

文章编号:1673-2049(2019)01-0022-10

免模剪力墙抗震性能试验

吴方伯¹, 张高波¹, 欧阳靖¹, 胡柯¹, 周绪红^{1,2}

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400044)

摘要:为了研究免模剪力墙的抗震性能, 完成了1片免模保温剪力墙、1片免模非保温剪力墙和1片现浇剪力墙的拟静力试验, 对比分析了试件的承载能力、滞回曲线、骨架曲线、刚度退化曲线、延性性能、耗能能力等抗震指标, 并对免模剪力墙的整体性进行了分析。结果表明: 免模剪力墙与现浇剪力墙的受力过程、破坏形态基本相同, 抗震性能指标相近, 具有与现浇剪力墙相近的抗震性能; 与现浇剪力墙相比, 免模剪力墙中预制模板和保温层的存在一定程度上削弱了墙体的工作性能, 但是影响有限; 在工作过程中, 免模剪力墙预制模板平面内和平面外的相对位移均较小, 没有出现较大范围预制模板与现浇区分离的现象, 抗剪连接件和自然粗糙面的构造措施能够较好地保证免模剪力墙各组成部分的协同工作能力和墙体的整体性。

关键词: 免模剪力墙; 预制模板; 拟静力试验; 抗震性能; 抗剪连接件; 保温层

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A

Experiment on Seismic Behavior of Non-formwork Shear Wall

WU Fang-bo¹, ZHANG Gao-bo¹, OUYANG Jing¹, HU Ke¹, ZHOU Xu-hong^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to study the seismic behavior of non-formwork shear wall, quasi-static tests of one non-formwork insulation shear wall, one non-formwork shear wall and one cast-in-place shear wall were performed. The indices of seismic performance, such as, the bearing capacity, hysteretic loops, skeleton curves, ductility performance and energy-dissipation were analyzed, and the integrities of non-formwork shear walls were also analyzed. The results show that the mechanical behavior and failure mode of non-formwork shear wall are the same as those of the cast-in-place shear wall, and the indices of seismic performance are similar. Non-formwork shear walls have the similar seismic behavior to cast-in-place shear walls. Compared with the cast-in-place shear walls, the prefabricated formwork and insulation layer weaken the working performance of non-formwork shear walls to a certain extent, but the effect is limited. During the working process, the relative displacements of prefabricated formwork inside the plane and outside the plane are small, and there is no phenomenon of separation between the prefabricated formwork and the cast-in-place area in a larger range. The construction measures of shear connector and natural rough surface can better ensure the cooperative working ability of the components of the shear wall and the integrity of the wall.

Key words: non-formwork shear wall; prefabricated formwork; quasi-static test; seismic behav-

收稿日期: 2018-03-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0701308)

作者简介: 吴方伯(1954-), 男, 湖南长沙人, 教授, 博士研究生导师, E-mail: wfbprof@163.com。

ior; shear connector; insulation layer

0 引 言

剪力墙结构广泛应用于现代高层建筑当中,是承受风荷载或地震作用引起的水平荷载的主要抗侧力构件,在传统剪力墙施工过程中多采用现场支模的湿作业方式,但是该方法施工速度缓慢、湿作业多、人力物力消耗巨大^[1-2]。随着低碳、环保、节能等社会理念的提出,预制全装配式剪力墙越来越多地应用于现代建筑结构当中,但是预制全装配式剪力墙自身存在构件笨重运输困难、拼装整体性差、节点处理困难等缺陷,在实际工程应用中,特别是在高层建筑当中,存在一定的局限性^[3]。为了综合解决现浇剪力墙和预制全装配式剪力墙存在的缺陷,研究人员提出了部分预制部分现浇的装配整体式剪力墙^[4]。Bush 等^[5]完成了装配式叠合剪力墙的弯曲试验;Benayoune 等^[6-7]对预制混凝土夹心剪力墙进行了轴向受压和偏心受压试验;连星等^[8-10]对叠合板式剪力墙进行了一系列抗震性能试验。

本文提出一种新型的免模剪力墙,该剪力墙属于装配整体式剪力墙的一种,由 A、B 侧混凝土预制模板、现浇混凝土层和抗剪连接件组成。当该免模剪力墙应用于结构外墙需考虑墙体保温时,可在免模剪力墙靠近室外一侧现浇混凝土层与预制模板之间设置保温层,形成免模保温剪力墙^[11-12]。该剪力墙具有整体性好、施工速度快、成本低等特点。为了更加深入地了解该免模剪力墙的抗震性能,本文分别进行了 1 片免模保温剪力墙、1 片免模非保温剪力墙和 1 片现浇剪力墙的拟静力试验,着重探究了免模剪力墙与现浇剪力墙在抗震性能上的差异。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

本文试验共设计了 3 片剪力墙试件,即 1 片免

模保温剪力墙 MMQ-1,1 片免模非保温剪力墙 MMQ-2 和 1 片现浇剪力墙 XJQ-1。试验轴压比为 0.1,试件详细参数如表 1 和图 1 所示。免模剪力墙 MMQ-1、MMQ-2 中 A、B 两侧预制模板为 30 mm 厚钢丝网混凝土板,现浇区为 100 mm 厚现浇混凝土,其中免模保温剪力墙 MMQ-1 中 B 侧预制模板与现浇区之间设有 30 mm 厚聚乙烯保温层。免模剪力墙预制模板内表面为自然粗糙面,通过抗剪连接件与现浇层相连,其中免模保温剪力墙 MMQ-1 中 A 侧预制模板和免模非保温剪力墙 MMQ-2 中 A、B 侧预制模板与现浇区的连接采用 1 类抗剪连接件,免模保温剪力墙 MMQ-1 中 B 侧预制模板与现浇区的连接采用 2 类抗剪连接件,1、2 类抗剪连接件构造形式如图 2 所示,试件具体制作根据文献^[12]提供的施工方法进行。

1.2 材料力学性能

在试件制作过程中,选取同批次混凝土分别制作 150 mm×150 mm×150 mm 标准立方体试块,每组 3 个,与相应试件同条件养护,达到 28 d 龄期后进行压力试验^[13],试验结果如表 2 所示。在同批次的钢筋中截取长度为 500 mm 的试样,每种直径的钢筋分别选取 1 组,每组 3 根,进行拉伸试验^[14],试验结果如表 3 所示。

1.3 试验加载与测量方案

1.3.1 加载方案

试验加载主要分为水平往复加载和竖向加载。水平往复力或位移由实验室 MTS 电液伺服加载系统提供,竖向荷载由油压千斤顶提供,加载装置如图 3 所示。

本试验的加载制度根据《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)^[15]和《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)^[16]的有关规定进行确定,采用力-位移混合加载。试验时,首先通过油压千斤顶

表 1 试件参数

Tab. 1 Parameters of Specimens

试件编号	试件尺寸	预制模板混凝土强度等级	现浇混凝土强度等级	A 侧预制模板抗剪连接件 型号	B 侧预制模板抗剪连接件 型号	有无保温层
MMQ-1	2 300 mm×1 300 mm×190 mm	C30	C30	1 类 梅花状,300 mm×300 mm	2 类 梅花状,300 mm×300 mm	有(厚 30 mm)
MMQ-2	2 300 mm×1 300 mm×160 mm	C30	C30	1 类 梅花状,300 mm×300 mm	1 类 梅花状,300 mm×300 mm	无
XJQ-1	2 300 mm×1 300 mm×160 mm		C30			无

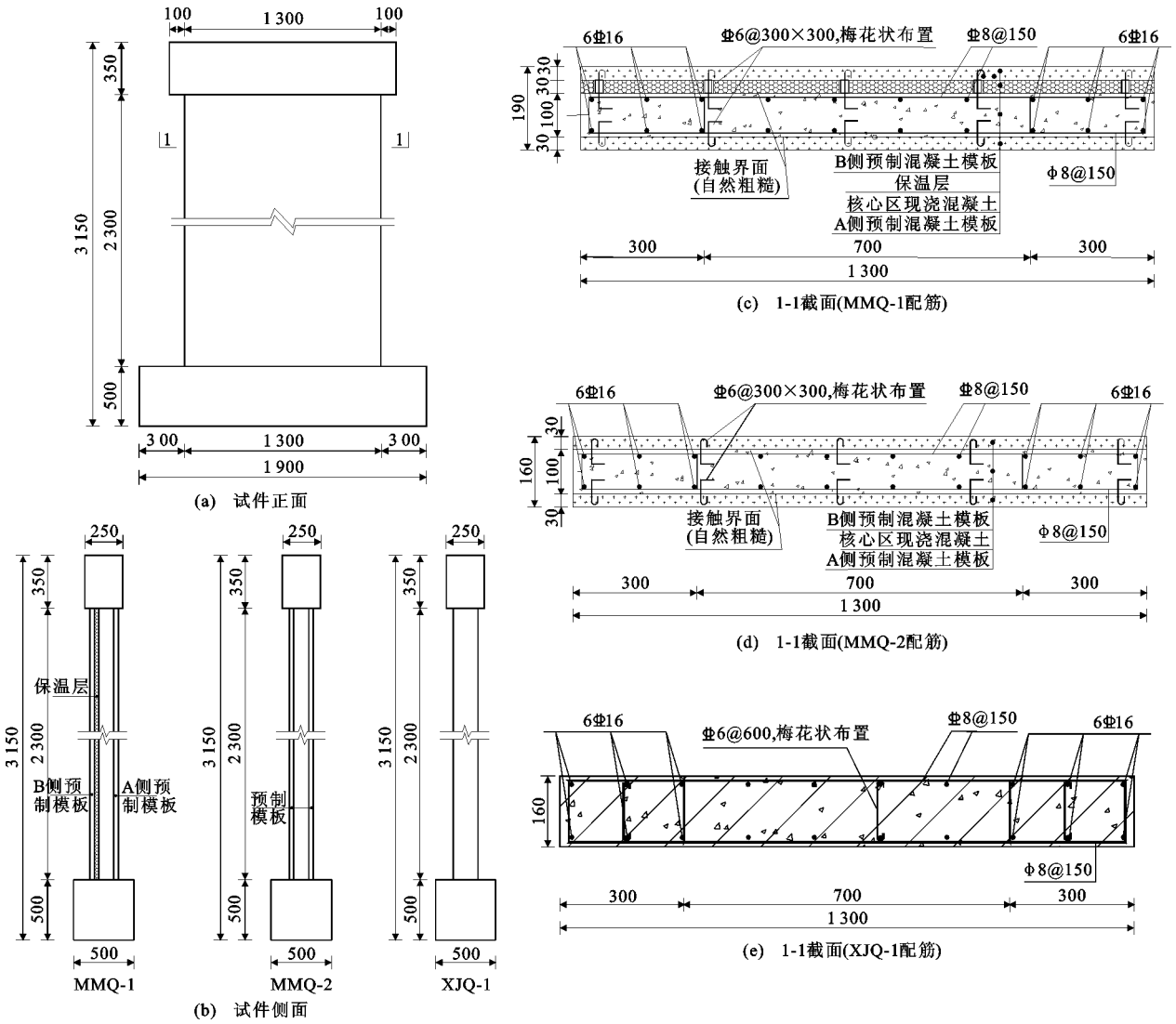


图 1 试件尺寸及配筋 (单位:mm)

Fig. 1 Dimensions of Specimens and Reinforcement (Unit:mm)

表 3 钢筋材料力学性能

Tab. 3 Mechanical Performance of Reinforcement

钢筋类别	钢筋直径/mm	平均屈服强度/ MPa	平均极限强度/ MPa
HPB300	8	349.9	440.3
HRB400	6	486.3	594.3
HRB400	8	506.5	611.8
HRB400	16	550.1	634.1
冷拔低碳钢丝	3	665.2	848.7

匀性^[17],最后将竖向荷载施加至设计荷载值 297.4 kN,并保持竖向荷载值不变。正式加载前,先预加反复荷载 2 次,预加反复荷载值不超过剪力墙开裂荷载计算值的 30%。正式加载时,第 1 阶段采用力控制,每级荷载循环 1 次,每级荷载增量为 30 kN,接近开裂荷载值时,将增量减小至 10 kN,直至墙体出现开裂;剪力墙开裂之后,每级荷载增量为 50

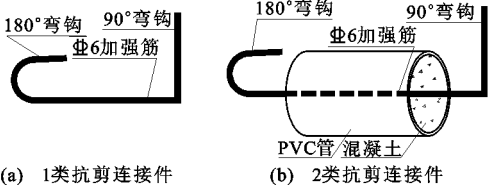


图 2 抗剪连接件

Fig. 2 Shear Connector

表 2 混凝土材料力学性能

Tab. 2 Mechanical Performance of Concrete

试件编号	MMQ-1		MMQ-2		XJQ-1
试件部位	现浇区	预制模板	现浇区	预制模板	现浇混凝土
抗压强度平均值/MPa	31.4	32.1	31.6	33.0	30.7

施加竖向荷载,施加时先加到设计荷载值的 50%,然后卸载,重复 3 次,以消除加载装置的间隙和不均

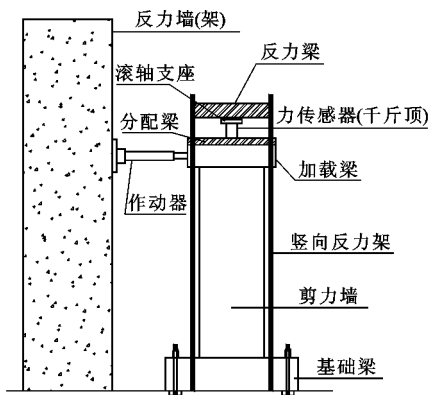


图 3 试验加载装置

Fig. 3 Loading Set-up of Test

kN,直到剪力墙出现屈服。第 2 阶段加载采用位移控制,按屈服时顶点位移的倍数逐级加载,每级循环 3 次,直至试件承载力下降到最大承载力的 85% 为止。

1.3.2 测点布置

由于试件与作动器之间存在间隙,电液伺服加载系统中的位移传感器无法真实地反映墙体的顶点位移,故试验中采用应变式电阻位移计 WYJ-1, WYJ-2 测量墙体顶点的水平位移。位移计 WYJ-3~WYJ-5 分别测量试件 600 mm 高度处 A 侧预制模板、现浇区和 B 侧预制模板的位移值。位移计 WYJ-6, WYJ-7 分别测量试件 200, 400 mm 高度处 A, B 侧预制模板平面外的相对位移。位移计 WYJ-8~WYJ-10 分别测量试件在加载过程中基础梁的翘起、滑移和扭转值。位移计布置如图 4 所示。

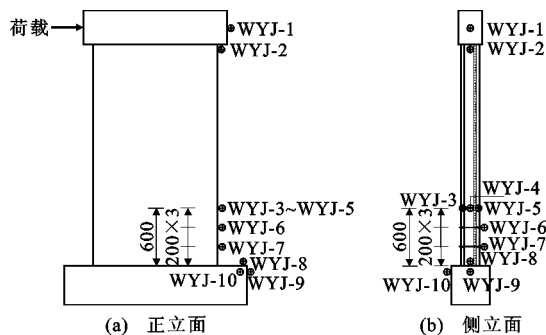


图 4 位移计布置(单位:mm)

Fig. 4 Layout of Displacement Meters (Unit:mm)

2 试验过程及破坏形态

由于各试件总体破坏过程相似,故以试件 MMQ-1 为例介绍试件破坏过程。试验加载初期,试件处于弹性工作阶段,表面无可见裂缝出现。当荷载增加至 -132.6 kN 时,在试件受拉侧 200 mm

高度处出现第 1 条水平裂缝,裂缝贯穿 A 侧预制模板,但未贯通 B 侧预制模板,裂缝最大宽度约为 0.04 mm,此后开始进入弹塑性工作阶段。当荷载增加至 196.0 kN 时,在墙体受拉侧 850 mm 高度处出现第 1 条贯穿 B 侧预制模板的水平裂缝。在随后的加载过程中,墙体边缘两侧继续有新裂缝不断出现,新裂缝都贯穿于 A 侧预制模板,只有少量裂缝贯穿于 B 侧预制模板,而原有裂缝宽度则持续增大,并向墙体中部发展,大部分水平裂缝逐渐延伸发展成弯曲斜裂缝,斜裂缝基本呈向下 45° 方向发展,最终 A 侧预制模板上的斜裂缝在墙体中部形成 X 形交叉斜裂缝。当水平荷载达到 -351.2 kN 时,试件达到屈服状态,此时墙体最大位移约为 14 mm。在随后的加载过程中,墙体新裂缝出现较少,主要以原有裂缝发展为主。当水平位移增加至 35 mm 左右时,试件达到峰值荷载 -440.6 kN,墙体受压区预制模板与现浇区叠合界面处出现明显裂缝,现浇区混凝土有鼓胀现象,受拉区预制模板与基础梁顶面脱离,出现明显缝隙。当水平位移增加至 55 mm 左右时,墙体受压区现浇混凝土被压溃剥落,边缘纵筋受压屈曲外露;预制模板受压鼓胀,部分混凝土被压碎剥落,其中 A 侧预制模板受损更为严重,混凝土压碎剥落区域板内钢筋已外露,此时,水平荷载下降至峰值荷载的 85% 以下,试验加载结束。

对比图 5 中各试件最终裂缝分布和局部破坏特征可以发现,3 片剪力墙的破坏形态基本相同,都为弯剪破坏^[18],但是各试件的裂缝发展和破坏形态在局部区域上还是存在明显的差异:

(1)免模剪力墙 MMQ-1, MMQ-2 与现浇剪力墙 XJQ-1 对比。现浇剪力墙 XJQ-1 水平裂缝长度略大于免模剪力墙 MMQ-1, MMQ-2 的水平裂缝长度;现浇剪力墙 XJQ-1 在达到破坏阶段时在墙身 100~400 mm 高度范围内形成贯通整个截面的主裂缝,而免模剪力墙 MMQ-1, MMQ-2 并未在墙身上观察到贯通整个截面的主裂缝;免模剪力墙 MMQ-1, MMQ-2 在试验加载后期预制模板与基础梁顶面出现明显间隙,而现浇剪力墙 XJQ-1 在整个加载过程中与基础梁之间没有出现此种现象。试件在达到极限承载力之后,现浇剪力墙 XJQ-1 受压区表现为混凝土大面积压溃剥落,边缘纵筋屈曲外露,而免模剪力墙 MMQ-1, MMQ-2 则表现为现浇区混凝土大面积压溃,边缘纵筋屈曲外露,两侧预制模板因受压与现浇混凝土层脱开,部分预制模板混凝土压溃剥落。

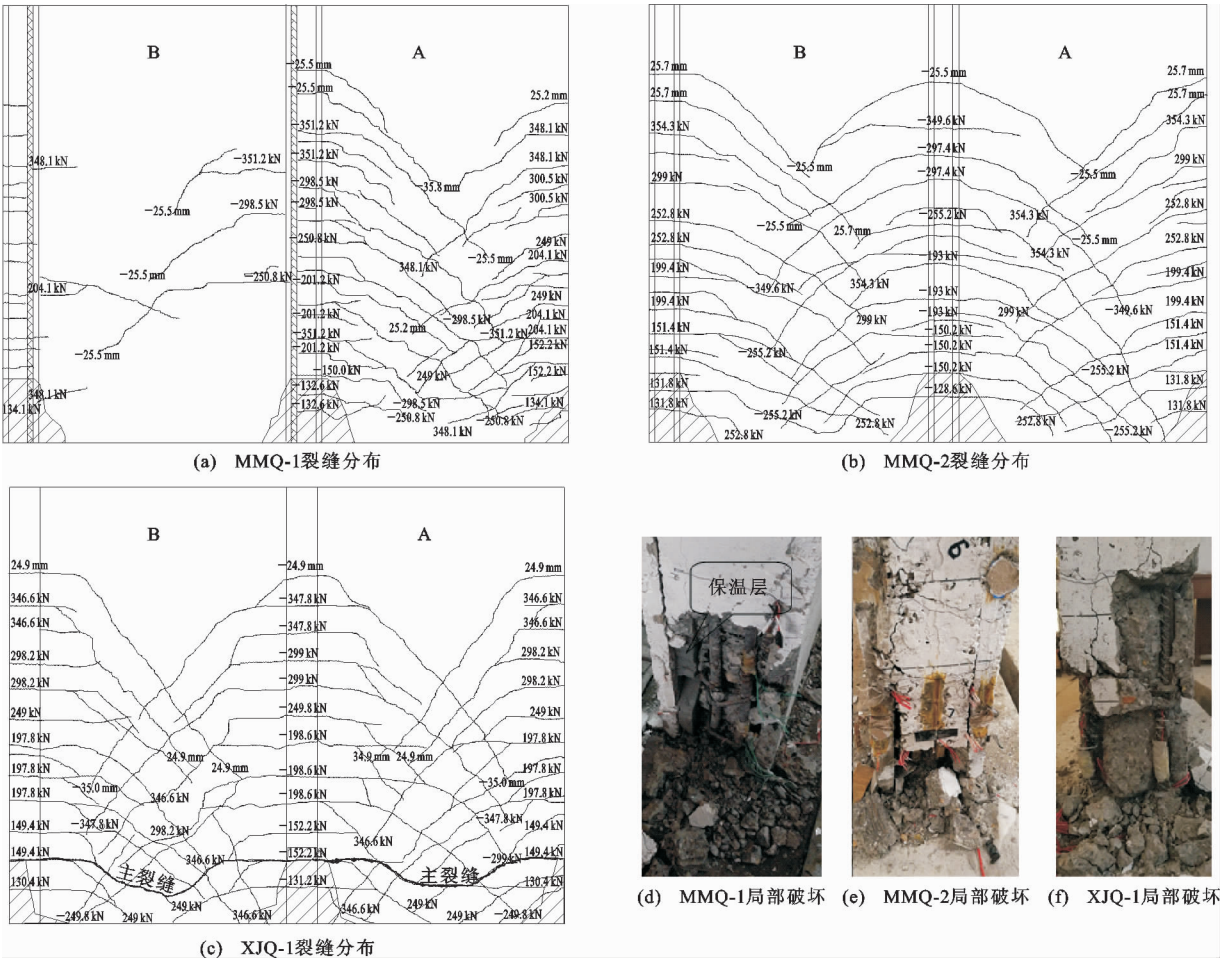


图 5 试件裂缝分布及破坏形态

Fig. 5 Crack Distributions and Failure Modes of Components

(2)免模保温剪力墙 MMQ-1 与免模非保温剪力墙 MMQ-2 对比。在整个加载过程中,免模非保温剪力墙 MMQ-2 中 A,B 侧预制模板裂缝开展比较充分且基本对称,而免模保温剪力墙 MMQ-1 中只有 A 侧预制模板裂缝开展比较充分,B 侧预制模板只在墙身中部出现少量裂缝,并且出现在试验加载的中后期。试件在达到破坏阶段之后,免模非保温剪力墙 MMQ-2 受压区 A,B 侧预制模板受损程度相当,而免模保温剪力墙 MMQ-1 只有 A 侧预制模板受损较严重,靠近保温层的 B 侧预制模板受损相对较轻。

3 试验结果分析

3.1 主要阶段试验结果

试件 MMQ-1,MMQ-2 和 XJQ-1 的主要阶段荷载、位移列于表 4,其中 h_{eu} 为极限点的等效黏滞阻尼系数, μ 为位移延性系数, F_{cr},Δ_{cr} 分别为开裂荷载和开裂位移, F_y,Δ_y 分别为屈服荷载和屈服位移,

F_m,Δ_m 分别为峰值荷载和峰值位移, F_u,Δ_u 分别为极限荷载和极限位移, F_y,Δ_y 和 F_u,Δ_u 分别按文献[19]和文献[16]规定的方法计算获得。由表 4 可知,3 个试件各主要阶段的荷载值基本接近,总体上表现为试件 MMQ-1 略小于试件 MMQ-2,试件 MMQ-2 略小于试件 XJQ-1,主要原因是试件 MMQ-1 中保温层降低了 B 侧预制模板与现浇区的协同工作能力,使得整体强度略低于试件 MMQ-2;相比于试件 XJQ-1,试件 MMQ-1 和 MMQ-2 预制模板与现浇区之间的界面和预制模板与基础梁没有有效的连接措施,形成了墙体的薄弱面,使得整体强度要低于现浇剪力墙。

3.2 荷载-位移滞回曲线

试件 MMQ-1,MMQ-2 和 XJQ-1 的荷载-位移滞回曲线如图 6 所示。由图 6 可知:在试件开裂前,滞回环包围的面积很小,残余变形也非常小,试件基本处于弹性工作阶段;试件开裂后,刚度开始逐渐退化,滞回环包围面积也逐渐增大,但增幅较小,表现

表 4 主要力学性能特征值

Tab. 4 Main Characteristic Values of Mechanical Properties

试件编号	荷载方向	F_{cr}/kN	Δ_{cr}/mm	F_y/kN	Δ_y/mm	F_m/kN	Δ_m/mm	F_u/kN	Δ_u/mm	μ	h_{eu}
MMQ-1	推	134.1	2.89	350.1	17.24	406.4	33.81	345.4	47.00	2.71	0.166
	拉	-132.6	-2.44	-373.6	-16.61	-440.6	-34.19	-374.5	-44.79		
MMQ-2	推	131.8	2.45	357.5	16.37	417.3	33.82	354.7	47.44	2.85	0.167
	拉	-130.6	-2.33	-379.4	-16.67	-451.6	-33.42	-383.9	-46.67		
XJQ-1	推	136.1	2.21	361.4	15.88	433.9	33.40	368.8	50.07	3.05	0.166
	拉	-135.2	-1.91	-390.9	-16.99	-473.1	-33.37	-402.1	-50.11		

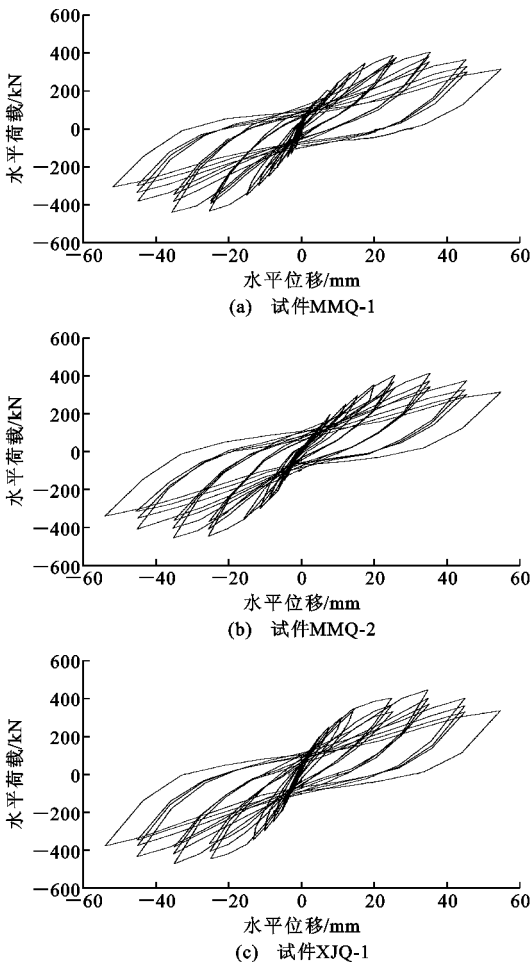


图 6 试件滞回曲线

Fig. 6 Hysteretic Curves of Components

现为稳定发展的梭形,卸载后,试件上的裂缝能够完全闭合,并只存在少量的残余变形;试件达到屈服状态后,变形明显增大,刚度显著降低,滞回环面积大幅增加,试件开始大量耗能,卸载后,试件存在较大的残余变形,说明试件的塑性逐渐明显,同时,滞回环开始由梭形逐渐发展成弓形,出现一定的捏缩效应;试件达到峰值荷载后,承载力逐渐下降,并产生了较大的剪切滑移,滞回环捏缩效应也因此越来越明显,开始从弓形向反 S 形过渡。

由图 6 还可以看出,3 个试件的滞回曲线基本

形态和发展趋势相似,都具有比较好的耗能能力。试件 MMQ-1 和 MMQ-2 的滞回环捏缩效应比试件 XJQ-1 的滞回环捏缩效应略明显,原因主要是与试件 XJQ-1 相比,试件 MMQ-1 和 MMQ-2 中预制模板通过抗剪连接件和自然粗糙面与现浇区相连,墙体整体性稍差,并且预制模板与基础梁之间没有有效连接,预制模板参与工作程度有限,导致墙体剪切滑移变形增大,捏缩效应加剧。

3.3 骨架曲线

根据试验滞回曲线得到的骨架曲线如图 7 所示。由图 7 可知:在开裂前,试件骨架曲线基本成直线,呈现出弹性特征;开裂后,试件刚度下降,骨架曲线斜率变小,曲线上出现比较明显的拐点,试件开始进入弹塑性工作阶段;达到屈服状态以后,试件刚度进一步降低,随着位移的增加,荷载增长缓慢;加载至峰值荷载以后,试件进入强度退化阶段,骨架曲线开始稳定下降。对比图 7 中各试件的骨架曲线可以发现,各骨架曲线发展规律基本一致。从整体上来看,试件 MMQ-1 和 MMQ-2 骨架曲线的斜率略低于试件 XJQ-1 骨架曲线的斜率,说明预制模板与现浇区和基础梁间形成的薄弱面一定程度上削弱了墙体的刚度;另外,在达到峰值荷载以后,试件 XJQ-1 骨架曲线的下降速度要低于试件 MMQ-1 和 MMQ-2 骨架曲线的下降速度,主要原因是试件受压区预制模板因受压鼓胀,与现浇区混凝土脱离,在没有充分发挥混凝土强度的情况下就退出工作,受压区面积快速减小,导致免模剪力墙承载力的下降速度明显快于现浇剪力墙承载力的下降速度。

3.4 刚度退化

各试件的刚度退化曲线如图 8 所示。由图 8 可知,各试件的刚度退化规律大致相同,加载初期试件的刚度都比较大,随着荷载的增大而迅速退化,进入屈服阶段后,试件刚度退化速度减缓,并逐渐趋于稳定。对比试件 MMQ-1,MMQ-2 和 XJQ-1 的刚度退化情况可知,三者整体上相差不大,但试件 MMQ-1

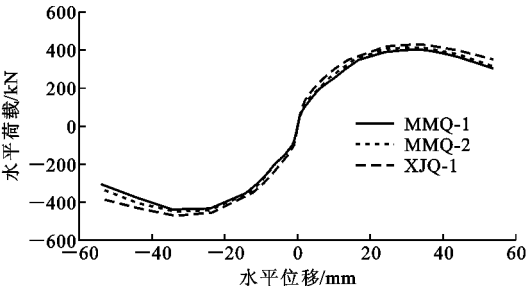


图 7 试件骨架曲线
Fig. 7 Skeleton Curves of Components

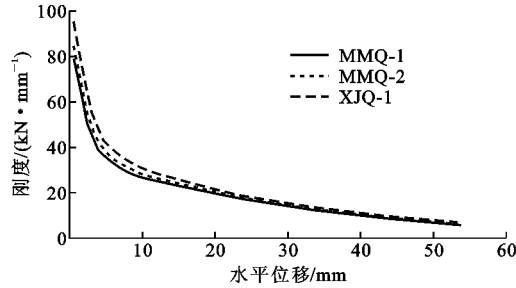


图 8 刚度退化曲线
Fig. 8 Stiffness Degradation Curves

和 MMQ-2 的初始刚度约为试件 XJQ-1 初始刚度的 82.9% 和 88.6%，且试件 XJQ-1 的刚度退化曲线始终位于试件 MMQ-1 和 MMQ-2 刚度退化曲线的上方，说明免模剪力墙中预制模板能够与现浇区组成整体共同工作，但是一定程度上削弱了墙体的刚度。

3.5 延性性能

延性能够反映出结构或构件的塑性变形能力，本文采用位移延性系数来衡量试件的延性性能^[20-21]，各试件的位移延性系数 μ 如表 4 所示。由表 4 可知，各试件的屈服位移相近，但试件 XJQ-1 的极限位移要大于试件 MMQ-1、MMQ-2 的极限位移，所以试件 XJQ-1 的位移延性系数要略大于试件 MMQ-1、MMQ-2 的位移延性系数，其主要原因是在加载后期，免模剪力墙的预制模板受压鼓胀，过早地退出了工作，导致墙体承载力快速下降，延性降低；总体上来说，免模剪力墙的位移延性系数能够达到现浇剪力墙位移延性系数的 88.9%~93.4%，说明免模剪力墙能够达到与现浇剪力墙相近的延性性能。

3.6 耗能能力

采用等效黏滞阻尼系数 h_e ^[16] 来分析试件的耗能能力，等效黏滞阻尼系数 h_e 的计算如图 9 和公式 (1) 所示

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \frac{S_{ABCA} + S_{ADCA}}{S_{\triangle OBE} + S_{\triangle ODF}} \quad (1)$$

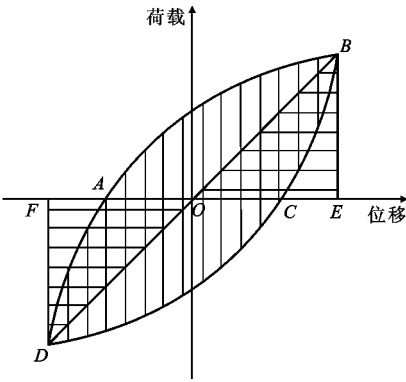


图 9 等效黏滞阻尼系数计算示意
Fig. 9 Calculation Schematic Diagram of Equivalent Viscous Damping Coefficient

式中： S_{ABCA} ， S_{ADCA} 分别为曲线 $ABCA$ ， $ADCA$ 所围的面积； $S_{\triangle OBE}$ ， $S_{\triangle ODF}$ 分别为 $\triangle OBE$ ， $\triangle ODF$ 的面积。

试件 MMQ-1、MMQ-2 和 XJQ-1 在不同加载等级下的等效黏滞阻尼系数如图 10 所示。由图 10 可知，各试件的等效黏滞阻尼系数整体上随着墙体水平位移的增加而增大，但在加载前期存在一定的波动现象。在试件屈服前，等效黏滞阻尼系数增长速度相对缓慢，表明此阶段试件变形不大，裂缝发展不充分，耗散能量较少；试件达到屈服阶段以后，等效黏滞阻尼系数增长速度显著加快，表明试件随着水平位移的增大，墙体变形加剧，裂缝不断发展，墙体耗能明显增大。对比表 4 中免模剪力墙和现浇剪力墙极限点的等效黏滞阻尼系数 h_{eu} 可知，试件 MMQ-1 和 MMQ-2 的等效黏滞阻尼系数与试件 XJQ-1 的等效黏滞阻尼系数相近，即耗能大小相近。根据上述对各试件等效黏滞阻尼系数的发展过程及数值大小分析可知，免模剪力墙具有与现浇剪力墙相近的耗能性能。

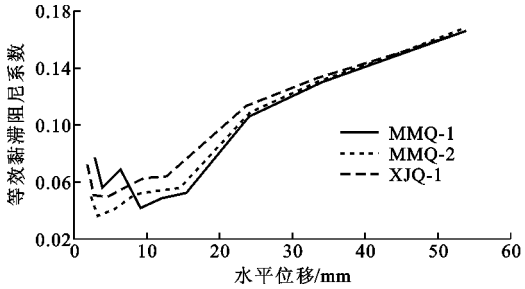


图 10 等效黏滞阻尼系数-位移曲线
Fig. 10 Equivalent Viscous Damping Coefficient-displacement Curves

3.7 免模剪力墙整体性分析

本文通过监测免模剪力墙工作过程中预制模板与现浇区平面内的相对位移和预制模板之间的平面

外相对位移,来探究免模剪力墙各组成部分的协同工作能力及墙体的整体性。

3.7.1 预制模板平面内的相对位移分析

免模剪力墙预制模板平面内的相对位移主要是指试件在循环荷载作用下预制模板与现浇区在平面内的相对错动情况。试件 MMQ-1 和 MMQ-2 墙身 600 mm 高度处在每一次循环中达到峰值荷载时预制模板与现浇区平面内的相对位移如图 11 所示。由图 11 可知:在加载初期,试件受荷程度低,预制模板与现浇区的平面内相对位移非常小;试件到达开裂以后,预制模板与现浇区的相对位移随荷载的增加开始缓慢增长,但增长幅度非常小,预制模板与现浇区之间没有明显可见的错动痕迹;试件屈服以后,墙体受压区预制模板与现浇区逐渐脱开,导致墙体整体性下降,预制模板与现浇区相对位移进入快速增长阶段;最终加载至极限荷载时,试件 MMQ-1 和 MMQ-2 预制模板相对于现浇区的最大位移分别为 3.66 mm 和 2.52 mm。从预制模板与现浇区的相对位移发展过程及最终结果来看,通过抗剪连接件和自然粗糙面连接预制模板与现浇区的措施,能够较好地保证免模剪力墙各组成部分在平面内的整体性。

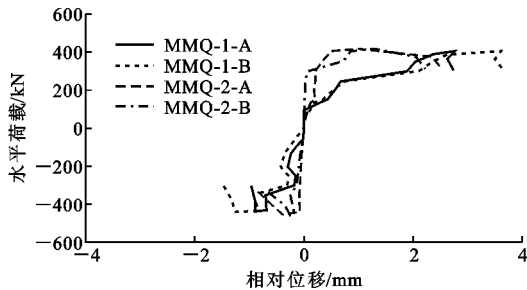


图 11 预制模板平面内荷载-位移曲线

Fig. 11 In-plane Load-displacement Curves of Prefabricated Formwork

3.7.2 预制模板平面外的相对位移分析

由于无法实测获得免模剪力墙墙底预制模板平面外的最大相对位移,本文通过墙体 400 mm 和 200 mm 高度处预制模板平面外位移的实测值近似地计算出墙体底部预制模板平面外的位移值,计算简图如图 12 所示,记墙体 400 mm 和 200 mm 高度处的实测预制模板平面外位移分别为 $\Delta_{0.4}$ 和 $\Delta_{0.2}$,墙体底部预制模板平面外位移的计算值为 Δ_0 ,计算过程中忽略预制模板平面外的弯曲变形,则可根据比例关系得到

$$\frac{\Delta_{0.2} - \Delta_{0.4}}{200} = \frac{\Delta_0 - \Delta_{0.4}}{400} \quad (2)$$

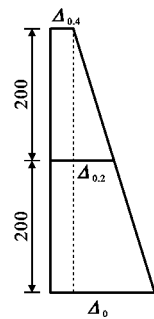


图 12 Δ_0 计算简图(单位:mm)

Fig. 12 Computing Diagram of Δ_0 (Unit:mm)

由式(2)简化得

$$\Delta_0 = 2\Delta_{0.2} - \Delta_{0.4} \quad (3)$$

根据式(3)可近似计算出试件 MMQ-1 和 MMQ-2 墙体底部预制模板平面外位移值,计算结果如图 13 所示。由图 13 可知:在加载初期,试件受荷程度较低,几乎没有出现可以观测到的鼓胀现象;试件出现开裂以后,预制模板的平面外相对位移随荷载的增加开始缓慢增长,此阶段预制模板受压鼓胀程度较低,墙体受压区依然能保持较好的整体性;试件屈服以后,在较大位移幅值作用下,墙体受压区预制模板因受压向外侧产生较大鼓胀变形,与现浇区逐渐脱开,界面黏结力消失,使预制模板平面外变形在随后的加载过程中迅速发展;最终加载至极限荷载时,试件 MMQ-1 和 MMQ-2 墙底预制模板平面外的最大位移分别为 8.20 mm 和 9.56 mm,虽然试件受压区预制模板产生了较大的平面外变形,但是变形较大的区域都处于墙体的塑性铰区,整个试件的整体性并没有产生明显的破坏。从 A,B 侧预制模板间的平面外相对位移发展过程及最终结果来看,通过抗剪连接件和自然粗糙面连接预制模板与现浇区的措施能够较好地保证免模剪力墙各组成部分在平面外的整体性。

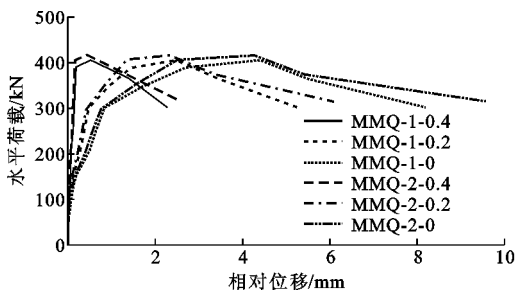


图 13 预制模板平面外荷载-位移曲线

Fig. 13 Out-of-plane Load-displacement Curves of Prefabricated Formwork

4 结 语

(1)免模剪力墙与现浇剪力墙的受力过程及最终破坏形态基本相同,免模剪力墙具有与现浇剪力墙相近的受力性能。

(2)免模剪力墙中预制模板与现浇区和基础梁间形成的薄弱面一定程度上削弱了墙体的整体性能,使得免模剪力墙滞回曲线、骨架曲线、刚度退化、延性和耗能等抗震性能指标略低于现浇剪力墙,但整体上相差不大。

(3)免模保温剪力墙中保温层对墙体性能的影响不大,免模保温剪力墙与免模非保温剪力墙具有相近的工作性能。

(4)免模剪力墙中预制模板平面内和平面外的相对位移均较小,没有出现较大范围预制模板与现浇区的分离现象,这表明通过抗剪连接件和自然粗糙面连接预制模板与现浇区的措施能够较好地保证免模剪力墙各组成部分的协同工作能力和墙体的整体性。

参考文献:

References:

- [1] 钱稼茹,吕文,方鄂华.基于位移延性的剪力墙抗震设计[J].建筑结构学报,1999,20(3):42-49.
QIAN Jia-ru, LU Wen, FANG E-hua. Displacement Ductility-based Aseismic Design for Shear Walls[J]. Journal of Building Structures, 1999, 20(3): 42-49.
- [2] 彭媛媛. 预制钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验研究[D]. 北京:清华大学,2010.
PENG Yuan-yuan. Experimental Study on Seismic Behavior of Pre-cast Reinforced Concrete Shear Walls [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [3] 吴东岳. 浆锚连接装配式剪力墙结构抗震性能评价[D]. 南京:东南大学,2016.
WU Dong-yue. Seismic Analysis of Steel Grouted Connecting Precast Shear Wall Structure [D]. Nan-jing: Southeast University, 2016.
- [4] 王啸霆,王涛,李文峰,等. 装配整体式钢筋混凝土剪力墙子结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(6): 1-11.
WANG Xiao-ting, WANG Tao, LI Wen-feng, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Monolithic Precast Reinforced Concrete Shear Wall Substructure[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(6):

- 1-11.
- [5] BUSH T D, STINE G L. Flexural Behavior of Composite Precast Concrete Sandwich Panels with Continuous Truss Connectors[J]. PCI Journal, 1994, 39(2): 112-121.
- [6] BENAYOUNE A, SAMAD A A A, ABANG ALI A A, et al. Response of Pre-cast Reinforced Composite Sandwich Panels to Axial Loading[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(3): 677-685.
- [7] BENAYOUNE A, SAMAD A A A, TRIKHA D N, et al. Structural Behaviour of Eccentrically Loaded Precast Sandwich Panels[J]. Construction and Building Materials, 2006, 20(9): 713-724.
- [8] 连星,叶献国,王德才,等. 叠合板式剪力墙的抗震性能试验分析[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版, 2009, 32(8): 1219-1223.
LIAN Xing, YE Xian-guo, WANG De-cai, et al. Experimental Analysis of Seismic Behavior of Superimposed Slab Shear Walls[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2009, 32(8): 1219-1223.
- [9] 王滋军,刘伟庆,魏威,等. 钢筋混凝土水平拼接叠合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(7): 147-155.
WANG Zi-jun, LIU Wei-qing, WEI Wei, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Reinforced Concrete Composite Shear Wall with Level Splice [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(7): 147-155.
- [10] 张伟林,沈小璞,吴志新,等. 叠合板式剪力墙 T 型、L 型墙体抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(6): 196-201.
ZHANG Wei-lin, SHEN Xiao-pu, WU Zhi-xin, et al. Experimental Study of Seismic Performance on T and L Types Superimposed-slab-shear-walls Structure [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(6): 196-201.
- [11] 吴方伯,段芳敏,欧阳靖,等. 免模保温剪力墙施工工艺及抗震性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(5): 83-91.
WU Fang-bo, DUAN Fang-min, OUYANG Jing, et al. Construction Process and Seismic Performance of Non-template Insulation Shear Wall[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(5): 83-91.
- [12] 段芳敏. 免模保温剪力墙抗震性能及结合界面剪切性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2017.
DUAN Fang-min. The Research on Seismic Perform-

- p>ance and Adjoining-face Shear Property of Non-tem-plate Insulation Shear Wall [D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [13] GB/T 50081—2002, 普通混凝土力学性能试验方法标准[S].
GB/T 50081—2002, Standard Test Method for Mechanical Properties of Ordinary Concrete[S].
- [14] GB/T 228. 1—2010, 金属材料拉伸试验:第 1 部分:室温试验方法[S].
GB/T 228. 1—2010, Metallic Materials — Tensile Testing — Part 1: Method of Test at Room Temperature[S].
- [15] GB/T 50152—2012, 混凝土结构试验方法标准[S].
GB/T 50152—2012, Standard for Test Method of Concrete Structures[S].
- [16] JGJ/T 101—2015, 建筑抗震试验规程[S].
JGJ/T 101—2015, Specification for Seismic Test of Buildings[S].
- [17] 干淳洁. 内置钢板钢筋混凝土剪力墙抗震性能研究[D]. 上海:同济大学, 2008.
GAN Chun-jie. Study on Seismic Behavior of Steel Plate Reinforced Concrete Shear Walls[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [18] 肖全东. 装配式混凝土双板剪力墙抗震性能试验与理论研究[D]. 南京:东南大学, 2015.
XIAO Quan-dong. Seismic Behavior Test and Theoretical Study of Double-wall Precast Concrete Shear Walls[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [19] 李俊华. 低周反复荷载下型钢高强混凝土柱受力性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2005.
LI Jun-hua. Seismic Study on the Performance of Steel Reinforced High-strength Concrete Columns Under Low Cyclic Reversed Loading[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2005.
- [20] 唐九如. 钢筋混凝土框架节点抗震[M]. 南京:东南大学出版社, 1989.
TANG Jiu-ru. Aseismic of Reinforced Concrete Frame Joints [M]. Nanjing: Southeast University Press, 1989.
- [21] 毕研超. 叠合板式剪力墙在低周循环荷载作用下的弹塑性耗能分析[D]. 合肥:安徽建筑大学, 2013.
BI Yan-chao. Elastoplastic and Energy-consumption Analysis on Superimposed Wall Under the Cyclic Loading[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2013.