

## 现浇剪力墙装配整体式框-剪结构抗震性能\*

马军卫<sup>1</sup>,潘金龙<sup>1†</sup>,蒋苏童<sup>1</sup>,尹万云<sup>2</sup>,刘守城<sup>2</sup>

(1.东南大学 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室,江苏 南京 210096;

2.中国十七冶集团有限公司,安徽 马鞍山 243000)

**摘要:**为研究现浇剪力墙装配整体式框-剪结构的抗震性能,对2榀(其中1榀为装配式试件 PCFW1,1榀为全现浇试件 RCFW)1/2比例两层两跨混凝土框-剪结构试件进行拟静力试验,研究其破坏过程和机理、滞回性能、延性、耗能能力和塑性铰发展情况等.结果表明:装配式试件 PCFW1 与全现浇试件 RCFW 相比,其破坏过程、破坏机制和最终破坏形态基本相同.装配式试件 PCFW1 与全现浇对比试件 RCFW 的滞回曲线均较为丰满,试件的屈服荷载、峰值荷载、极限荷载均略大于全现浇试件 RCFW 的相应值,但其差值均小于10.0%,延性低于全现浇试件 RCFW;灌浆套筒可以有效传递纵向钢筋应力;现浇剪力墙装配整体式框-剪结构中,顶层边节点处梁上钢筋弯锚可用钢筋焊端锚板代替.

**关键词:**拟静力荷载;滞回曲线;位移延性;能量耗散;灌浆套筒

**中图分类号:**TU375;TU317.1

**文献标志码:**A

## Experimental Investigation on Seismic Performance of Precast Concrete Frame-shear Wall Structures Comprised of Cast-in-place Concrete Shear Walls

MA Junwei<sup>1</sup>, PAN Jinlong<sup>1†</sup>, JIANG Sutong<sup>1</sup>, YIN Wanyun<sup>2</sup>, LIU Shoucheng<sup>2</sup>

(1.Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2.China MCC17 Group Corp., Ltd, Maanshan 234000, China)

**Abstract:** To investigate the seismic performance of precast frame-shear wall structures comprised of cast-in-place concrete shear walls and prefabricated frame components, two 1/2 scale test specimens were fabricated and carried out under quasi-static reversed cyclic lateral loading in laboratory. One specimen named PCFW1 is a precast structure comprised of cast-in-place concrete shear walls and prefabricated frame components, and the other one named RCFW is a conventional cast-in-place concrete one, which is used as a reference specimen, all two test specimens are two bay-two story RC specimens. Some important characteristics such as failure process, failure mechanism, hysteretic response, displacement ductility, energy dissipation capacities and plastic hinge development process were studied. The test results show that the test specimen PCFW1 have similar failure mode compared with the test specimen RCFW. The lateral load-displacement hysteretic loops of both specimens are plump. The characteristic values of bearing

\* 收稿日期:2016-07-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278118), National Natural Science Foundation of China (51278118); 中国中冶“三五”重大科技专项资助项目(中冶科[201]1号), The Third Five-Year Major Scientific and Technological Project of China Metallurgical Group Corporation(201-1)

作者简介:马军卫(1981—),男,陕西蒲城人,东南大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: jinlongp@gmail.com

capacity such as yield load, peak load, and ultimate load of specimen PCFW1 are larger than those of RCFW, but the difference is less than 10.0%. The displacement ductility of specimen PCFW1 is obviously less than that of RCFW; Grout-filled sleeves can transmit the longitudinal steel stress efficiently; The anchor bars in a knee connection in the top story can be replaced by bars welded with anchor plate in precast shear wall-frame structures comprised of cast-in-place concrete shear walls and prefabricated frame components.

**Key words:** quasi-static reversed cyclic lateral loading; hysteretic curves; displacement ductility; energy dissipation; grout-filled sleeves

装配式建筑有利于环境保护、节约资源,同时可缩短建设工期,提升工程质量,提高建筑品质。装配式建筑按结构体系不同,可分为装配式框架体系、装配式剪力墙体系和装配式框-剪体系等。目前相比前两种结构体系,国内外学者对于装配式框-剪结构的研究尚相对较少,国外学者对其研究的重点集中在采用干式节点连接的框-剪结构抗震性能和理论分析等方面<sup>[1-2]</sup>。国内学者近年来对装配式结构的研究主要集中在装配式剪力墙<sup>[3-6]</sup>、装配式框架<sup>[7-8]</sup>的抗震性能等方面,旨在推进装配式结构在我国的应用,目前对于采用湿节点的装配式框-剪结构的研究还较为鲜见。鉴于装配式框-剪结构的重要性,有必要对其进行深入研究。

目前我国行业规范<sup>[9]</sup>对于装配式框-剪结构的推荐做法是:剪力墙采用现浇,框架采用装配,即采用“半”装配的形式。这是基于框-剪结构中,剪力墙在地震中作为第一道防线,需承担大部分的水平力,故剪力墙的纵向钢筋连接尤为重要,慎重起见,规范对剪力墙部位采取了较为保守的办法——即推荐采用现浇形式。但剪力墙现浇、框架装配这种“半”装配式框-剪结构的抗震性能到底如何?其与传统的全现浇框-剪结构的差异性需要加以研究。

世构(SCOPE)体系是一种预制预应力混凝土装配整体式框架结构体系,在我国的研究相对较早,目前已颁布了相关规程<sup>[10]</sup>,但以往对其的研究还仅限于节点、框架等方面<sup>[11-12]</sup>,将其应用于框-剪结构中,即剪力墙采用普通现浇剪力墙,框架部分采用世构体系,关于这类结构的抗震性能试验,目前尚未见诸报道。另外,在世构体系中柱-柱的连接是采用预埋工字钢或密封钢管插筋连接<sup>[10]</sup>,这两种连接的弊端明显,即柱子纵筋的搭接长度较长,不便于运输、安装。而灌浆套筒连接技术是近年来兴起的一种新型钢筋连接接头,具有钢筋搭接长度较短、连接性能可靠等优点。鉴于此,本文将世构体系

中柱-柱连接采用灌浆套筒连接,即形成了“改进的世构体系”,同时将其应用于框-剪结构中,通过试验验证这种新型柱-柱连接接头的可靠性。

基于上述原因,设计制作了2榀1/2比例混凝土框-剪结构模型,通过对其进行低周反复荷载试验,对其破坏形态、滞回耗能、位移延性等进行较为系统地研究。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

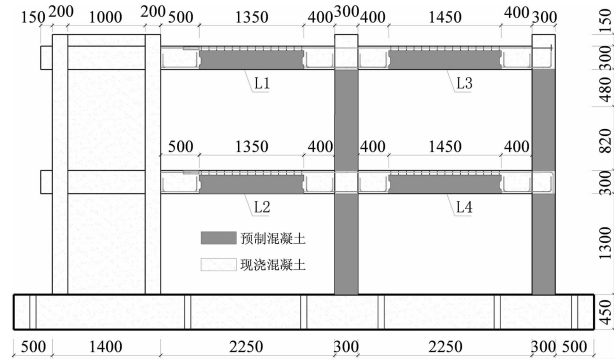
试件设计为2层2跨1/2缩尺模型结构,设计制作了两个试件,一个为现浇剪力墙预制框架装配整体式框-剪结构试件PCFW1,一个为全现浇对比试件RCFW,其配筋、混凝土等级与试件PCFW1除节点区以外的其余对应部位均完全相同,试件RCFW节点区水平向、竖向钢筋连接分别为梁、柱纵筋通长连接,试件采用同一标号混凝土整浇而成。试件PCFW1的拆分情况如图1所示,制作时先将地梁和剪力墙同时预制,然后将一、二层框架柱、框架梁进行预制,框架梁预制时在梁端设置有键槽,键槽的尺寸满足文献<sup>[10]</sup>的要求。

框架梁的水平向钢筋连接采用U型筋搭接连接,具体如图1所示。框架柱的竖向钢筋连接采用半灌浆套筒连接,半灌浆套筒预埋在预制柱的底部,其一端与被连接钢筋通过套丝螺纹连接,另一端与下侧柱的伸出钢筋通过灌浆连接,如图2所示。

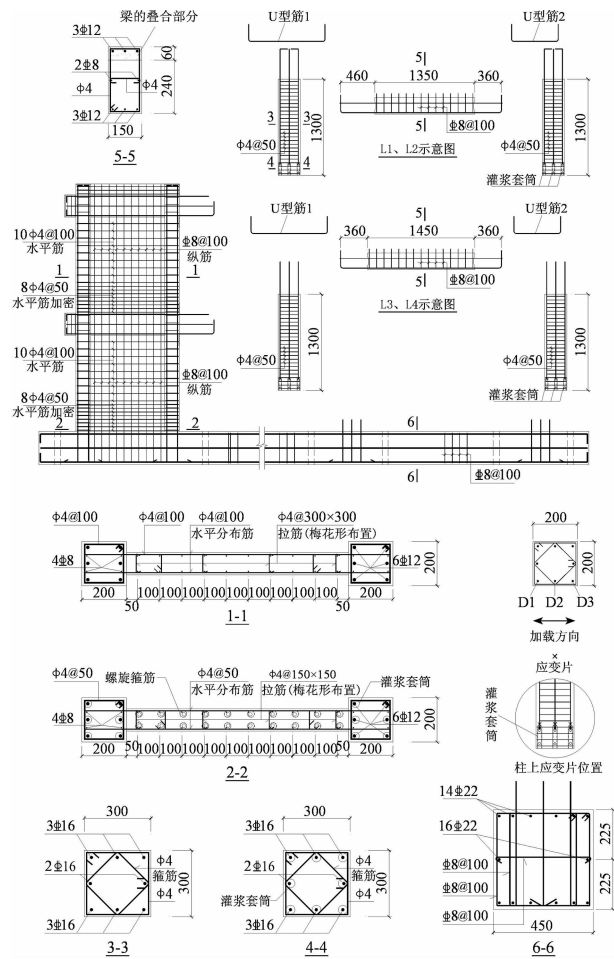
试件装配时,先进行一层装配,将一层框架柱装配到地梁上并进行灌浆作业,灌浆1d后,安装一层预制梁,在柱-梁节点处用U型筋将梁上水平纵筋连接,再绑扎后浇带处箍筋、支模板、浇筑后浇混凝土。同法进行试件第二层装配,即形成现浇剪力墙、预制框架的装配整体式框-剪结构。框架梁为叠合梁,装配时在梁上部、端部设置有后浇带,后浇带

尺寸满足文献[10]的要求,具体如图 1(a)所示。

框架柱装配前,将柱底表面混凝土凿毛,并用高压水冲洗干净,然后进行坐浆、安装、灌浆等作业。框架柱装配时注意构件垂直、调平,以确保试件装配精度。



(a)试件拆分拼装示意图



(b)试件配筋图

图 1 试件几何尺寸及配筋图

Fig.1 Specimen geometry and steel detailing

按文献[10]的规定,图 1(a)中框架二层边节点梁上弯锚钢筋弯折后的锚入柱子的长度较长( $\geq$

$1.7l_a$ ),致使二层边柱预制部分高度减小,后浇混凝土量增多,同时增加了模板安装、钢筋绑扎等工序的工作量,给实际施工带来不便。考虑到框-剪结构与纯框架结构相比,水平抗侧能力较大,剪力墙在地震中承担大部分的水平抗力,同时考虑到施工的便捷性,本次试验中,将试件 PCFW1 二层边节点处梁上钢筋弯锚用钢筋焊端锚板代替(图 3 所示),并通过试验验证这种锚固方法的可靠性。

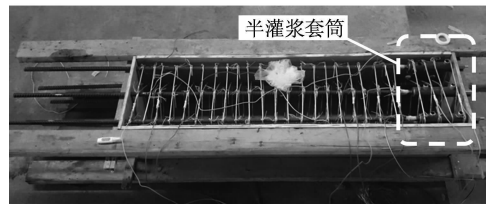


图 2 半灌浆套筒示意图

Fig.2 Schematic of hybrid grouted sleeve



图 3 二层边节点梁上弯锚钢筋细部图

Fig.3 The bar anchor detailing in a knee connection in the top story

### 1.2 材料性能

现浇试件 RCFW 的混凝土采用强度等级为 C30 的商品细石混凝土,装配式试件 PCFW1 除后浇带处以外的混凝土均采用强度等级为 C30 的商品细石混凝土,后浇带处(梁上叠合部位及框架节点处)用量较少的混凝土采用人工拌制的强度等级为 C35 的微膨胀细石混凝土,两个试件的箍筋采用直径为 4 mm 的 8 # 镀锌铁丝,其余钢筋均采用 HRB400 级钢筋。试件制作时预留了相应混凝土试块,正式试验前进行了材性试验,混凝土试块抗压强度实测值  $f_{cu}$  如表 1 所示。

表 1 实测混凝土立方体抗压强度

Tab.1 Cubic compressive strength of concrete

试件编号	混凝土种类	$f_{cu}/\text{MPa}$
RCFW	现浇	31.3
PCFW1	预制	33.0
	现浇	45.5

实测钢筋力学性能如表 2 所示。试件装配灌浆

时,预留了相应的灌浆料试块(40 mm×40 mm×160 mm),测得灌浆料抗折强度平均值 14.1 MPa,抗压强度平均值 86.1 MPa.

表 2 钢筋力学性能

纵筋种类	屈服强度 /MPa	极限强度 /MPa	延伸率 /%	弹性模量 /MPa
Φ 4	372.42	584.10	30.8	$1.92 \times 10^5$
Φ 8	490.64	661.94	32.8	$2.32 \times 10^5$
Φ 12	495.44	650.94	29.2	$2.01 \times 10^5$
Φ 16	414.58	571.75	24.8	$2.03 \times 10^5$

### 1.3 试验装置及加载方案

试验装置如图 4 所示,水平力由最大拉压能力为 1 500 kN 的 MTS 电液伺服作动器施加.MTS 与试件之间通过竖向分配钢梁将水平力进行分配,使试件 1,2 层上分配的水平力按倒三角形分布,试验前在 1,2 层剪力墙端部设置夹具,先通过 8 根 φ32 精轧螺纹钢将试件与竖向分配钢梁拉结,再通过高强螺杆将竖向分配钢梁与作动器头拉结.试件上竖向力通过竖向千斤顶来施加,其中剪力墙顶部布置水平分配钢梁,分配钢梁中部布置 1 个 1 000 kN 油压千斤顶,两个框架柱上侧各布置 1 个 500 kN 的油压千斤顶.为了避免梁上施加竖向荷载带来的内力重分布和加载装置的复杂性,框架梁上未施加竖向荷载.

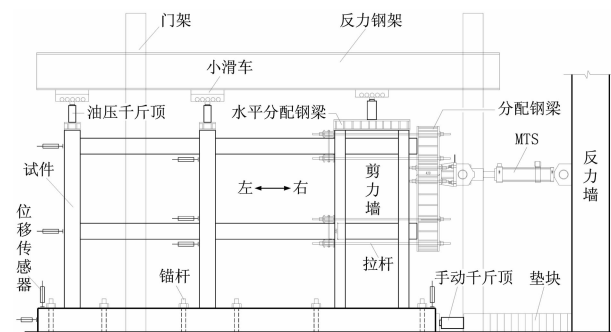


图 4 加载装置

Fig.4 Test setup

试验开始时,首先施加竖向荷载,考虑到实验室加载条件限制,中柱和边柱按照实际轴压比 0.15,墙体按实际轴压比 0.12 进行施加,试验轴压比较实际结构的小.在试验过程中,轴压力保持不变.根据 JGJ 101 — 1996《建筑抗震试验方法规程》<sup>[13]</sup>,水平加载采用位移控制的方法.先以作动器水平位移分别为 2,3,4,5,6,7 mm 进行加载,每个位移值循环 1 次,然后分别以 8,16,24,32,40,48,56 mm(即按试件总高的 0.25%,0.50%,0.75%)进

行加载,每个位移值循环 3 次,加载至试件水平荷载降至峰值荷载的 85%以下或滞回环出现不稳定状态时终止试验.定义作动头伸长为正向加载(即图 4 中作动器向左为正向),缩短为负向加载.

试验时在框架边柱外侧一、二层框架梁截面形心对应位置布置了位移计,用来量测试验过程中一、二层的位移.试件制作时在一、二层剪力墙底部纵筋、框架梁上下水平纵筋两端、框架柱底纵筋距半灌浆顶面 20 mm 处粘贴了电阻应变片,用来量测试验过程中试件各部位钢筋的应力水平.用 DH3816 静态测试系统采集记录试验数据.

## 2 试验现象

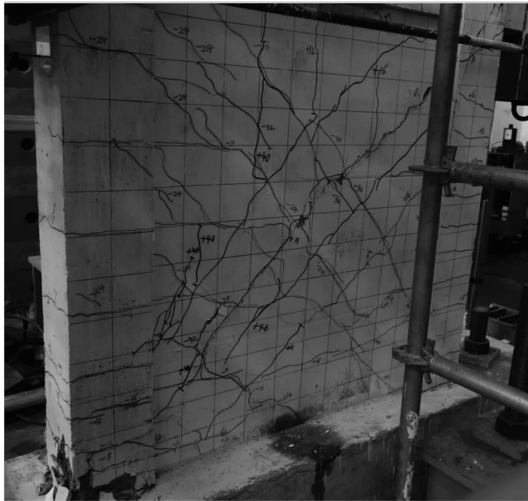
### 2.1 试件 RCFW

正式试验前,先按计算的竖向荷载值施加轴力,水平荷载按预估的开裂荷载的 20%预加载两次,检查仪器等一切正常后进行正式加载<sup>[13]</sup>.

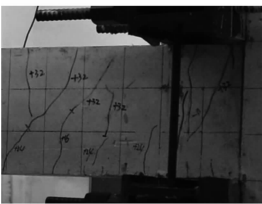
试件 RC-1 在加载过程中(以下对试件部位的描述见图 4,下同),正向加载位移至 3.0 mm(184 kN)时,一层墙体右侧边柱距地梁顶面 200 mm 处出现水平裂缝;正向加载位移至 4.0 mm(224 kN)时,二层右侧梁距墙体 200 mm 附近出现 1 条竖向裂缝;负向加载位移为 5.0 mm(302 kN)时,墙体左侧边柱距地梁顶面 150 mm 处出现水平裂缝,随后施加荷载过程中,原裂缝由墙体边缘向中部继续开展;位移 8.0 mm 第 1 次循环正向加载位移至 8.0 mm(445 kN)时,一层边柱距离地梁上表面 180 mm 处出现 1 条斜裂缝,一层中柱距地梁上表面 120 mm 附近处出现 1 条斜裂缝,一、二层梁梁根部均出现多条竖向裂缝;正向加载位移至 16.0 mm(758 kN)时,一层墙体表面斜裂缝继续开展并贯穿墙体;负向加载位移至 16.0 mm(554 kN)时,一层墙体负向加载时产生的斜裂缝继续开展并贯穿墙体,正负向产生的斜裂缝交叉后呈明显的 X 状;一、二层框架梁左下、右上部位出现若干条竖向受拉裂缝;随后的循环加载过程中,伴随着裂缝不断张开、闭合,又有新裂缝不断产生.

正向加载位移至 56.0 mm(803 kN)时,一层墙体两侧边柱根部纵筋屈服裸露,箍筋鼓胀,混凝土压溃、剥落愈加明显.一层右侧边柱右侧面底部上裂缝开展,其中一条裂缝宽度达 2.5 mm,一、二层右侧梁右端根部竖向通缝宽度达 3.2 mm;负向加载位移至 56 mm 过程中,一层墙体两侧边柱根部混凝土压

碎、剥落更加明显,试件发出异常声响;位移 56.0 mm 第 3 次循环正向加载时水平推力下降较快,墙体上部竖向千斤顶力很难维持.此时正负向最大水平推力均已降至最大荷载值 85% 以下,同时出于安全考虑,加载结束.试验结束后试件典型部位的破坏见图 5.



(a) 一层墙体



(b) 一层连梁右端



(c) 二层连梁右端

图 5 试件 RCFW 破坏现象

Fig.5 Test phenomena of specimen RCFW

## 2.2 试件 PCFW1

试件 PCFW1 加载方法同试件 RCFW.正向加载位移至 3.0 mm (298 kN) 时,一层墙体右侧边柱右侧面距地梁顶面约 230 mm 处出现一条宽度约 0.1 mm 的横向裂缝;正向加载位移至 4.0 mm (377 kN) 时,二层右侧梁左端上部出现一条竖向裂缝;负向加载位移至 4.0 mm (161 kN) 时,一层墙体左侧边柱左侧面距地梁顶面 350 mm 处出现一条宽度约 0.1 mm 的水平缝,随后施加荷载过程中,此水平缝由墙体边缘向墙体中部缓慢开展.

正向加载位移至 8.0 mm (543 kN) 时,一层墙体上“/”状斜向裂缝密集开展.一层右侧梁右端形成竖向贯穿状裂缝,裂缝最大宽度 0.5 mm,二层梁上原有裂缝继续开展.负向加载位移至 16.0 mm (612 kN) 时,一层墙体自下而上出现多条“\”状斜向裂缝,一层右侧梁右端上表面出现多条斜向受拉裂

缝,二层右侧梁左下、右上部位出现多条竖向受拉裂缝;一、二层左侧梁左下、右上部位出现若干条竖向受拉裂缝.

正向加载位移至 56 mm (1 040 kN) 时,一层剪力墙左右侧边柱根部 200 mm 范围内,混凝土严重剥落.一层墙体暗梁右侧处出现一条斜向裂缝,墙体原正向开展裂缝均处于张开状态,最大裂缝宽度 2.0 mm.一层右侧梁右端塑性铰继续开展,一层中节点右侧梁端纵筋压屈,混凝土严重剥落,左侧梁梁根部裂缝宽度达 6 mm.负向加载位移至 56 mm (892 kN) 时,一、二层右侧梁右端靠近剪力墙部位破坏严重,有多条竖向贯穿裂缝形成,最大宽度 3~5 mm,梁端混凝土严重剥落,钢筋外露.试件框架部分最终破坏均呈明显的梁端弯曲破坏,框架一层中节点左右侧梁端混凝土成块剥落,框架一、二层柱坐浆层原裂缝几乎不开展,这说明灌浆套筒具有可靠的连接性能.

正向加载至位移 56 mm (第 3 次循环) 时,加载接近最大位移时水平推力下降较快,墙体上部竖向力下降较快,试件发出异常声响.此时正负向荷载均已降至最大荷载值 85% 以下,停止加载.此时实测一层梁截面形心处位移为 70.15 mm,二层梁截面形心处位移为 33.06 mm;一层对应层间位移角约为 1/44,二层对应层间位移角约为 1/43,均已远大于规范<sup>[14]</sup>规定的钢筋混凝土框-剪结构弹塑性层间位移角限值 1/100,说明采用现浇剪力墙预制框架的装配式框-剪结构有较好的位移延性.

整个试验过程中,未见新旧混凝土结合面上首先出现开裂,新旧混凝土未发生剥离破坏,梁上竖向裂缝的开展位置与现浇试件类似,这说明后浇混凝土与预制混凝土在结合面黏结良好,具有良好的协同工作性能.

观察二层边节点梁端的破坏,先是梁端出现若干竖向裂缝,随着加载位移的增大,裂缝开展部位由梁端向跨中延伸,裂缝长度不断发展,个别裂缝最终发展为竖向贯穿状裂缝,整个试验过程中,直至梁上部纵筋屈服,梁端塑性铰明显开展,未见纵筋发生明显的滑移.这说明采用现浇剪力墙预制框架装配式框-剪结构中,顶层边节点梁上钢筋弯锚可用钢筋焊端锚板代替.试件典型部位的破坏见图 6.

## 3 试验结果及分析

### 3.1 荷载-位移滞回曲线

试件 RCFW, PCFW1 的滞回曲线、骨架曲线分

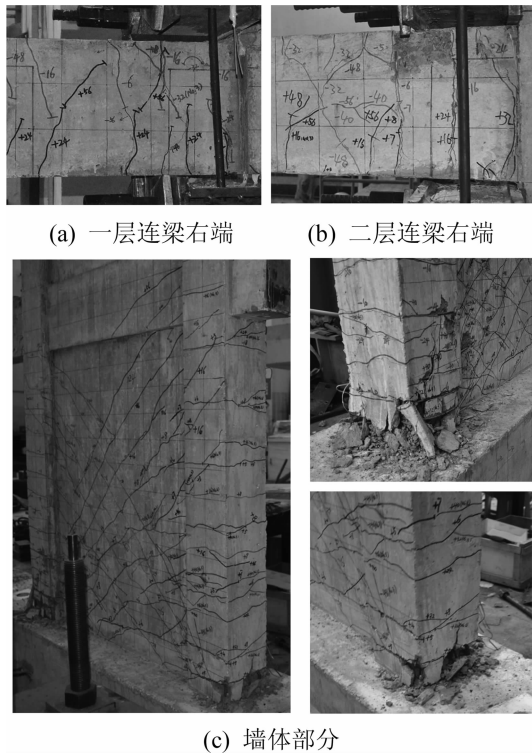
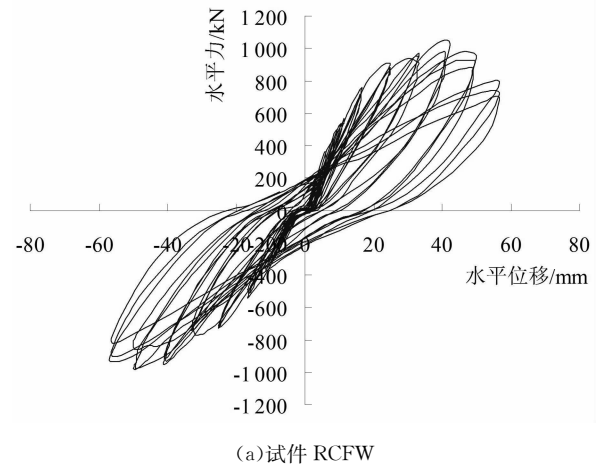


图6 试件PCFW1破坏现象

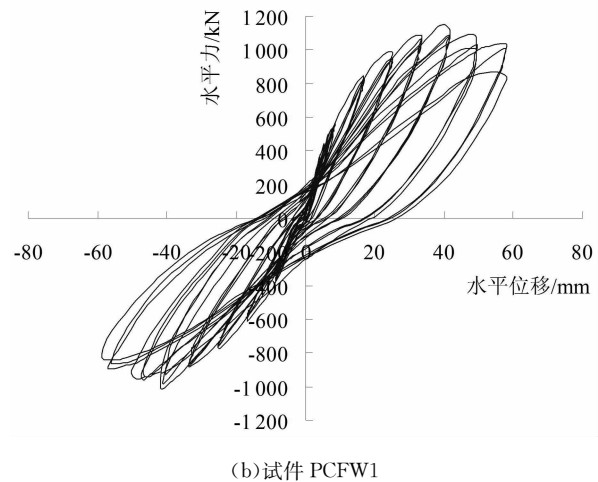
Fig.6 Test phenomena of specimen PCFW1

别如图7和图8所示.可见2个试件的滞回曲线均比较饱满,具有良好的耗能能力.试件RCFW正向最大荷载为1046.2 kN,对应加载点处位移为39.8 mm,负向最大荷载为983.3 kN,对应加载处位移为49.7 mm.试件PCFW1正向加载最大荷载为1148.0 kN,对应加载点位移为39.0 mm,负向最大荷载为1005.0 kN,对应加载点位移为40.6 mm.正向时试件PCFW1比RCFW最大承载力大9.7%,负向时大2.2%,且正向时两试件均在加载级40 mm第1个循环最大位移40 mm附近达到最大承载力,负向时均在加载级48 mm第1个循环最大位移48 mm附近达到最大承载力.

由图7(b)可见,试件PCFW1在加载级56 mm第1个循环之前,滞回环曲线呈典型的“弓形”,试件耗能较好.56 mm第2个循环时滞回环发展为“反S形”,滞回曲线“捏拢”较为严重,耗能大幅下降,这主要是加载后期剪力墙已进入弹塑性阶段末段,剪力墙部位的钢筋滑移量与剪切变形的影响增大而导致.56 mm第3个循环时钢筋的滑移量进一步加大,墙体上剪切裂缝影响也加大,试件滞回耗能有所下降,此循环正负向最大位移时的承载力比第2个循环正负向最大位移时有再明显下降.此时实测的一、二层最大层间位移角均大于1/45,已远大于



(a)试件RCFW



(b)试件PCFW1

图7 试件力-位移滞回曲线

Fig.7 Hysteretic response of test specimens

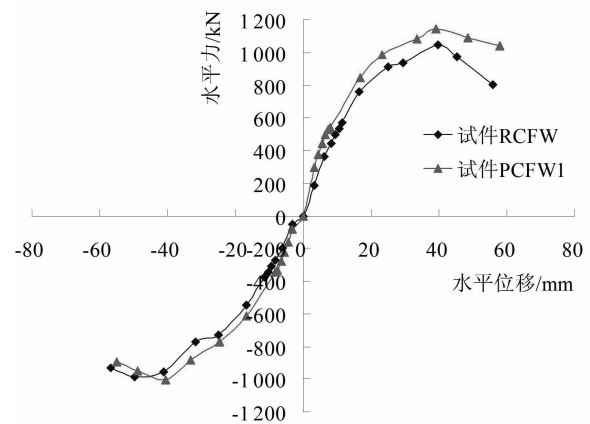


图8 试件力-位移骨架曲线

Fig.8 Force-displacement envelopes of the specimens

混凝土框-剪结构在罕遇地震作用下的层间位移角限值1/100<sup>[14]</sup>.在整个加载过程中承载力随刚度的退化逐渐降低,未出现急剧突降,这说明现浇剪力墙预制框架装配整体式框-剪结构的整体性较好,地震中有可靠的抗倒塌能力.

### 3.2 延性系数和变形能力

定义位移延性系数  $\mu = \Delta_u / \Delta_y$ , 其中  $\Delta_y$  为试件屈服时加载点位移,  $\Delta_u$  为试件极限点对应的加载点位移. 定义水平荷载下降至峰值荷载的 85% 为极限点. 表 3 列出了试件的屈服位移  $\Delta_y$ 、峰值位移  $\Delta_p$ 、极限位移  $\Delta_u$  及对应的特征荷载等. 可以看出, 装配式试件 PCFW1 与全现浇试件 RCFW 相比, 正向时的屈服荷载  $F_y$ 、峰值荷载  $F_p$ 、极限荷载  $F_u$  分别大 4.7%, 9.7% 和 4.7%; 负向时的屈服荷载、峰值荷载、极限荷载分别大 5.3%, 2.2% 和 5.3%; 正负向平均后的值分别大 5.0%, 2.2% 和 5.0%. 可见试件 PCFW1 的各特征荷载值均大于全现浇对比试件 RCFW 的相应值, 但其差值均小于 10.0%, 这说明设计施工良好的装配式框架-剪力墙结构的承载力与现浇结构相当, 甚至略高于现浇结构.

表 3 荷载特征值及位移延性系数

Tab.3 Ductility and characteristic value

编号	加载方向	屈服荷载 $F_y / \text{kN}$	屈服位移 $\Delta_y / \text{mm}$	峰值荷载 $F_p / \text{kN}$	峰值位移 $\Delta_p / \text{mm}$	极限荷载 $F_u / \text{kN}$	极限位移 $\Delta_u / \text{mm}$	延性系数 $\mu$
RCFW	正向	784.7	18.4	1 046.2	39.8	889.3	55.5	3.0
	负向	737.5	21.2	983.3	49.7	835.8	59.1	2.8
	平均	761.1	19.8	1 041.8	44.8	862.5	57.3	2.9
PCFW1	正向	821.3	21.1	1 148.0	39.0	930.8	55.8	2.6
	负向	776.3	23.8	1 005.0	40.6	879.8	56.0	2.4
	平均	798.8	22.5	1 065.0	39.8	905.3	55.9	2.5

由表 3 还可见, 试件 PCFW1 的延性系数  $\mu$  较试件 RCFW 的小, 正向时小 13.3%, 负向时小 14.3%, 正负向平均后小 13.8%. 综上可见, 装配式试件 PCFW1 的延性较现浇式试件 RCFW 略差. 分析原因, 是因装配式试件 PCFW1 的框架节点处的混凝土强度较试件 RCFW 相应处的高, 同时在其梁端部后浇区下部钢筋重叠搭接, 由于塑性铰区配筋增加, 导致塑性铰出现滞后发展不充分, 同时使得连梁、框架梁的刚度增大, 整体抗侧能力增强、延性降低. 相比现浇试件, 装配式试件梁端塑性铰开展的区域较小, 裂缝主要分布在塑性铰中心附近, 且裂缝开展宽度较小.

### 3.3 耗能能力

能量耗散系数  $E$  的大小可以用来衡量结构在地震中的耗能能力.  $E$  按照式(1)进行计算<sup>[13]</sup>, 如图 9 所示, 即用滞回曲线所包围的面积除以三角形  $OBE$  和  $ODG$  的面积之和.

$$E = S_{(ABC+CDA)} / S_{(OBE+ODG)} \quad (1)$$

取试验时每一加载级第 1 个循环滞回曲线所包

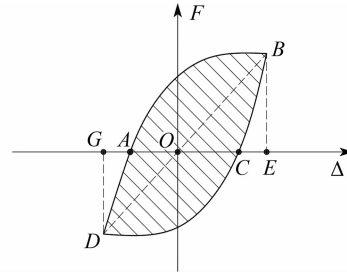


图 9 能量耗散系数  $E$  的确定

Fig.9 Defination of energy dissipation factor  $E$

围的面积, 计算得到的两个试件的耗能情况如图 10 所示. 可见, 初始阶段时试件 PCFW1 的耗能能力较试件 RCFW 差, 但在 8 mm 以后, 其耗能稳步增长. 随后在 32 mm 附近时试件 RCFW 耗能大于试件 PCFW1, 但之后又迅速减小, 整个过程中表现出了耗能波动的特点. 而装配式试件 PCFW1 在整个加载过程中, 随着加载位移的增大, 其耗能稳定增长, 并在试验结束阶段耗能达到最大, 且明显大于现浇试件 RCFW. 这说明装配式试件 PCFW1 在整个加载过程中, 试件耗能稳定增长, 无突变等, 具有较好的耗能特性.

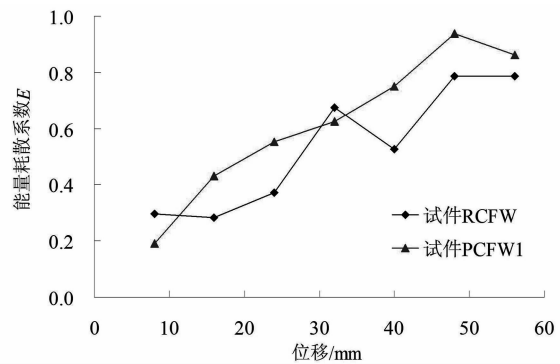


图 10 能量耗散曲线对比

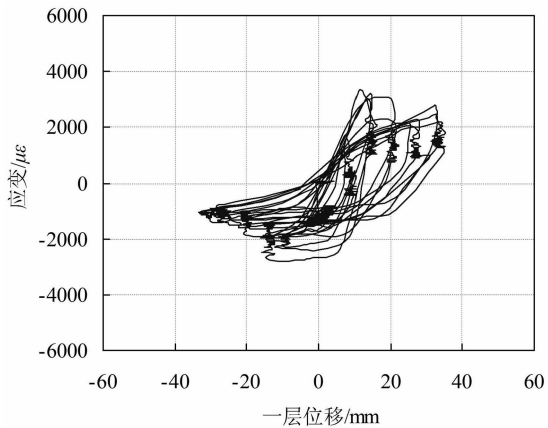
Fig.10 Equivalent viscous damping ratio curves of specimens

### 3.4 应变分析

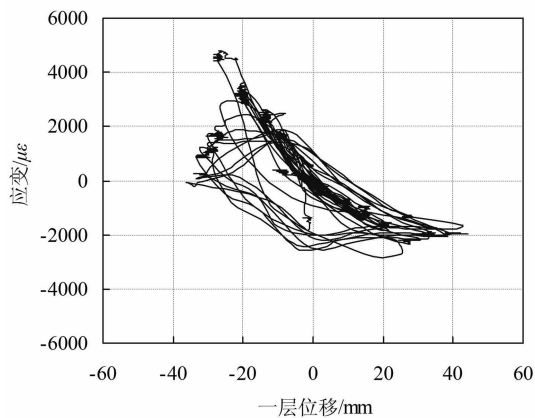
按前述应变测量方案(图 1(b)), 测得一层中柱、边柱的钢筋应变情况, 其中中柱纵筋应变如图 11 所示, 正向加载过程中, 中柱左侧纵筋处于受拉状态, 随着加载位移的增大, 应力迅速增加, 当一层位移达约 8.0 mm 时, 钢筋屈服. 负向加载过程中, 当一层位移达约 8.0 mm 时, 钢筋屈服; 中柱中部纵筋在正负向加载过程中, 钢筋始终处于受压状态, 当加载至末段时, 钢筋接近受压屈服; 中柱右侧纵筋的受力情况与左侧纵筋的受力大体相反, 正向加载过程中, 钢筋处于受压状态, 负向加载过程中, 钢



筋处于受拉状态,随着加载位移的增大,受压、受拉时,钢筋均发生屈服.综上所述,灌浆套筒能可靠传递柱纵向钢筋的应力,采用灌浆套筒连接的柱-柱接头是安全可靠的.



(a) 中柱钢筋 D1 应变图



(b) 中柱钢筋 D3 应变图

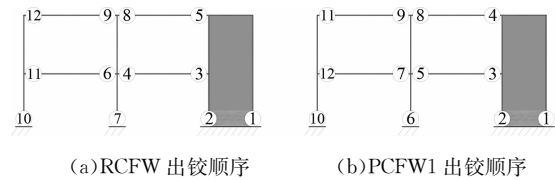
图 11 一层中柱柱底纵筋应变曲线

Fig.11 Strain curves of vertically distributed reinforcements at the bottom of the middle column on the first floor

### 3.5 塑性铰开展

试验前在梁、柱的纵筋,剪力墙边柱的纵筋上分别粘贴了电阻应变片,用以测量试验时试件各部位钢筋的应力水平.由表 1 实测钢筋力学性能可计算出钢筋的屈服应变值,比较实测的钢筋应变值可判断纵向钢筋是否屈服.定义试件各部位某一侧的纵向钢筋发生屈服时,即认为该部位已出现塑性铰.

按上述定义,实测的试件各部位的塑性铰出铰顺序如图 12 所示.由图可见,至试验结束,两个试件均在一层墙体底部两侧,一层框架柱底部,一二层框架梁梁端出现塑性铰,表现为典型的延性破坏机制.试件塑性铰均是首先出现在墙体底部,随后出现在一层右侧梁右端靠近墙体部位.



(a)RCFW 出铰顺序

(b)PCFW1 出铰顺序

图 12 试件塑性铰出铰顺序

Fig.12 Plastic hinge sequence of specimens

由图 12 还可见,二层右侧梁上塑性铰的出现要早于二层左侧梁,即表明试件右侧梁均较相应左侧梁先期进入塑性状态,试验中耗能的周期较左侧梁长,试验后发现一二层右侧梁的破坏也较左侧严重,如图 6(a),(b)所示.建议连梁与剪力墙连接处的下部纵筋采用灌浆套筒连接,使剪力墙上水平抗力能有效传递至框架,保证地震作用下剪力墙、框架的协同受力机制.

## 4 结论

本文通过低周反复荷载试验,研究了缩尺比例为 1/2,现浇剪力墙预制框架装配整体式框-剪结构的抗震性能,得到如下结论:

1) 装配式试件 PCFW1 与全现浇对比试件 RCFW 的滞回曲线均较为丰满,均具有稳定的滞回性能特性.两个试件的破坏过程、破坏机制和最终破坏形态基本相同,均表现为典型的延性破坏机制.装配式试件 PCFW1 的屈服荷载、峰值荷载、极限荷载均略大于试件 RCFW 的相应值,但其差值均小于 10.0%,延性系数正向时小 13.3%,负向时小 14.3%,正负向平均后小 13.8%.

2) 试件 PCFW1 的框架装配结合面坐浆层上较早出现裂缝,但裂缝不随加载位移的增大而线性开展,柱后续裂缝开展与现浇试件相似,说明灌浆套筒可以有效地传递纵向钢筋应力.

3) 将世构体系框架应用至现浇剪力墙装配整体式框-剪结构中,顶层边节点处梁上钢筋弯锚可用钢筋焊端锚板代替.

4) 装配式试件 PCFW1 连梁的破坏较严重.建议工程实践中对连梁与剪力墙连接处的下部纵筋采用灌浆套筒连接,使剪力墙上水平抗力能有效地传递至框架,保证地震作用下剪力墙、框架的协同受力机制.

## 参考文献

- [1] BUDDIKA H, WIJEYEWICKREMA A. Seismic performance



- evaluation of posttensioned hybrid precast wall-frame buildings and comparison with shear wall-frame buildings [J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 2016, 142(6): 1-14.
- [2] DIVANA M, MADHKHAN M. Determination of behavior coefficient of prefabricated concrete frame with prefabricated shear walls [J]. Procedia Engineering, 2011, 14(1): 3229-3236.
- [3] 肖全东, 郭正兴. 预制混凝土双板剪力墙的耗能能力[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(9): 35-41.  
XIAO Quandong, GUO Zhengxing. Energy dissipation of double-wall precast concrete shear wall [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(9): 35-41. (In Chinese)
- [4] 朱张峰, 郭正兴. 装配式短肢剪力墙低周反复荷载试验[J]. 工程力学, 2013, 30(5): 125-130.  
ZHU Zhangfeng, GUO Zhengxing. Low-cyclic reversed load test on new precast concrete short-leg shear wall [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(5): 125-130. (In Chinese)
- [5] 钱稼茹, 杨新科, 秦珩, 等. 竖向钢筋采用不同连接方法的预制钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 51-59.  
QIAN Jiaru, YANG Xinke, QIN Heng, et al. Tests on seismic behavior of precast shear walls with various methods of vertical reinforcement splicing [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(6): 51-59. (In Chinese)
- [6] 朱张峰, 郭正兴, 汤磊, 等. 考虑不同预拉力的新型混合装配式混凝土剪力墙抗震性能试验[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2015, 42(11): 41-48.  
ZHU Zhangfeng, GUO Zhengxing, TANG Lei, et al. Seismic performance experiments on new hybrid precast concrete shear wall under different prestress forces [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42(11): 41-48. (In Chinese)
- [7] 柳炳康, 宋满荣, 蒋亚琼. 预制预应力混凝土装配整体式框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(2): 24-32.  
LIU Bingkang, SONG Manrong, JIANG Yaqiong. Experimental study on seismic performance of post-tensioned precast prestressed concrete frame [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(2): 24-32. (In Chinese)
- [8] 黄远, 张锐, 朱正庚. 现浇柱预制梁混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(1): 44-50.  
HUANG Yuan, ZHANG Rui, ZHU Zhenggeng, et al. Experimental study on seismic performance of frame with precast beams and cast-in-place columns [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(1): 44-50. (In Chinese)
- [9] JGJ 1-2014 装配式混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 99-100.  
JGJ 1-2014 Technical specification for precast concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014: 99-100. (In Chinese)
- [10] JGJ 224-2010 预制预应力混凝土装配整体式框架结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 2.  
JGJ 224-2010 Technical specification for framed structures comprised of precast prestressed concrete components [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011: 2. (In Chinese)
- [11] 朱洪进. 预制预应力混凝土装配整体式框架结构(世构体系)节点试验研究[D]. 南京: 东南大学土木工程学院, 2006: 9-43.  
ZHU Hongjin. Seismic research by experiment for the joint of framed structures comprised of precast prestressed concrete components (SCOPE system) [D]. Nanjing: School of Civil Engineering, Southeast University, 2006: 9-43. (In Chinese)
- [12] 蔡建国, 朱洪进, 冯健, 等. 世构体系框架中节点抗震性能试验研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(5): 1894-1901.  
CAI Jianguo, ZHU Hongjin, FENG Jian, et al. Experimental study on seismic behavior of middle joints of SCOPE system [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(5): 1894-1901. (In Chinese)
- [13] JGJ 101-1996 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997: 13.  
JGJ 101-1996 Specification of testing methods for earthquake resistant building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997: 13. (In Chinese)
- [14] GB 50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 46-47.  
GB 50011-2010 Code for seismic design of building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 46-47. (In Chinese)