN150 \times 75 \times 5 \times 7,底梁采用型钢 HM244 \times 175 \times 7 \times 11.

对于组合墙试件,按照 JGJ138-2016《组合结构设计规范》^[10]要求,在组合墙波形钢板波谷内焊接栓钉,以保证波形钢板与混凝土的协同性能.并要求在两侧边缘约束构件之间焊接水平分布钢筋,顶梁与底梁之间焊接竖向分布钢筋,顶梁与底梁外包混凝土浇筑具体构造如图1(g)所示.

1.2 墙趾可更换阻尼器设计以及主要参数

墙趾形成塑性区而丧失承载力是剪力墙结构最典型的破坏形式^[7],本文针对上述钢板墙试件和组合墙试件,结合课题组前期阻尼器试验研究^[11],分别设计了两款可更换阻尼器,如图2所示.阻尼器安装于约束边缘构件下端连接板与底梁上端连

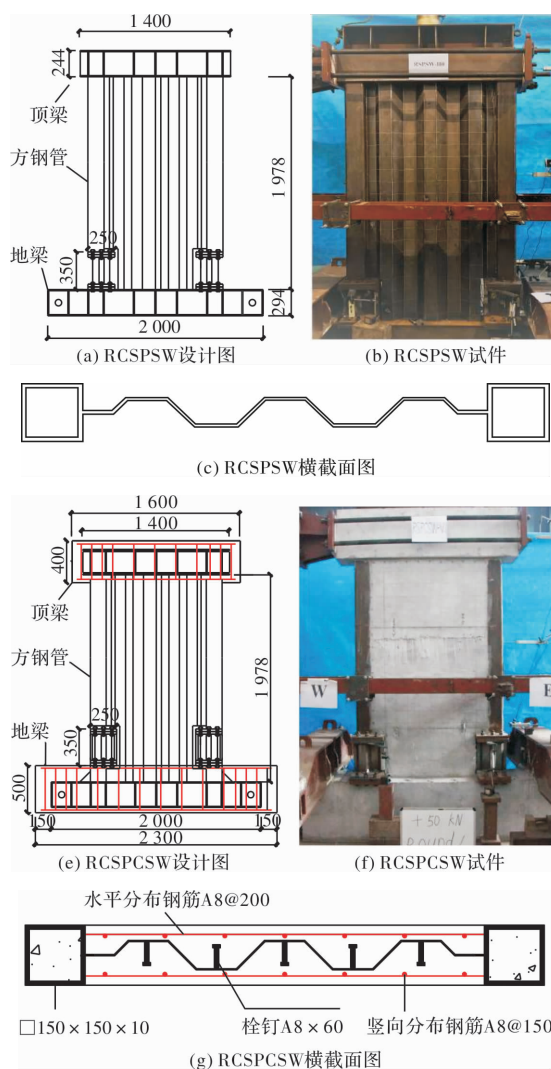


图1 钢板剪力及组合墙示意图

Fig. 1 Configuration of specimens

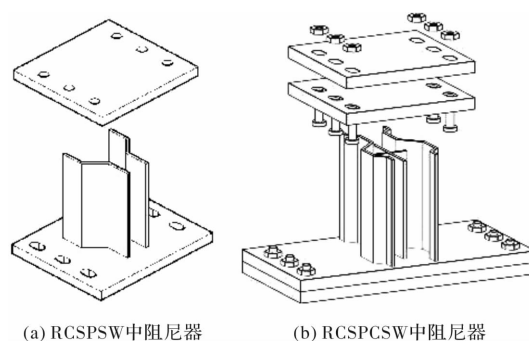


图2 墙趾可更换阻尼器示意图

Fig. 2 Configuration of dampers

接板之间的安置腔内,通过高强度螺栓固定.阻尼器安装腔尺寸在课题组以往剪力墙试验^[7-8]的基础上,参照刘其舟^[6]提出的剪力墙塑性区宽度和高度公式确定.

阻尼器腹板为45°波形钢板,厚度为3 mm,其中钢板墙阻尼器设计3个波段,组合墙阻尼器设置7个波段.其中组合墙阻尼器中部安装一较矮十

字芯,以防止剪力墙承受突加超大变形时墙趾阻尼器突然失稳失效,引起剪力墙承载力突然削弱。

1.3 试件材料及力学性能

本试验所用钢材均为 Q235,按照 GB/T2975-7998《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试件制备》^[12]的要求,对试件中不同型号规格的钢材各取三组,制成材性标准试件并进行材性试验。材性标准试件与母材同批采购随机取样,于西安建筑科技大学建材实验室的电液伺服万能试验机上完成,各组材性试件力学性能误差满足规定,材性力学性能可完全代表母材力学性能。

本试验所用混凝土强度等级为 C35,在浇筑试件的同时,同批浇筑 6 个 150 mm×150 mm 立方体试块,并与试件在相同环境中养护。试验进行前,根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[13]的要求,在西安建筑科技大学建材实验室对混凝土试块进行材性试验,测得混凝土材料的力学性能,各组材性试件力学性能误差满足规定。

将上述处理结果汇总于表 1。

表 1 材料力学性能

Tab. 1 Mechanical property of materials

混凝土	3 mm 钢板		10 mm 钢板		Φ8 钢筋	
f_{cu}	f_y	f_u	f_y	f_u	f_y	f_u
/MPa	/MPa	/MPa	/MPa	/MPa	/MPa	/MPa
51.7	317	405	351.67	415.08	313	435

1.4 试验方案

本试验在西安建筑科技大学土木工程实验研究中心完成,根据《建筑抗震试验方法规程》^[14](JGJ/T 101-2015)规定,采用拟静力的方法对上述 RCSPSW 钢板剪力墙和 RCSPCSW 组合剪力墙试件进行加载,以研究两种新型剪力墙的初次抗震性能、震后可更换性和恢复后抗震性能。

本试件设计剪跨比为 1.5,试验轴压比为 0.15。试验加载装置如图 3 所示,通过电液伺服(MTS)加载装置于试件顶梁一端施加往复荷载,模拟剪力墙经历地震的过程。试件底梁通过两侧固定装置固定于试验台地基台座上。在试件中部施加侧向支撑以防止整体失稳,侧向支撑与试件为滚轮接触,不对剪力墙试件侧移产生影响。

试验加载方式由荷载-位移混合控制^[14]。试验前,预加反复水平荷载试验,以消除试件内部的不稳定位移并检查试验装置及各测量仪表是否工作正常。预加载结束后对试件试件施加竖向荷载,控制轴压比为 0.15。

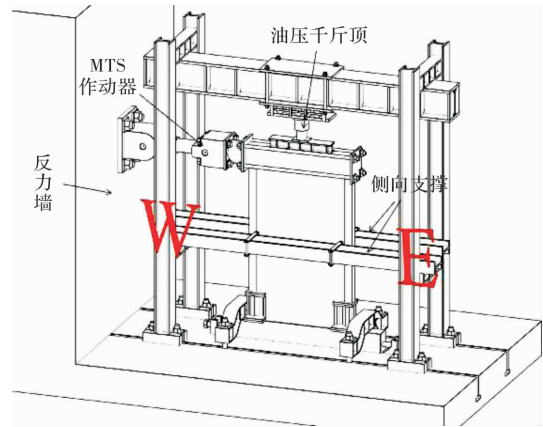


图 3 试验加载装置示意图

Fig. 3 Loading equipment of specimen

试件弹性阶段采用荷载控制,每级荷载增加 25 kN,当 MTS 电液伺服加载数据采集系统中荷载-位移曲线发生明显偏移时,认为构件已经达到整体屈服,改用位移控制加载。每级位移加载增量取屈服位移的整数倍,并循环 3 次。

根据 GB50011-2010《建筑抗震设计规范》^[15],当试件顶部位移达到层间转角 1/100 时,即达到了设计规范认为的塑性破坏。此时停止加载,对可更换墙趾阻尼器进行更换。然后重新进行荷载-位移混合控制加载,直至试件完全破坏。

1.5 测点布置

1.5.1 应变片布置

为研究钢板剪力墙的受力性能及钢板剪力墙外包混凝土组合剪力墙中钢骨的受力性能,本次试验对钢板墙和组合墙中钢骨相同位置焊接应变花与应变片,以观测测点的局部应力-应变情况,具体布置^[7]如图 4 所示。

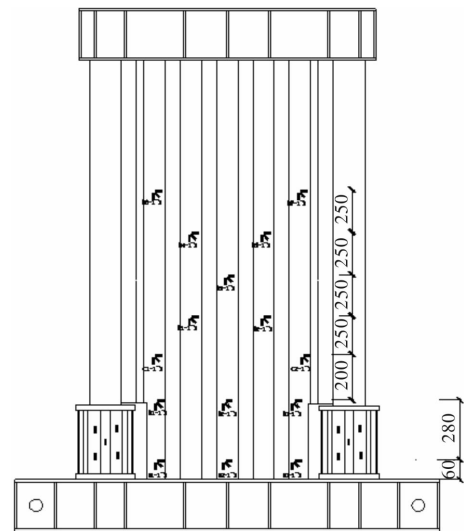


图 4 试件应变片布置示意图

Fig. 4 Measuring arrangement for new designed shear wall

1.5.2 位移计布置

为研究试件在荷载作用下的整体变形行为, 在两试件相同位置布设位移计, 具体布置如图 5 所示。

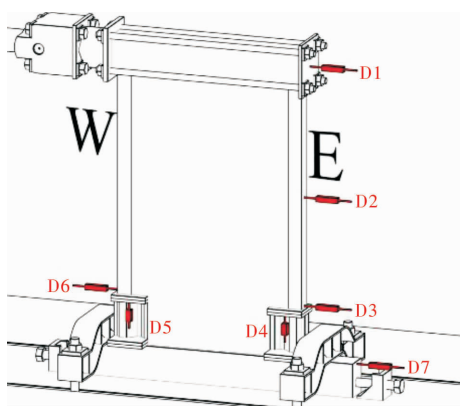


图 5 位移计布置示意图

Fig. 5 Measuring arrangement for new designed shear wall

2 试验结果及分析

2.1 新型钢板剪力墙试验过程概述

实验前, 对荷载方向及符号进行规定: 作动器施加推力, 剪力墙整体向东侧偏移时, 为荷载正方向; 作动器施加拉力, 剪力墙整体向西侧偏移时, 为荷载负方向。

对试件 RCSPSW 施加竖向荷载和预加载, 试件钢构件偶尔发生缝隙被压实的声音但未发生变形。首先通过荷载控制对试件加载, 每级加荷载 25 kN, 往复一次。直至荷载施加至 250 kN 时, RCSPSW 中波形钢板下部受削弱墙板西侧底部 (0~20 cm) 略微继续发生屈曲, 如图 6 所示。300 kN 时下部受削弱墙板东侧底部 (0~20 cm) 向南鼓曲大约 2~3 mm, 如图 6(a) 所示。

当钢板墙顶端侧移达到 10.1 mm 时, MTS 电液伺服加载数据采集系统中荷载-位移曲线发生明显侧移, 试件整体屈服。位移施加到正向 18.9 mm 第三圈时, 下部受削弱墙板东侧阻尼器上部向北鼓曲, 西侧阻尼器上部向南鼓曲, 发生扭转; 东侧阻尼器、南侧腹板右下角发生微小屈曲。位移施加到负向 23.7 第二圈时, 下部受削弱波形钢板切割直角应力集中处向北鼓曲, 钢板剪力墙发生多处屈曲变形, 西侧阻尼器上部向南鼓曲, 发生扭转; 东侧阻尼器、南侧腹板右下角发生微小屈曲, 阻尼器发生明显局部鼓曲, 如图 6(b) 所示。由于剪力墙试件高度 1 978 mm, 此时剪力墙层间位移角超过 1/100, 已经达到设计规范要求的塑性破坏极限位移角, 对墙趾阻尼器进行拆卸更换。

阻尼器更换后, 对剪力墙试件重新进行荷载-位移混合控制加载。首先通过荷载控制进行加载, 每级加载增量 25 kN。荷载施加到负向 18.9 kN 时, 西侧阻尼器外缘中下部向外鼓曲, 如图 6(c) 所示。



图 6 新型剪力墙试件的破坏形态

Fig. 6 Failure modes of new designed shear wall

荷载正向 150 kN 时, 东侧阻尼器外缘下部鼓曲加剧。滞回曲线出现明显偏离现象, 试件屈服, 改用位移加载, 屈服时顶部位移 4.1 mm。位移施加到负向 13.2 mm 第三圈时波形钢板底部屈曲严重, 更换前的屈曲变形在往复荷载下不断加深, 凸起深度可达 2~3 cm, 每个波段处都有独立鼓曲。波形钢板的屈曲主要集中在底部削弱处的钢板处, 尤其墙底部分, 如图 6(e) 所示。最终, 剪力墙位移达到 16.3 mm 时钢板底部削弱区域各波段内相关屈曲严重, 阻尼器发生严重变形, 如图 6(f) 所示, 试件整体承载力下降至 85% 以下, 宣告破坏。

由试验结果可知, 试件 RCSPSW 更换前可达到 GB50011-2010《建筑抗震设计规范》^[15] 中对层间转角 1/100 的要求, 而更换后性能退化明显。

2.2 新型组合剪力墙试验过程概述

对 RCSPCSW 试件施加竖向荷载并预加载后, 进行荷载控制加载, 每级荷载增量 25 kN 循环一

次,以研究观察组合墙在弹性阶段的受力行为.荷载达到 100 kN 时墙趾处开始有 2~3 mm 细微裂缝.试件顶端位移达到 10.1 mm 时采取位移控制加载,阻尼器安置腔角部因应力集中,混凝土有横向开裂的趋势.试件顶端侧移达到 14.1 mm 时,阻尼器外缘底部两侧均略屈曲

墙身下侧与底梁交界处裂缝开展.试件顶端侧移达到 18 mm 时,两侧阻尼应变片采集数据显示已经屈服,但 E 侧阻尼器有局部屈曲而 W 侧阻尼器无明显现象.墙体裂缝在下部消弱区内交叉,而中上部为两条竖向通高裂缝带.此时认为试件位移角已达到 1/100.

RCS PCSW 试件更换墙趾阻尼器后再次加载.弹性阶段没有明显现象,当试件顶端侧移达到

14.1 mm 时阻尼器发生轻微鼓曲,并伴有几声焊缝崩开声,侧部方钢管内混凝土竖柱有压酥声音,荷载-位移曲线明显偏离直线,认为试件已经屈服,开始进行位移控制加载.正向位移 25.0 mm 第一圈时, E 侧阻尼器边缘混凝土产生竖向裂缝,有压溃分离迹象.反向位移 25.0 mm 第一圈时 W 侧阻尼器受压过程中持续有劈啪声,伴随“噔”一声, N 侧外缘中部出现大的鼓曲.阻尼器侧混凝土竖向开裂,边缘混凝土有受压分离迹象.位移加载反向 45.5 mm 第二圈时, W 侧阻尼器各波段均有局部屈曲,整体屈曲形态严重,墙趾处持续有墙趾处压溃严重,混凝土掉落.此时试件承载力已经下降到 85% 以下.最终结构破坏形态如图 7(e)(f) 所示.

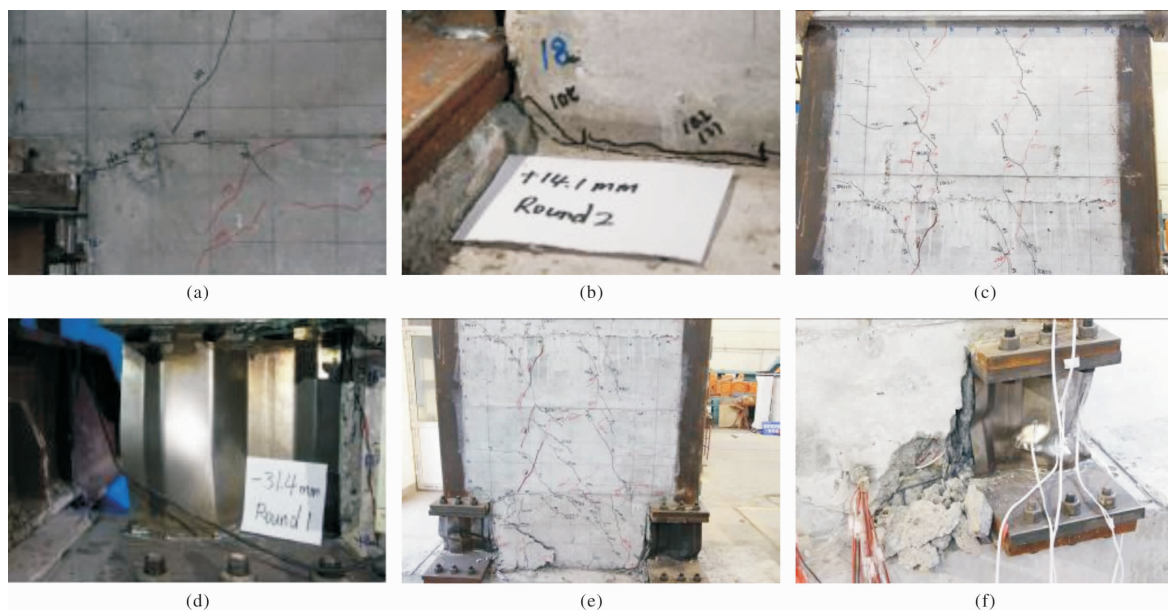


图 7 新型剪力墙试件的破坏形态

Fig. 7 Failure modes of new designed shear wall

2.3 滞回曲线分析

根据电液伺服(MTS)加载装置采集的作动器荷载-试件顶端位移数据绘制滞回曲线,如图 8 所示.

由图 8(a),钢板墙与组合墙在阻尼器更换前的滞回曲线重合度较高,表明在新型钢板剪力墙与新型组合剪力墙的初次抗震性能明显不区别.

由图 8(c),对比钢板墙更换阻尼器前后的滞回曲线,发现钢板墙更换前刚度较大.阻尼器更换后,钢板墙刚度减小、承载力降低,但是滞回曲线饱满.变化的原因主要是因为钢板墙剪力墙在经历第一次加载后,母墙波形钢板钢板变形参与耗能,在底部及削弱区发生了较严重的局部屈曲,再次加载时原有屈曲部分持续加剧,刚度和承载

力严重削弱.但由于新换阻尼器与已削弱母墙刚度匹配,所以更换后滞回更加饱满,耗能效果改善.

由图 8(d),组合墙由于在钢骨外包裹混凝土初次加载仅造成阻尼器变形及混凝土轻微裂缝,并未对组合墙钢骨造成损害.更换阻尼器后再次加载仍可以与首次加载性能相当,并且继续加载至破坏表现一定的延性.

由图 8(b),对比钢板墙与组合墙更换后性能,可知组合墙更换后再次加载性能远远优于钢板墙.

2.4 骨架曲线分析

根据已作出的滞回曲线结果,取每一滞回环的两尖点绘制骨架曲线,可以近似得到一次加载时试件的承载力-位移曲线,如图 9 所示.对骨架曲线中特征点数据进行提取整理,如表 2 所示.

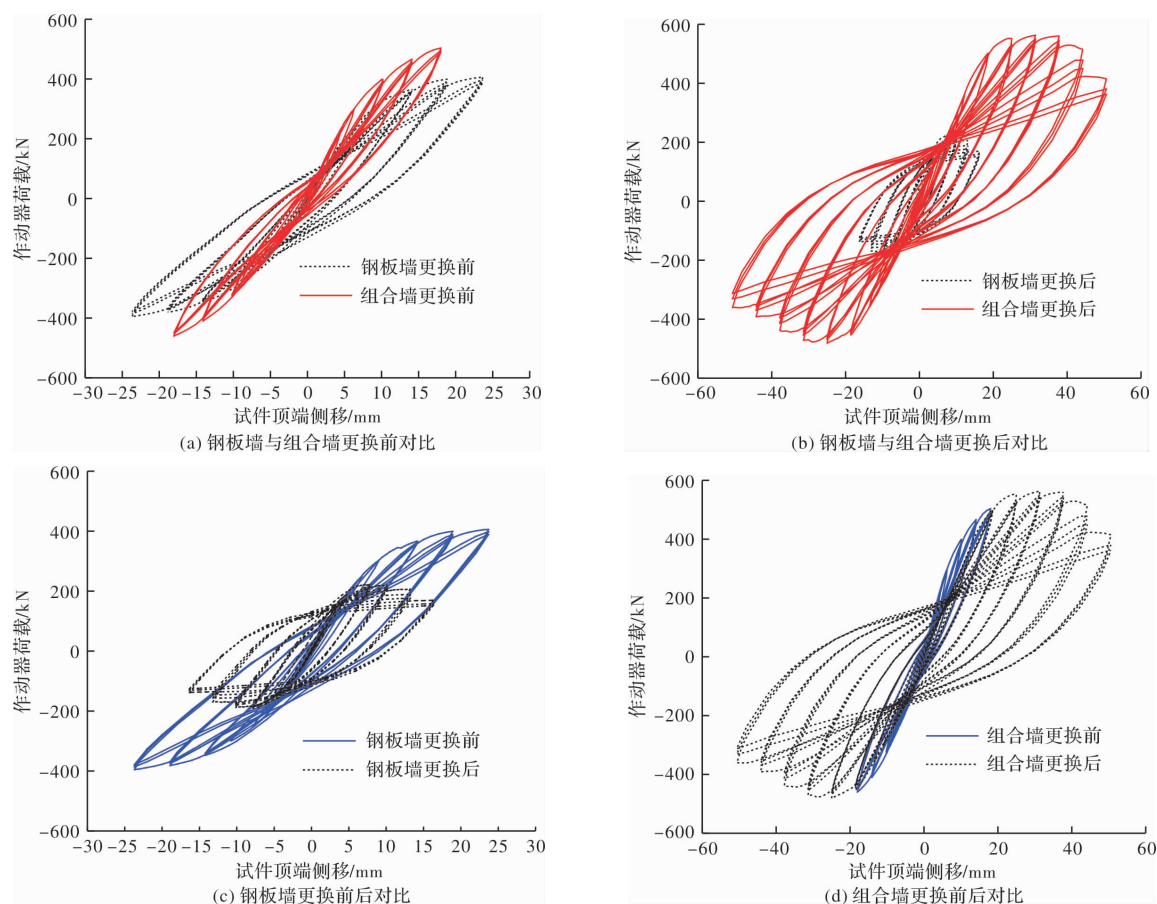


图 8 试件滞回曲线

Fig. 8 Hysteretic curves of specimens

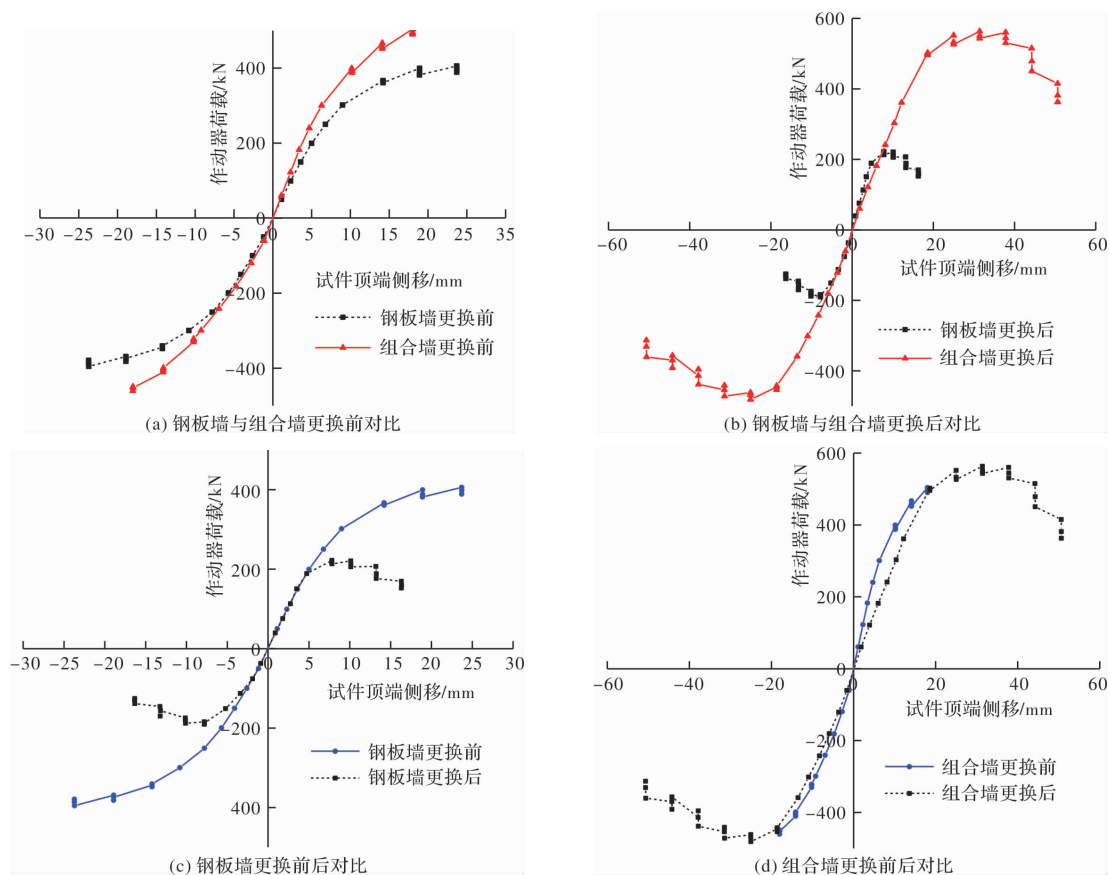


图 9 试件骨架曲线

Fig. 9 Skeleton curves of specimens

由图 9(a), 钢板墙与组合墙更换前骨架曲线区别不明显, 说明组合墙外包混凝土的优势在首次加载并不能得到充分发挥。

由图 9(c), 钢板墙再次加载骨架曲线表现出较低刚度、过早屈服及承载力严重弱化。主要原因是首次加载时, 母墙波形钢板在墙底及削弱区发生了多处局部屈曲, 再次加载过程中原有屈曲部分持续加剧, 造成母墙受损区持续弱化钢板剪力墙第二次加载时, 屈服点位移由 10.1 mm 提前到 4.3 mm, 提前了 57%; 屈服点承载力由 341.8 kN 下降到 184.9 kN, 下降了 45.1%; 峰值点承载力由 405.7 kN 下降到 222.0 kN, 下降了 45.3%。

而对比图 9(b)及图 9(d)可发现组合墙再次加载性能仍然较好, 主要是因为组合墙的外包混凝土克服了钢板墙的上述不足, 组合剪力墙第二次加载的滞回曲线与初次加载接近, 两者的峰值荷载仅相差 3.5%, 说明组合剪力墙具有较好的震后可恢复性。

对图 9 骨架曲线及表 2 中数据进行分析, 钢板墙与组合墙在更换前性能区别不明显, 钢板墙的峰值荷载为组合墙的 80.5%, 但钢板墙的峰值位移是组合墙的 131.7%。

对钢板墙与组合墙的更换后性能进行对比, 发现钢板墙的屈服荷载仅为组合墙的 39.8%, 钢板墙的屈服位移仅为组合墙的 30.1%; 钢板墙的峰值荷载仅为组合墙的 42.5%, 钢板墙的峰值位移仅为组合墙的 24.8%; 钢板墙的极限荷载仅为组合墙的 42.1%, 钢板墙的极限位移仅为组合墙的 32.1%。可见钢板剪力墙再次加载性能削弱严重。

表 2 试件的特征荷载和位移

Tab. 2 Characteristic load and displacement of specimens

试件编号	屈服点		峰值点		极限点		μ
	F_y	Δ_y	F_d	Δ_d	F_u	Δ_u	
	/kN	/mm	/kN	/mm	/kN	/mm	
RCSPSW 更换前	341.8	10.1	405.7	23.7	405.7	23.7	/
RCSPSW 更换后	184.9	4.3	222.0	7.8	181.4	13.2	3.1
RCSPCSW 更换前	413.8	13.4	503.9	18.0	503.9	18.0	/
RCSPCSW 更换后	464.2	14.3	522.4	31.4	430.2	41.1	2.9

2.5 耗能能力分析

采用等效粘滞阻尼系数 ξ_{eq} 衡量试件的耗能能力, 其计算公式为如式(1), 所包围面积如图 10 所示。

$$\xi_{eq} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{A}{S_{DOF} + S_{BOE}} \quad (1)$$

式中: A 为滞回曲线所包围的面积; $S_{DOF} + S_{BOE}$ 为三角形 DOF 与 BOE 的面积之和。计算结果见图 11。

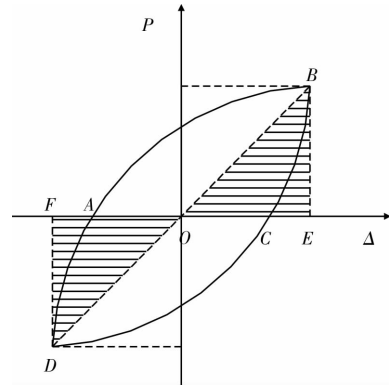


图 10 等效粘滞阻尼系数计算示意图

Fig. 10 Calculation of equivalent viscosity damping coefficient

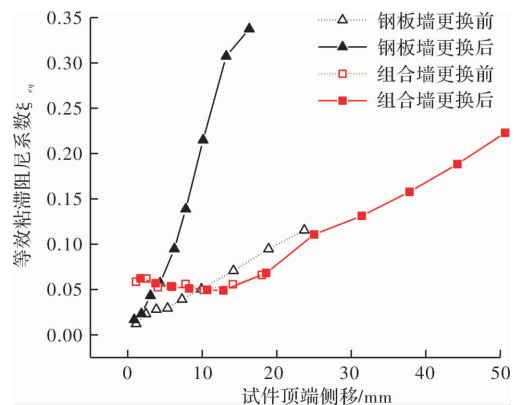


图 11 等效粘滞阻尼系数位移曲线

Fig. 11 Calculation of equivalent viscosity damping coefficient

对比图 9 和图 11, 组合墙的初始等效粘滞阻尼系数高于钢板墙, 表现为前期组合墙的滞回曲线较为丰满的 S 形, 而钢板墙呈较细长的 S 形。随后组合墙因为截面粘结滑移引起滞回曲线捏缩, 等效粘滞阻尼系数降低, 但进入塑性后滞回曲线又逐渐丰满, 等效粘滞阻尼系数增高。

钢板墙在更换墙趾阻尼器后, 等效粘滞阻尼系数增长显著, 弓形滞回曲线饱满, 主要是因为更换后阻尼器与受损母墙刚度达到匹配。

2.6 承载力退化分析

采用承载力降低系数 η 衡量同一加载位移幅值下多次加载时的承载力退化, 计算公式如式(2), 计算结果如图 12 所示。

$$\eta = \frac{F_n}{F_1} \quad (2)$$

式中: F_n 为同一位移幅值下, 最后一次循环的最大力; F_1 为同一位移幅值下, 第一次循环的最大力。

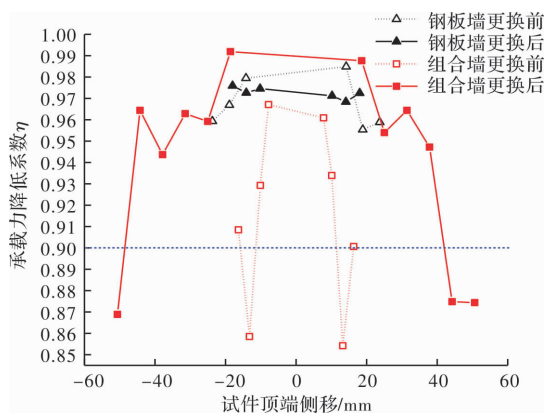


图 12 承载力退化图

Fig. 12 Strength degradation of specimens

对图 12 进行分析可知, 钢板墙试件的承载力

退化不明显, 即使在极限位移附近承载力降低系数仍能保持在 0.95 以上; 而组合墙试件, 无论更换前后都承载力降低明显, 表现为承载力降低曲线在两侧有较陡的下降趋势, 且承载力降低系数小 0.9. 这说明钢板剪力墙在反复同级荷载作用下承载力稳定, 而组合结构因为混凝土开裂剥落等原因在同级荷载反复作用下承载力下降较多.

2.7 刚度退化分析

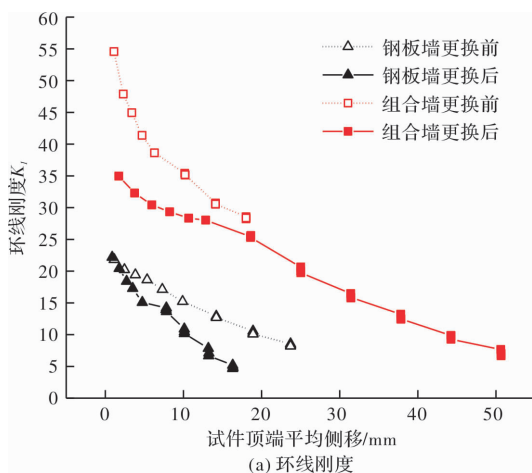
分别采用环线刚度和割线刚度对试件进行刚度退化分析, 其中环线刚度指滞回环两尖角相连斜线的刚度, 计算公式如式(3), 割线刚度指滞回环一尖角与原点连线的刚度, 计算公式如式(4), 将计算结果绘于图 13 中.

$$K_1 = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (3)$$

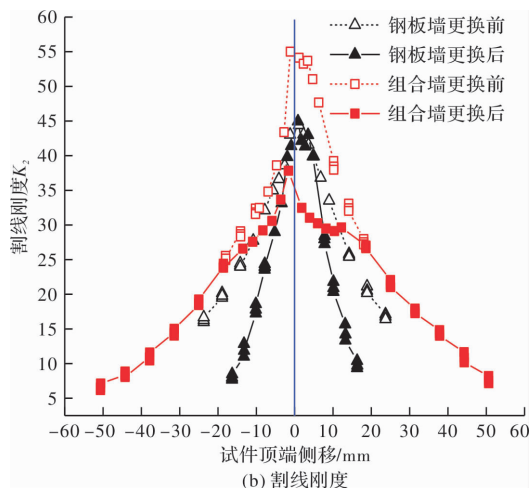
$$K_2 = \frac{F_i}{\Delta_i} \quad (4)$$

式中: Δ_i 为位移幅值; F_i 为同一位移幅值下, 第 i 次循环对应的力.

对图 13 进行分析, 可知钢板剪力墙更换前后初始刚度几乎重合, 说明更换新阻尼器可以弥补试件整体刚度到初始水平. 对组合墙试件来说, 由



(a) 环线刚度



(b) 割线刚度

图 13 刚度退化曲线

Fig. 13 Stiffness degradation of specimens

于初次加载有部分混凝土开裂或者压溃, 所以更换阻尼器后并不能恢复到初始刚度, 但更换后刚度下降的趋势有所延缓. 另外, 因为加工误差、试验环境及加载制度等原因, 试件受力性能在两个方向存在不一致的现象.

3 结论

(1) 钢板剪力墙与组合剪力墙在初期加载时滞回曲线重合较多, 抗震性能接近. 但是, 更换阻尼器二次加载时, 钢板剪力墙初次屈曲部位在加载过程中发生应力集中, 变形持续加剧, 引起结构承载力严重劣化. 表现为, 钢板剪力墙第二次加载时屈服点位移提前了 57%, 屈服点承载力下降了 45.1%, 峰值点承载力下降了 45.3%.

(2) 组合剪力墙因钢板外混凝土的支撑包裹, 初次加载中未发生屈曲, 更换墙趾耗能构件后组合剪力墙第二次加载的滞回曲线与初次加载接近, 两者的峰值荷载仅相差 3.5%, 说明组合剪力墙具有较好的震后可恢复性.

(3) 在剪力墙墙趾设矩形阻尼器安置腔时, 直角处发生应力集中, 钢板首先在该部位发生屈曲, 混凝土首先在该部位开裂.

(4) 波形钢板组合剪力墙裂缝形态大致为两条平行的开裂带, 主要原因是内嵌钢板波峰处混凝土保护层厚度较小.

参考文献 References

- [1] 徐培福, 黄吉峰, 陈富盛. 近 50 年剪力墙结构震害及其对抗震设计的启示[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(3): 1-13.

XU Peifu, HUANG Jifeng, CHEN Fusheng. Earth-

- quake damages to shear wall structure in last fifty years and seismic design enlightenment[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(3): 1-13.
- [2] 吕西林, 陈云, 毛苑君. 结构抗震设计的新概念——可恢复功能结构[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(7): 941-948.
- LU Xilin, CHEN Yun, MAO Yuanjun. New concept of structural aseismic design: Restorable functional structure[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2011, 39(7): 941-948.
- [3] RESTREPO J I, RAHMAN A. Seismic performance of self-centering structural walls incorporating energy dissipators[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(11): 1560-1570.
- [4] 王威, 任英子, 苏三庆, 等. 高层剪力墙抗震理论发展——从高强高刚到震后可恢复设计[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(4): 493-502.
- WANG Wei, REN Yingzi, SU Sanqing, et al. Seismic theory development of shear walls in tall building: From high strength and high rigidity to resilient design after earthquake [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2019, 51(4): 493-502.
- [5] 吕西林, 毛苑君. 带有可更换墙脚构件剪力墙的设计方法[J]. 结构工程师, 2012, 28(3): 12-17.
- LU Xinlin, MAO Yuanjun. Design method of shear walls with replaceable wall members [J]. Structural Engineer, 2012, 28(3): 12-17.
- [6] 刘其舟, 蒋欢军. 新型可更换墙脚部件剪力墙设计方法及分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 37-44.
- LIU Qizhou, JIANG Huanjun. Design method of new type of reinforced concrete shear wall with replaceable corner components and its analysis [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2016, 44(1): 37-44.
- [7] 王威, 张龙旭, 苏三庆, 等. 波形钢板剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2018, 39(5): 36-44.
- WANG Wei, ZHANG Longxu, SU Sanqing, et al. Experimental study on seismic behavior of corrugated steel plate shear walls [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(5): 36-44.
- [8] 王威, 张龙旭, 苏三庆, 等. 波形钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(10): 75-84.
- WANG Wei, ZHANG Longxu, SU Sanqing, et al. Experimental research on seismic behavior of corrugated steel plate-concrete composite shear walls [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(10): 75-84.
- [9] 王威, 高敬宇, 苏三庆, 等. 波形钢板剪力墙抗侧性能的有限元分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(5): 630-636.
- WANG Wei, GAO Jingyu, SU Sanqing, et al. Lateral resisting behavior finite element analysis of corrugated steel plate shear wall [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2017, 49(5): 630-636.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 组合结构设计规范: JGJ138—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of composite structures: JGJ138—2016 [M]. Beijing: China Architecture Building Press, 2016.
- [11] 王威, 王俊, 苏三庆, 等. 波形反对称软钢阻尼器的力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(6): 11-19.
- WANG Wei, WANG Jun, SU Sanqing. Experimental research on mechanical behavior of corrugated dissymmetry mild steel damper[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(6): 11-19.
- [12] 中国国家标准化管理委员会. 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备: GB/T 2975-1998 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- Standardization Administration of China. The sampling position of mechanical properties of steel and steel products and the preparation of sample: GB/T 2975-1998 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1998.
- [13] 中华人民共和国建设部. 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081-2002 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- Ministry of Construction of the PRC. Standard test methods for mechanical properties of ordinary concrete: GB/T 50081-2002 [M]. Beijing: China building industry press, 2003.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验方法规程: JGJ/T 101-2015 [S]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code of seismic test methods for buildings: JGJ/T 101-2015 [M]. Beijing: China academy of building sciences, 2015.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011-2010 [M]. Beijing: china architecture Building Press, 2010.

(编辑 沈 波)