DOI:10.11918/202005002

竖向钢筋混合连接预制剪力墙抗震性能试验

李潇然[1],赵作周[1],钱稼茹[1],刘时伟[2],何 乐[2],韩兴运[2]

(1. 土木工程安全与耐久教育部重点实验室(清华大学),北京 100084;2. 内蒙古蒙西筑工科建有限公司,内蒙古 乌海 016000)

摘 要: 为研究竖向钢筋采用新型混合连接(预制剪力墙边缘构件竖向钢筋采用复合直螺纹套筒连接,竖向分布钢筋采用环筋扣合连接)、端面为通长抗剪槽的预制剪力墙的抗震性能,完成了 2 个预制剪力墙试件及 1 个对比现浇剪力墙试件的拟静力试验. 试件的剪跨比为 1.91,按强剪弱弯设计. 试验结果表明:预制墙试件的破坏形态与设计一致,为正截面受压破坏;试验结束时,套筒无可见裂纹,连接的钢筋未发生滑移;预制墙试件与现浇墙试件的抗震性能基本相同,预制墙的抗震性能满足现行规范要求;预制墙试件的正截面受压承载力不小于按现浇剪力墙计算的正截面受压承载力的 1.1 倍,可采用现行行业标准相关公式计算预制剪力墙的正截面受压承载力;位移角 1/100 时,预制墙试件与现浇墙试件的墙体变形基本相同,截面竖向变形基本符合平截面假定,水平结合面和竖向结合面均无明显错动,竖向结合面无明显张开,墙体预制与后浇部分有很好的整体性.

关键词: 预制剪力墙;复合直螺纹套筒连接;环筋扣合连接;抗剪槽;抗震性能;拟静力试验

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367 - 6234(2020)10 - 0001 - 09

Experimental studies on seismic performance of precast shear walls with hybrid vertical rebar connections

LI Xiaoran[1], ZHAO Zuozhou[1], QIAN Jiaru[1], LIU Shiwei[2], HE Le[2], HAN Xingyun[2]

(1. Key Lab of Civil Engineering Safety and Durability (Tsinghua University), Ministry of Education, Beijing 100084, China;
2. Inner Mongolia Mengxi Engineering Construction Co. Ltd., WuHai 016000, Inner Mongolia, China)

Abstract: To study the seismic performance of precast shear walls, in which the vertical rebar is connected by a new type of hybrid connection (the vertical steel bars in the edge members are connected by composite straight-thread sleeve and the vertical distributed steel bars are connected by anchoring closed loop reinforcement) and the surface of the precast shear wall is full-length shear resistant groove, quasi-static tests of two precast reinforced concrete shear walls and a cast-in-place reinforced concrete wall were carried out. The shear span ratio of the specimens was 1.91, which was designed according to strong shear weak bending. Results show that the failure mode of the precast shear wall was normal section compression failure, which was consistent with the design. There were no visible cracks in the sleeve and no slip of the connecting steel bar at the end of the test. The seismic performance of the precast wall specimens was basically the same as that of the cast-in-place wall specimen, which meets the requirements of the current code. The normal section compressive bearing capacity of the precast wall specimens was not less than 1.1 times the calculated value of that of the cast-in-place wall specimen, and thus the current specification formula can be used to calculate the normal section compressive bearing capacity of precast shear walls. When the inter-story drift ratio was 1/100, the deformation of the precast wall specimens was basically the same as that of the cast-in-place wall specimen, and the vertical deformation of the section basically agreed with the plane section assumption. There was no obvious slip of the horizontal surface and vertical surface and no obvious opening of the vertical surface, indicating good integrity between the precast and post-cast parts of the wall.

Keywords: precast shear wall; composite straight-thread sleeve; anchoring closed loop reinforcement; shear resistant groove; seismic performance; quasi-static test

预制剪力墙竖向钢筋连接是装配整体式剪力墙结构的关键技术之一. 目前,竖向钢筋连接方法主要包括套筒灌浆连接[1-3]、浆锚搭接连接[4-6]、搭接连接[7-9]、环筋扣合连接[10-11]、套筒挤压连接[12]和螺栓连接[13]等,这些连接方法已经在工程中得到应用. 本文研究的预制剪力墙竖向钢筋的连接方法,为新型混合连接. 新型混合连接是指:边缘构件竖向钢筋直径大,采用复合直螺纹套筒连接[14](图 1(a));竖向分布钢筋直径小,采用环筋扣合连接[10,15](图 1

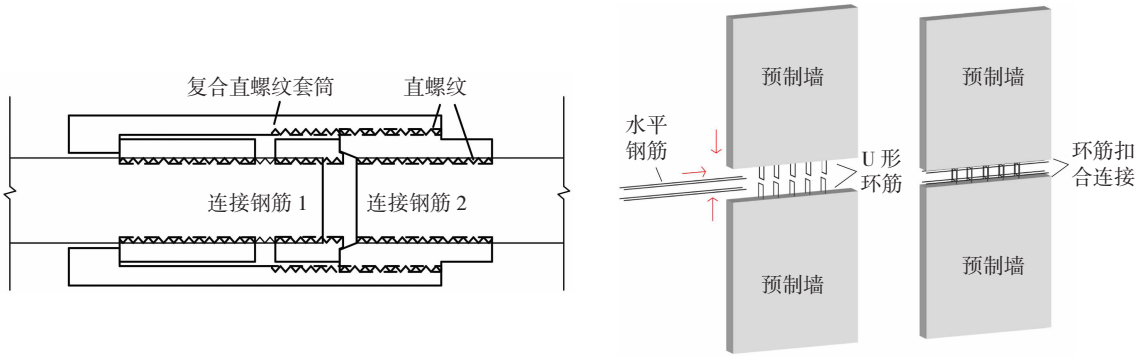
收稿日期: 2020 - 05 - 02

作者简介: 李潇然(1995—),男,硕士研究生;
赵作周(1967—),男,副教授,博士生导师;
钱稼茹(1946—),男,教授,博士生导师

通信作者: 钱稼茹,qianjr@tsinghua.edu.cn

(b)). 与目前工程中用得比较多的钢筋套筒灌浆连接相比,混合连接对边缘构件竖向钢筋位置的精度要求高,对竖向分布钢筋位置的精度要求相对比较低;套筒灌浆连接对边缘构件竖向钢筋位置和竖向分布钢筋位置的精度要求都比较高;包括施工安装的综合成本,相同直径钢筋的复合直螺纹套筒连接低于套筒灌浆连接;环筋扣合连接的成本远低于套筒灌浆连接的成本. 混合连接有一定的优势. 目前已用于内蒙古乌海的装配式住宅建筑.

当前,预制剪力墙的顶面、底面与左右端面一般为水洗面即露骨料粗糙面,以加强预制墙与后浇混凝土的整体性. 水洗冲刷混凝土表面不但耗费水资源,而且污染环境. 本文采用通长抗剪槽代替粗糙面,抗剪槽剖面见图2.



(a) 复合直螺纹套筒连接示意　　(b) 环筋扣合示意

图1　预制剪力墙竖向钢筋混合连接方法示意

Fig. 1　Schematic diagram of hybrid connecting method of vertical reinforcements for precast shear walls

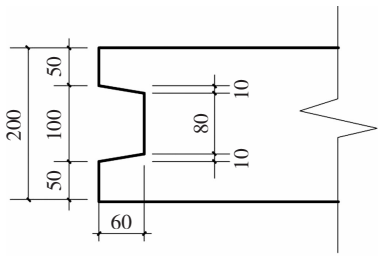


图2　抗剪槽剖面图(mm)

Fig. 2　Section of shear resistant groove (mm)

对于竖向钢筋采用新型混合连接、端面设置通长抗剪槽的预制剪力墙的抗震性能,目前尚未见相关试验研究报道. 据于此,本文作者进行了2个预制剪力墙试件以及1个对比现浇剪力墙试件的拟静力试验,研究其抗震性能,为工程应用提供依据.

1　试验概况

1.1　试件设计

3个剪力墙试件的编号分别为SW1、SW2、SW3,试件由加载顶梁、墙体和地梁组成,墙体尺寸均为1.6 m×2.9 m×0.2 m(长×高×厚). SW1为现浇墙试件. SW2和SW3为预制墙试件,墙体底部与地梁之间设置高180 mm的后浇水平接缝,竖向钢筋在水平接缝内连接,SW3还设置宽250 mm的后浇竖向接缝,连接2片预制墙,竖向接缝偏墙体一端. 图3为试件立面示意图.

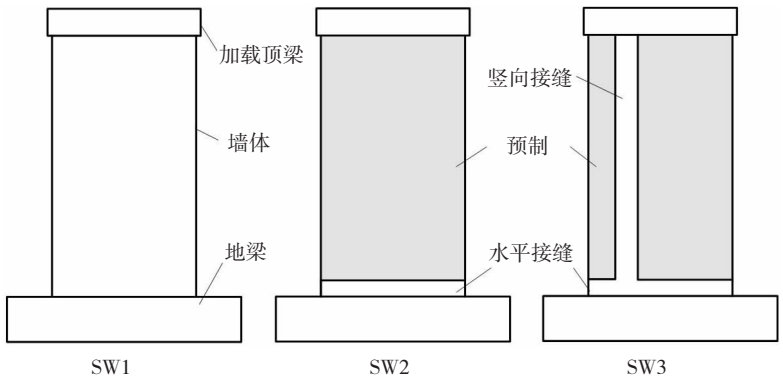


图3　试件立面示意

Fig. 3　Elevation diagrams of specimens

试件按强剪弱弯设计,预期为正截面受压破坏. 表1列出了试件墙体配筋,图4为墙体配筋图. 试件SW2和SW1竖向配筋和水平配筋分别相同,设置构造边缘构件;试件SW3由2片预制墙与宽250 mm的后浇竖向接缝组成,竖向接缝内附加箍筋Φ12@200,搭接连接预制墙的水平分布钢筋,设置约束边缘构件,端部200 mm范围内附加Φ12@200箍筋.

表 1　试件配筋

Tab. 1　Reinforcing of specimens

试件编号	边缘构件			分布钢筋	
	长度/mm	竖向钢筋	箍筋	竖向	水平
SW1	200	4 Φ 16	Φ 10@200	10 Φ 10	Φ 10@200
SW2	200	4 Φ 16	Φ 10@200	10 Φ 10	Φ 10@200
SW3	415	6 Φ 16	Φ 12@100(端部)、Φ 12@200	8 Φ 10	Φ 12@200

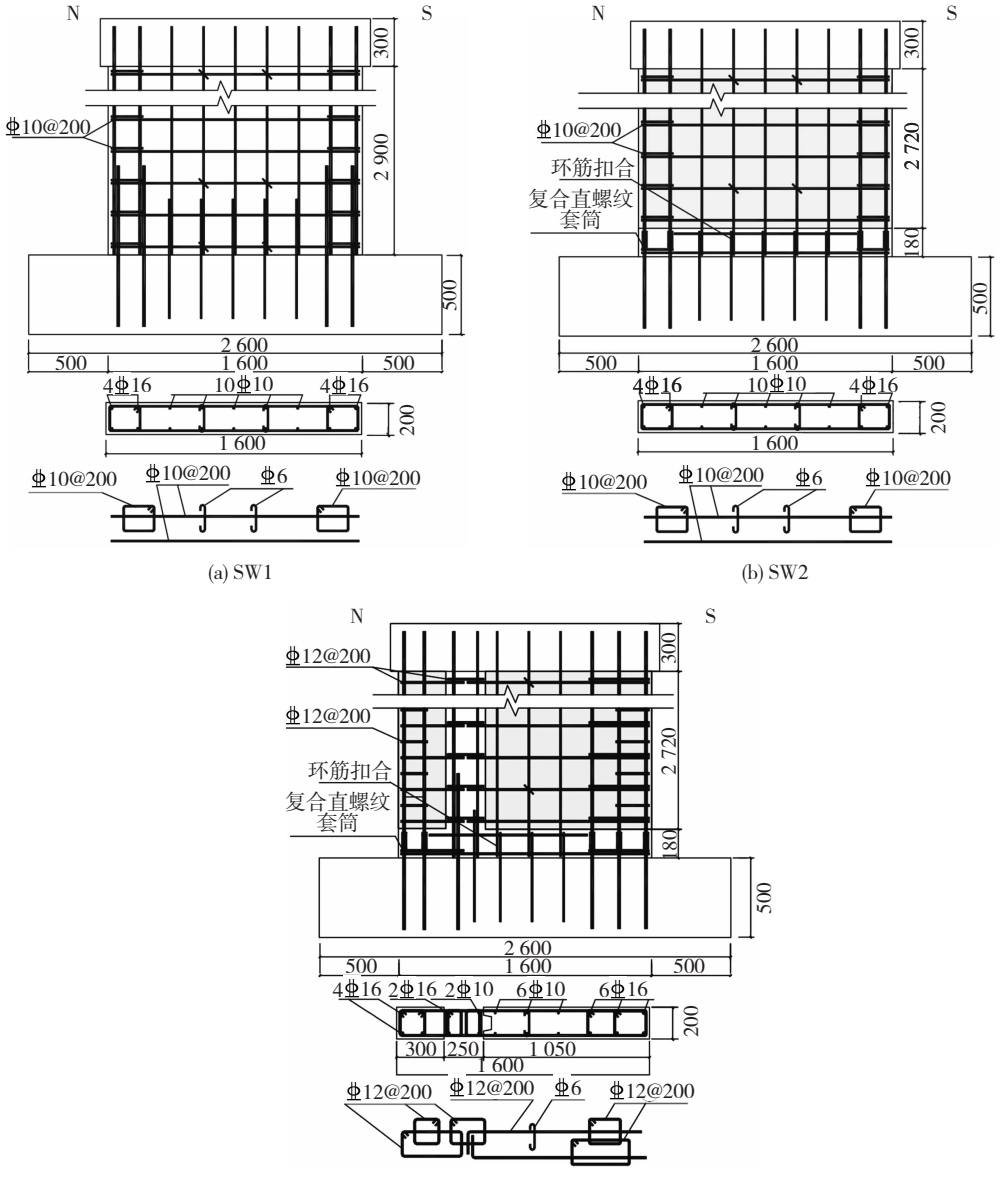


图 4　试件配筋图(mm)

Fig. 4　Reinforcement layout of specimens (mm)

1.2　材料强度

试件墙体与顶梁混凝土设计强度等级为 C30,地梁混凝土设计强度等级为 C50.

现浇墙试件 SW1 墙体混凝土一次浇注,预制墙试件 SW2 及 SW3 先浇注预制部分混凝土,达到一定强度后浇注水平接缝及竖向接缝混凝土. 表 2 列出了墙体实测混凝土立方体抗压强度 $f_{cu,m}$,为 3 个 150 mm 立方体试块抗压强度平均值. 表 2 中的"平均"为基于预制与后浇混凝土体积比例加权计算得到的墙体混凝土立方体抗压强度平均值.

表 2　墙体混凝土强度及施加的竖向力

Tab. 2　Concrete strength and applied vertical force for wall panels

试件编号	$f_{cu,m}$/MPa			N/kN	n
	预制	后浇	平均		
SW1	31.2		31.2	1 372.8	0.3
SW2	32.5	38.4	32.8	1 372.8	0.3
SW3	31.6	38.4	32.9	2 288.0	0.5

试件采用 HRB400 钢筋. 实测钢筋屈服强度 $f_{y.m}$ 及极限强度 $f_{u.m}$ 见表 3,为 3 根钢筋材性实测值的平均值.

表 3　钢筋强度实测值

Tab. 3　Measured strength of reinforcements

钢筋直径/mm	$f_{y.m}$/MPa	$f_{u.m}$/MPa
10	485	714
12	455	587
16	500	680

1.3　量测内容及测点布置

试验量测内容包括:轴压力,水平力,墙体水平位移,结合面的错动与裂缝宽度,地梁的水平滑移与抬起(水平滑移与抬起实测值很小,已在试件位移中处理),复合直螺纹套筒上下钢筋应变,环筋扣合连接上下端钢筋应变,沿 45°方向水平钢筋应变,以及墙体位移场. 轴压力和水平力采用力传感器量测,水平位移、错动与裂缝宽度采用位移计量测,钢筋应变采用应变片量测,墙体位移场采用摄影量测. 试验中记录试件损坏情况.

图 5 为试件 SW3 测点布置图,其他试件测点布置类似. 图 5(a)中,D1 ~ D5 量测墙体水平位移,DL1 ~ DL6 和 DR1 ~ DR6 量测竖向和水平结合面的错动与裂缝宽度,DD1 ~ DD3 量测地梁水平滑移与抬起.

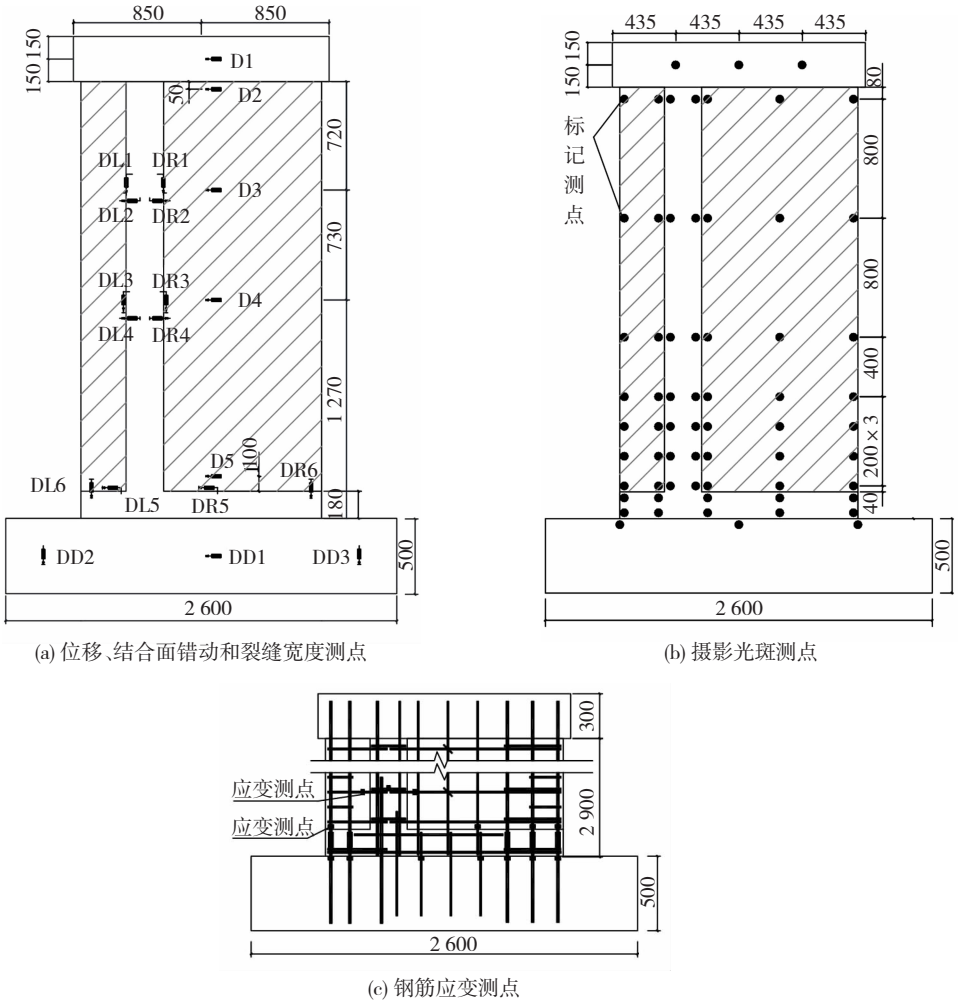


图 5　试件 SW3 测点布置(mm)

Fig. 5　Arrangement of measuring points of specimen SW3 (mm)

1.4　加载装置及加载制度

图 6 为试验加载装置示意. 试件地梁固定在实验室刚性台座上. 采用 1 个 2 500 kN 的竖向千斤顶施加竖向力,竖向千斤顶与反力架之间设置减摩滑板,竖向千斤顶随试件顶部水平往复移动,且垂直于刚性台座. 采用 1 个 1 500 kN 的水平千斤顶沿加载梁中心线施加往复水平力,水平力加载点距墙底截面为 3 050 mm,试件剪跨比 3 050/1 600 = 1.91.

试验方法为在恒定竖向力作用下施加往复水平力(水平位移)的拟静力试验. 首先施加竖向力到设定值,然后施加往复水平力,由图 5 所示位移计 D1 的实测试件顶点水平位移控制水平加载. 位移角 θ(位移计 D1 实测试件顶点水平位移与测点高度 3 050 mm的比值)为 1/2 000、1/1 000、1/660 和 1/500时,各往复加载 1 次;位移角 θ 为 1/300、1/200、1/150、1/100、1/75 和 1/60 时,各往复加载 3

次. 同一往复加载时,先施加水平推力,为正向加载,以(+)表示,后施加水平拉力,为反向加载,以(-)表示. 施加的竖向力 $N = nAf_c$,n 为试件轴压比设计值,A 为墙体截面面积,f_c 为 C30 的轴心抗压强度设计值 14.3 N/mm^2,N、n 列于表 2.

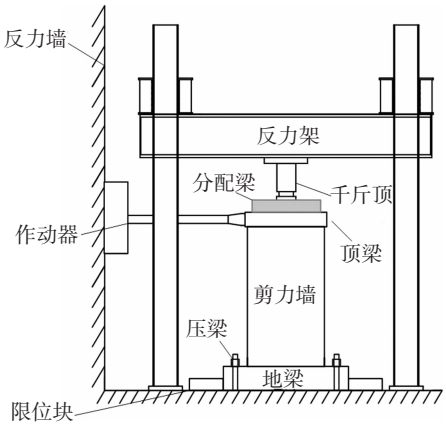


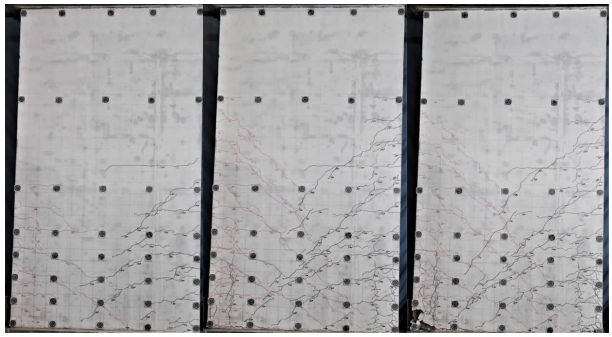
图 6　试验加载装置示意

Fig. 6　Test setup

2　破坏过程及破坏形态

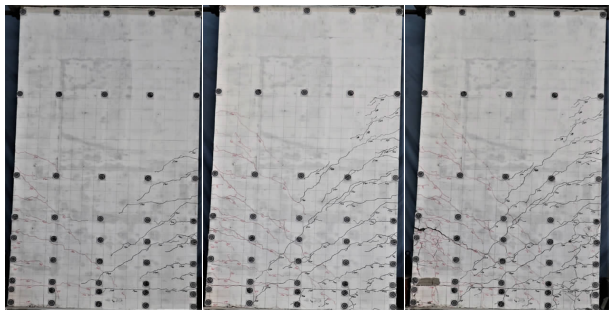
预制墙试件 SW2 破坏过程如下. $\theta = 1/1\,000$ 级时,墙体两端底部出现细微水平裂缝;$\theta = 1/500$ 级时,墙体 180 ~ 1 000 mm 高度范围内出现多道水平裂缝,靠近底部的水平裂缝发展为斜裂缝,预制墙与水平接缝的结合面开裂,结合面端的裂缝最大宽度为 0.2 mm,斜裂缝最大宽度为 0.15 mm;$\theta = 1/300$ 级时,底部最外边缘受拉竖向钢筋屈服,两端均有多道水平裂缝发展为斜裂缝,墙体底部多道斜裂缝交叉,水平裂缝最大宽度为 0.25 mm;$\theta = 1/200$ 级时,墙体中部出现多道斜裂缝,原有裂缝延伸,结合面端的裂缝最大宽度为 0.4 mm;$\theta = 1/150$ 级时,水平裂缝和斜裂缝增加,多道斜裂缝交叉,水平结合面错动,斜裂缝最大宽度 0.5 mm,结合面裂缝最大宽度 2 mm;$\theta = 1/100$ 级时,水平力达到峰值,随后下降,墙体端部混凝土掉渣,水平结合面裂缝最大宽度约 3 mm(墙体没有安装位移计的正面的裂缝宽度,采用裂缝卡测量),斜裂缝最大宽度 0.45 mm;$\theta = 1/75$ 级时,墙体两端受压区混凝土压碎,混凝土脱落,底部竖向钢筋外露;$\theta = 1/60$ 级时,水平力下降较快,墙体底部破坏严重,试验结束. 检查套筒,没有可见裂纹,连接钢筋未发生滑移.

现浇墙试件 SW1、预制墙试件 SW3 的破坏过程与 SW2 大体相同. 3 个试件的破坏形态相同,都是正截面受压破坏. 图 7 为位移角 1/300、1/100 及 1/75时墙体裂缝分布图.



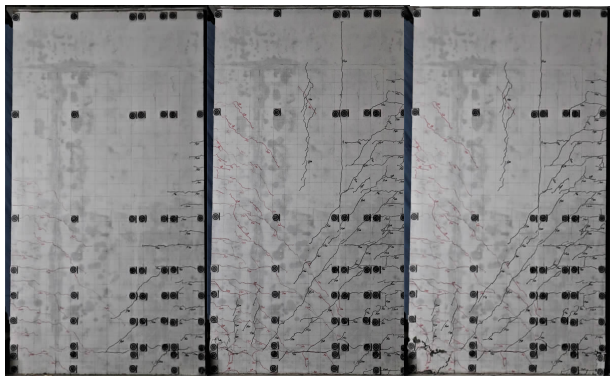
θ =1/300　　θ =1/100　　θ =1/75

(a) SW1



θ =1/300　　θ =1/100　　θ =1/75

(b) SW2



θ =1/300　　θ =1/100　　θ =1/75

(c) SW3

图 7　墙体裂缝分布

Fig. 7　Crack patterns of specimens

3　试验结果及分析

3.1　滞回曲线和骨架曲线

试件水平力 F - 顶点位移 Δ(位移角 θ)滞回曲线、水平力 - 顶点位移(位移角)骨架曲线分别见图 8、9.

结果表明:当 $\theta = 1/300$ 级之前,试件的水平力 - 位移(位移角)骨架曲线趋近于直线,滞回曲线包围面积较小;随顶点位移增大,墙体进入弹塑性阶段,卸载后有较大残余变形;峰值点后,骨架曲线下降比较平缓,滞回曲线都有一定程度的捏拢,重复加载时,承载力有明显的退化;在 $\theta = 1/75$ 级之前,预制墙试件 SW2 与现浇墙试件 SW1 的滞回曲线形状接近、骨架曲线基本重合.

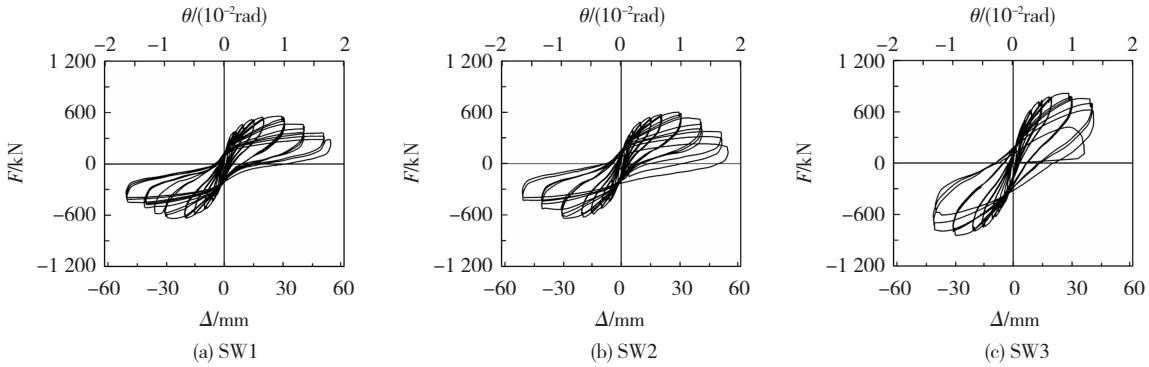


图 8　试件水平力 F – 顶点位移 Δ(位移角 θ) 滞回曲线

Fig. 8　Lateral force (F) – top displacement (Δ) (rotation angle (θ)) hysteresis loops of specimens

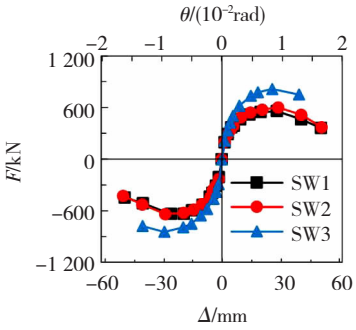


图 9　试件水平力 F – 顶点位移 Δ(位移角 θ) 骨架曲线

Fig. 9　Lateral force (F) – top displacement (Δ) (rotation angle (θ)) skeleton curves of specimens

3.2　承载能力

采用现行行业标准[16] 现浇剪力墙的有关公式及实测混凝土和钢筋强度,计算剪力墙试件在竖向力作用下的偏心受压承载力对应的弯矩 M_F 和受剪承载力 F_S,将 M_F 换算为作用在墙顶的水平力 F_F,$F_F = M_F/H$,H 为水平千斤顶中心线高度,H = 3 050 mm,F_F、F_S 列于表 4. 名义屈服水平力试验值 F_y、峰值水平力试验值 F_p 以及 F_p 与 F_F 的比值也列于表 4. 名义屈服点采用能量法[17] 由试件水平力 – 顶点位移骨架曲线确定,对应的水平力即为名义屈服水平力试验值.

结果表明:试件的 F_S 大于 F_F,表明试件设计满足强剪弱弯;现浇墙试件 SW1 的 F_p 与 F_F 的比值为 1. 13,相同尺寸、相同配筋预制墙试件 SW2 的 F_p 与 F_F 的比值为 1. 17,竖向接缝偏于一端的预制墙试件 SW3 的 F_p 与 F_F 的比值为 1. 20,预制墙可按现行行业标准现浇剪力墙相关公式计算其正截面受压承载力.

3.3　变形能力

试件名义屈服、峰值、极限时的顶点水平位移 Δ 和位移角 θ,以及顶点水平位移延性系数 μ_Δ 列于表 4. 定义水平力下降至峰值水平力 85% 的点为极限点,对应的水平位移即为极限水平位移 Δ_u;位移延性系数 $\mu_\Delta = \Delta_u/\Delta_y$.

结果表明:3 个试件的名义屈服位移角及峰值位移角分别接近,分别小于 1/300 及小于 1/100;2 个预制墙试件的极限位移角大于 1/80,变形能力满足现浇剪力墙结构弹塑性层间位移角 1/120 的要求.

表 4　试件不同状态时水平力、变形试验值以及承载力计算值

Tab. 4　Measured lateral force and deformation and calculated strength of specimens at various states

试件编号	加载方向	名义屈服点			峰值点			极限点		μ_Δ	承载力计算值		F_p/F_F
		F_y/kN	Δ_y/mm	θ_y	F_p/kN	Δ_p/mm	θ_p	Δ_u/mm	θ_u		F_F/kN	F_S/kN	
SW1	+	427.2	8.52	1/397	557.2	27.98	1/109	38.60	1/79	5.05	526.4	711.0	1.06
	–	491.4	9.44	1/378	637.5	25.85	1/118	36.75	1/83	4.55			1.21
	平均	459.3	8.93	1/387	597.3	26.92	1/114	37.68	1/81	4.79			1.13
SW2	+	457.6	7.16	1/359	600.8	28.50	1/107	40.66	1/75	4.81	531.1	715.8	1.13
	–	483.4	7.55	1/401	639.4	28.77	1/106	38.60	1/83	4.82			1.20
	平均	470.5	7.36	1/379	620.1	28.63	1/107	39.63	1/79	4.82			1.17
SW3	+	612.3	8.45	1/359	815.4	25.42	1/120	39.10	1/78	4.60	693.8	821.7	1.18
	–	626.9	8.52	1/323	844.1	29.32	1/104	40.13	1/76	4.24			1.22
	平均	619.6	8.49	1/340	829.8	27.37	1/112	39.62	1/77	4.41			1.20

3.4　墙体变形

图 10 为基于摄影测量的试件 SW1 及 SW2 位移角 θ = 1/100 时的墙体变形图(变形放大 10 倍).

结果表明:试件 SW2 与 SW1 墙体变形接近,预

制墙与现浇墙变形特征类似;峰值前(峰值位移角小于 1/100),截面竖向变形基本满足平截面假定;墙体底部为弯曲变形,上部近似刚体转动,变形主要在底部.

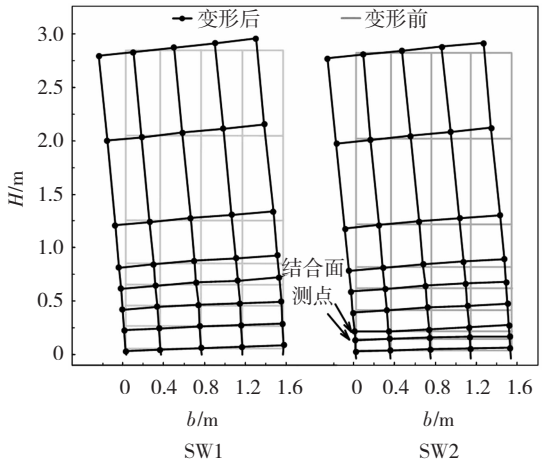


图 10　位移角 1/100 时墙体变形图

Fig. 10　Deformation of wall panels at rotation angle 1/100

3.5　刚度退化

采用平均割线刚度 K 作为试件不同水平位移角时的刚度,$K = |F|/|\Delta|$,F 与 Δ 分别为每一级目标值的水平力与顶点位移. 图 11 为试件位移角 θ – 刚度 K 曲线. 以 θ = 1/2 000 的刚度为弹性刚度 K_0,定义刚度退化系数 $\gamma = K/K_0$,位移角 1/300、1/100、1/75 时的退化系数 γ 见表 5.

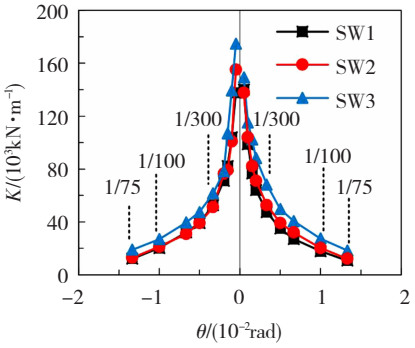


图 11　试件位移角(θ) – 刚度(K)曲线

Fig. 11　Rotation angle (θ) – stiffness (K) curves of specimens

表 5　试件弹性刚度 K_0 及刚度退化系数 γ

Tab. 5　Elastic stiffness (K_0) and stiffness degradation coefficient (γ) of specimens

试件编号	K_0/(10³kN·m⁻¹)	γ/%		
		1/300	1/100	1/75
SW1	138.9	36.0	13.7	8.2
SW2	148.3	33.5	13.7	8.5
SW3	162.0	40.1	16.8	11.5

结果表明:试件 SW2 与试件 SW1 的位移角 – 刚度曲线及刚度退化系数接近,轴压比大的预制墙试件 SW3 的弹性刚度及刚度退化系数大于轴压比小的预制墙试件 SW2,相同位移角时,试件 SW3 的刚度大于试件 SW2.

3.6　耗能能力

采用累积滞回耗能 E 度量试件的耗能能力. 试件某一位移角的累积耗能为该位移角及小于该位移角的 $F-\Delta$ 滞回曲线所包围的面积之和. 图 12 为试件的位移角 θ – 累积滞回耗能 E 曲线.

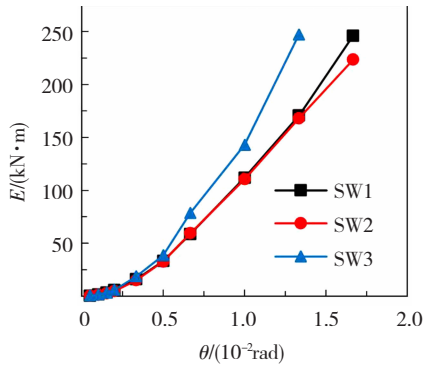


图 12　试件位移角(θ) – 累积滞回耗能(E)曲线

Fig. 12　Rotation angle (θ) – accumulative hysteresis energy dissipation (E) curves of specimens

结果表明:试件 SW2 与 SW1 的累积耗能能力接近,轴压比大的试件 SW3 的耗能能力大于轴压比小的试件 SW1 和 SW2.

3.7　结合面性能

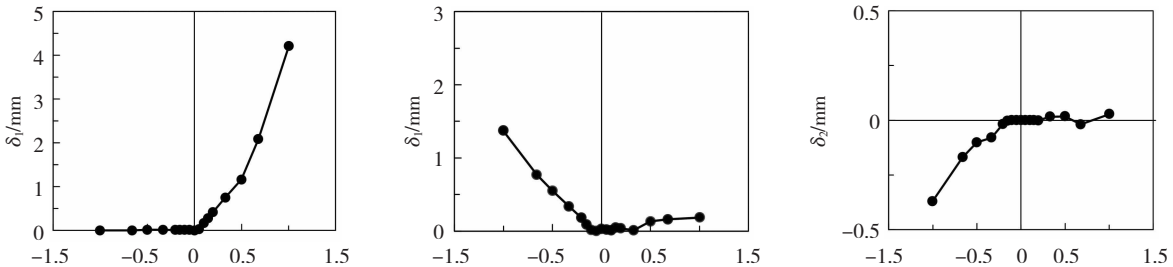
峰值前,试件预制墙与水平接缝的水平结合面、预制墙与竖向接缝的竖向结合面均出现开裂、错动. 图 13、14 分别为试件 SW2 和 SW3 位移角不大于 1/100时顶点位移角 θ – 结合面裂缝宽度 δ_1、错动 δ_2 关系曲线.

结果表明:位移角 1/100 时,试件 SW2 水平结合面最大裂缝宽度为 4.21 mm(墙体安装位移计的背面的裂缝宽度,采用位移计测量),最大错动为 0.37 mm;试件 SW3 水平结合面最大裂缝宽度为 2.78 mm、最大错动为 0.11 mm,竖向结合面最大裂缝宽度为 0.34 mm、最大错动为 0.45 mm. 预制墙试件水平结合面错动、竖向结合面裂缝宽度及错动均很小,试件墙体在峰值前有很好的整体性.

3.8　钢筋应变

图 15 为试件 SW2 同一套筒、环筋扣合连接的上下钢筋水平力 – 应变滞回曲线与骨架曲线.

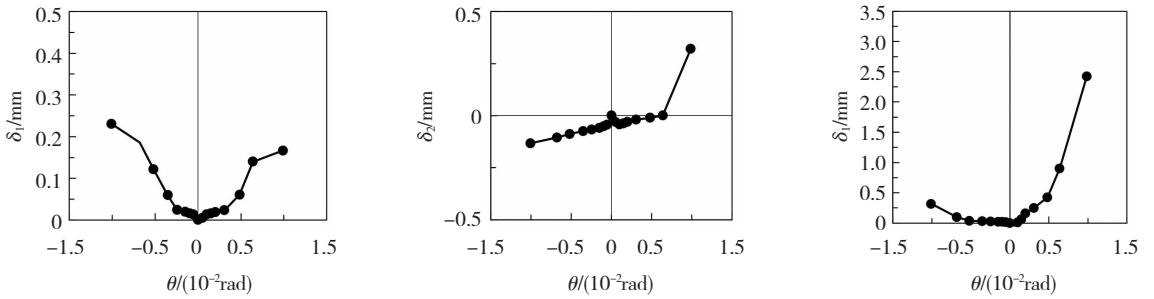
结果表明:钢筋屈服前,套筒连接的上下钢筋应变、环筋扣合连接的上下环筋应变变化趋势分别一致,同一加载级的上下钢筋应变大小接近;钢筋屈服后,钢筋应变迅速增大,上下钢筋应变有一定差别;总体上,复合直螺纹套筒连接及环筋扣合连接能有效地传递钢筋应力.



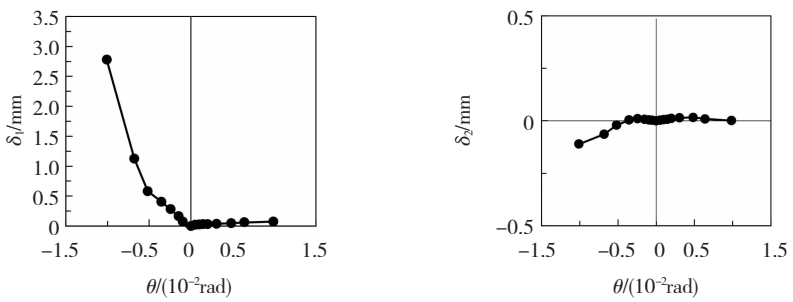
(a) 水平结合面北端裂缝宽度　(b) 水平结合面南端裂缝宽度　(c) 水平结合面错动

图 13　试件 SW2 位移角（θ）－水平结合面裂缝宽度（δ_1）、错动（δ_2）曲线

Fig. 13　Curves of rotation angle（θ）－crack width（δ_1）and slide（δ_2）of horizontal connecting surface for specimen SW2



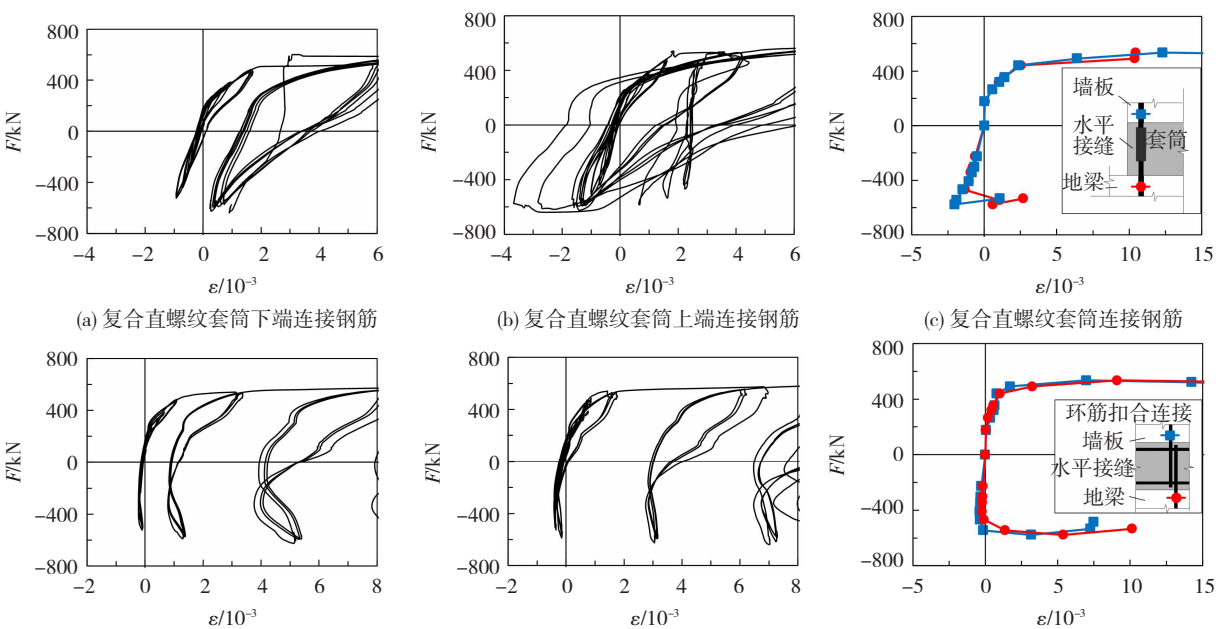
(a) 南侧竖向结合面中部裂缝宽度　(b) 南侧竖向结合面中部错动　(c) 水平结合面北端裂缝宽度



(d) 水平结合面南端裂缝宽度　(e) 水平结合面错动

图 14　试件 SW3 位移角（θ）－结合面裂缝宽度（δ_1）、错动（δ_2）曲线

Fig. 14　Curves of rotation angle（θ）－crack width（δ_1）and slide（δ_2）of connecting surface for specimen SW3



(a) 复合直螺纹套筒下端连接钢筋　(b) 复合直螺纹套筒上端连接钢筋　(c) 复合直螺纹套筒连接钢筋

(d) 环筋扣合连接下环筋　(e) 环筋扣合连接上环筋　(f) 环筋扣合连接钢筋

图 15　试件 SW2 水平力（F）－竖向钢筋应变（ε）曲线

Fig. 15　Lateral force（F）－vertical reinforcement strain（ε）of specimen SW2

4　结　论

1)边缘构件竖向钢筋复合直螺纹套筒连接、竖向分布钢筋环筋扣合连接、预制墙端面为抗剪槽的预制剪力墙试件的破坏形态与设计预期一致,为正截面受压破坏,试验结束时,复合直螺纹套筒无可见裂纹,套筒连接的钢筋未发生滑移.

2)预制墙试件与现浇墙试件的顶点水平力 - 水平位移滞回曲线形状基本相同、骨架曲线基本重合,两者位移角 - 刚度曲线、位移角 - 累积滞回耗能曲线也分别基本重合,两者抗震性能基本相同,预制剪力墙的抗震性能满足现行规范要求.

3)位移角不大于 1/100 时,预制墙试件与现浇墙试件墙体变形基本一致,截面竖向变形基本符合平截面假定,预制墙试件的水平结合面错动、竖向结合面裂缝宽度及错动均小于 0.5 mm,预制墙墙体在峰值前有很好的整体性.

4)预制墙试件的正截面受压承载力不小于现行行业规程计算值的 1.1 倍,可按现行行业标准现浇剪力墙的相关公式计算预制墙的正截面受压承载力.

5)复合直螺纹套筒连接、环筋扣合连接能分别有效传递预制剪力墙边缘构件竖向钢筋和竖向分布钢筋的拉、压力.

参考文献

[1] 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
QIAN Jiaru, YANG Xinke, QIN Heng, et al. Test on seismic behavior of pre-cast shear walls with various methods of vertical reinforcement splicing[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(6): 51

[2] 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

[3] 张微敬,钱稼茹,陈康,等. 竖向分布钢筋单排连接的预制剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构,2011,41(2):12
ZHANG Weijing, QIAN Jiaru, CHEN Kang, et al. Test on seismic behavior of precast shear walls with vertical distributed reinforcements spliced on a single row connecting rebars[J]. Building Structure, 2011,41(2):12

[4] 陈再现,姜洪斌,张家齐,等. 预制钢筋混凝土剪力墙结构拟动力子结构试验研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(6):41
CHEN Zaixian, JIANG Hongbin, ZHANG Jiaqi, et al. Pseudo-dynamic substructure test on precast reinforced concrete shear wall structure[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(6): 41

[5] 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

[6] 吴东岳,梁书亭,郭正兴,等. 改进型钢筋浆锚装配式剪力墙压弯承载力计算[J]. 哈尔滨工业大学学报,2015,47(12):112
WU Dongyue, LIANG Shuting, GUO Zhengxing, et al. Bending bearing capacity calculation of the improved steel grouted connecting precast wall[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(12): 112

[7] 沈小璞,马巍,陈信堂,等. 叠合混凝土墙板竖向拼缝连接抗震性能试验研究[J]. 合肥工业大学学报,2010, 33(9): 1366
SHEN Xiaopu, MA Wei, CHEN Xintang, et al. Experimental study of the seismic performance of the vertical joint seam of superimposed concrete wall panels[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2010, 33(9):1366

[8] 初明进,刘继良,崔会趁,等. 装配整体式双向孔空心模板剪力墙受剪性能试验研究[J]. 工程力学,2013, 30(7): 219
CHU Mingjin, LIU Jiliang, CUI Huizhen, et al. Experimental study on shear behaviors of assembled monolithic concrete shear walls built with precast two-way hollow slabs [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(7): 219

[9] 张微敬,杨雷刚,钱稼茹,等. 大剪跨比预制空心板剪力墙抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报,2019,52(2):1
ZHANG Weijing, YANG Leigang, QIAN Jiaru, et al. Experimental study on seismic performance of precast concrete hollow shear walls with large aspect ratio[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(2):1

[10] 焦安亮,张鹏,李永辉,等. 环筋扣合锚接连接预制剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2015,36(5):103
JIAO Anliang, ZHANG Peng, LI Yonghui, et al. Tests on seismic behavior of pre-cast shear walls with annular closed reinforcements [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(5): 103

[11] 王墩,吕西林,卢文胜. 带接缝连接梁的预制混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2013,34(10):1
WANG Dun, LÜ Xilin, LU Wensheng. Experimental study on seismic performance of precast concrete shear walls with joint connecting beam [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(10): 1

[12] 李宁波,钱稼茹,叶列平,等. 竖向钢筋套筒挤压连接的预制钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2016, 37(1): 31
LI Ningbo, QIAN Jiaru, YE Lieping, et al. Tests on seismic behavior of precast RC shear walls with vertical rebar splicing by pressed sleeve[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(1): 31

[13] 薛伟辰,褚明晓,刘亚男,等. 高轴压比下新型预制混凝土剪力墙抗震性能[J]. 哈尔滨工程大学学报,2018,39(3):452
XUE Weichen, CHU Mingxiao, LIU Yanan, et al. Seismic performance of new precast concrete shear wall under high axial compression ratio[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(3): 452

[14] 刘时伟,何乐,韩兴运,等. 复合直螺纹套筒:201922267101.6[P]. 2019 - 12 - 16
LIU Shiwei, HE Le, HAN Xingyun, et al. Compound straight thread sleeve: 201922267101.6[P]. 2019 - 12 - 16

[15] 装配式环筋扣合锚接混凝土剪力墙结构技术标准: JGJ/T 430—2018[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018
Technical standard for precast reinforced concrete shear wall structure assembled by anchoring closed loop reinforcement: JGJ/T 430—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018

[16] 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010
Technical specification for concrete structures of tall building: JGJ 3—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010

[17] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2003:336
GUO Zhenhai, SHI Xudong. Reinforced concrete: theory and analysis[M]. Beijing:Tsinghua Unversity Press, 2003: 336

(编辑　赵丽莹)