

DOI:10.11918/202402009

APC 接头连接的 T 型全预制剪力墙抗震试验

余琼¹,袁越¹,程浩²,唐子鸣¹,郭霖³,谢青海³

(1. 同济大学 土木工程学院,上海 200092;2. 上海市岩土工程检测中心有限公司,上海 200040;
3. 山西建筑工程集团有限公司,太原 030006)

摘要:为研究套筒灌浆搭接接头(简称 APC 接头)连接的 T 型全预制剪力墙的抗震性能,在 I、II 型 APC 接头的基础上,对 1 片现浇墙和 2 片预制墙进行拟静力试验。结果表明:现浇墙初始水平裂缝出现在基础顶面,由于套筒对混凝土的约束,预制墙的初始水平裂缝出现在套筒上方;极限状态下,试件均为弯剪破坏,现浇墙墙脚边缘混凝土压碎、钢筋压屈,预制墙为套筒上方钢筋压屈、混凝土压碎、套筒外混凝土剥落;在开裂、屈服、峰值荷载,刚度、延性和耗能能力方面,采用 I 型套筒的预制墙与现浇墙相当,而采用 II 型套筒的预制墙大于现浇墙;两种套筒在预制剪力墙的受力过程中保持弹性状态,均能有效传递钢筋应力;预制试件平面外位移在加载过程中出现负向累积,但相同加载级时预制墙与现浇墙平面外位移绝对值相当。

关键词: T 型全预制剪力墙;套筒灌浆搭接接头;搭接连接;拟静力试验;抗震性能

中图分类号: TU398.2 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2025)05-0100-14

Test on seismic behavior of T-shaped fully precast shear walls with vertical reinforcements spliced by grouted sleeve lapping connector

YU Qiong¹, YUAN Yue¹, CHENG Hao², TANG Ziming¹, GUO Lin³, XIE Qinghai³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Shanghai Geotechnical Engineering Testing Center Co., Ltd., Shanghai 200040, China;
3. Shanxi Construction Engineering Group Co., Ltd., Taiyuan 030006, China)

Abstract: To study the seismic performance of T-shaped fully precast shear walls with vertical reinforcement connected by sleeve grouted lapping connectors (referred to as APC connectors), quasi-static tests were conducted on one cast-in-place wall and two pieces of precast wall based on type I and type II sleeve grouted lapping connectors. The results showed that the initial horizontal cracks of the cast-in-place wall appeared at the top surface of the foundation, and the initial horizontal cracks of the precast wall appeared above the sleeve due to the restraint of the concrete by the sleeve. In the limit state, the specimens were all flexural-shear damage. In the cast-in-place wall, concrete crushed and rebar flexed at the edge of the footing, along with buckling of the rebars. For the precast wall, failure was characterized by buckling of the rebars above the sleeve, concrete crushing, and spalling of the concrete outside the sleeve. In terms of cracking load, yield load, peak load, stiffness, ductility and energy dissipation capacity, precast walls with type I sleeves were comparable to cast-in-place walls, while precast walls with type II sleeves were greater than cast-in-place walls. Both types of sleeves remained elastic during the loading process of precast shear walls, and both were effective in transmitting reinforcement stresses. The out-of-plane displacements of the precast specimens accumulated in the negative direction during loading, but the absolute values of out-of-plane displacements of the prefabricated walls were comparable to those of the cast-in-place walls at the same load level.

Keywords: T-shaped fully precast shear wall; all vertical members precasted in concrete structures (APC) connectors; lapping connection; quasi-static test; seismic performance

作为中国新型建筑工业化的代表,装配式建筑有着巨大的发展空间。预制件的可靠连接是装配式结构整体性和质量的最基本保障。其中,钢筋套筒

灌浆对接连接应用较广泛,该连接方式通过套筒约束灌浆料实现钢筋的可靠锚固。国内外学者已对此进行了充分研究^[1-3],马军卫等^[4]对采用灌浆套筒

收稿日期: 2024-02-18; 录用日期: 2024-04-12; 网络首发日期: 2024-07-12

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240709.0905.002>

基金项目: 上海市科技计划项目(21ZR1468300)

作者简介: 余琼(1968—),女,副教授,硕士生导师

通信作者: 余琼, yiongyu2005@163.com; 唐子鸣, tangziming1234@163.com

连接的预制剪力墙进行低周反复加载试验,结果表明,预制剪力墙的破坏模式、滞回性能、刚度退化、延性和耗能能力等抗震性能指标与现浇试件基本相同,具有良好的抗震性能。钱稼茹等^[5]研究发现套筒灌浆对接连接能有效传递钢筋应力,且预制墙承载力、刚度、耗能能力均能满足规范要求。刘香等^[6]对直螺纹灌浆套筒连接的一字型预制、现浇剪力墙进行拟静力试验,发现预制试件变形能力、刚度和耗能能力等力学性能均与现浇试件相似,满足规范要求。以上研究表明,预制剪力墙中钢筋套筒灌

浆连接较为安全可靠。但灌浆对接接头现场施工难度大,对灌浆的精度要求较高,预留孔径小,钢筋难以插入。为解决上述问题,余琼等^[7]提出套筒灌浆搭接接头,简称 APC (all vertical members precasted in concrete structures) 接头,钢筋在套筒内部以搭接形式连接,分为 I 型、II 型,构造如图 1 所示。该接头能够有效解决实际工程中套筒灌浆对接接头出现的套筒内径小、施工难度大、灌浆质量不易保证且成本高的问题。

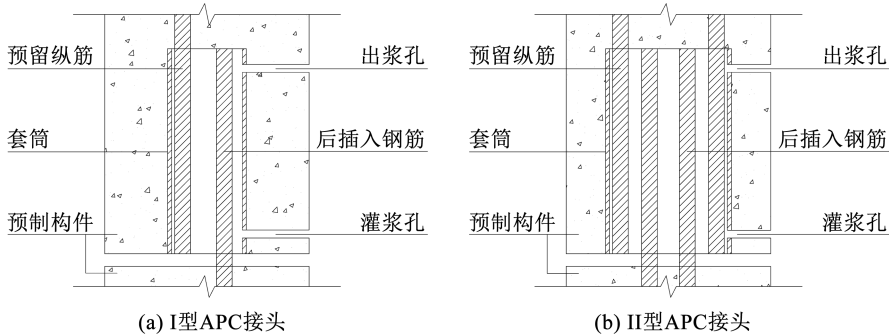


图 1 I、II 型套筒灌浆搭接接头

Fig. 1 Type I and II grouted sleeve lapping connectors

APC 接头的套筒内径比钢筋直径大 30 ~ 50 mm,现场施工时能够有效解决上下钢筋对接而导致的施工难度大、进度慢、工程质量无法保证等问题,且 APC 接头的钢筋搭接长度更短,对套筒及灌浆料的材料性能要求更低,套筒内壁无需加肋且成本低。

为研究 APC 接头工作性能,余琼等^[8-11]进行了不同搭接长度和钢筋直径的 I、II 型 APC 接头单向拉伸试验,分析了接头的破坏形式与力学性能,建议 I、II 型 APC 接头设计搭接长度分别为 $12.5d$ 和 $18d$ (d 为钢筋直径)。此外,进行了采用 APC 接头连接的一字型预制剪力墙、预制框架柱拟静力试验^[12-13],发现其破坏形态和承载能力与现浇墙相近,耗能能力略优于现浇墙,说明该连接能有效传递钢筋应力。

预制混凝土剪力墙在实际工程中多为带翼缘的 T 型剪力墙,其在装配式结构中起着重要的抗侧力作用,与结构整体的抗震性能密切相关,目前,对采用套筒灌浆搭接接头连接的 T 型预制剪力墙研究尚不充分。本文制作 1 片现浇、2 片全预制 T 型剪力墙,进行拟静力试验,对比研究试件的破坏现象、滞回曲线、骨架曲线、承载力、刚度、变形能力和耗能能力等,以评价 APC 接头连接的 T 型全预制构件的可靠性。

1 试验

1.1 试件设计及制作

1.1.1 剪力墙设计

对 1 片现浇墙与 2 片预制墙进行拟静力试验,现浇试件为 TSW-1,2 片预制试件分别采用 I 型与 II 型套筒,即 TAPC-1 和 TAPC-2。3 片剪力墙的外观尺寸均相同。各试件尺寸见图 2。底座尺寸为 $1\ 050\ \text{mm} \times 600\ \text{mm} \times 2\ 100\ \text{mm}$,墙身厚度为 200 mm,“一”字边总长 1 400 mm,翼缘总长 600 mm,墙身净高 2 750 mm(预制墙含 20 mm 厚灌浆层),加载梁截面尺寸为 $500\ \text{mm} \times 500\ \text{mm}$,试件高宽比均为 1.96。

各试件配筋情况如图 2 所示。除连接部位以外,3 片 T 型剪力墙试件底座、加载梁配筋完全一致,底座截面配筋 $32\ \Phi 22$,箍筋 $\Phi 10@100$;加载梁截面配筋 $14\ \Phi 22$,箍筋 $\Phi 10@100$ 。墙身配置 $8\ \Phi 8$ 竖向分布钢筋和 $\Phi 8@200$ 水平分布钢筋,T 字型边缘构件内配置 $6\ \Phi 14$ 竖向钢筋和 $\Phi 8@100$ 箍筋。

对墙身底部的箍筋、水平分布钢筋均进行加密处理,预制墙套筒底部至套筒顶部及向上延伸 300 mm 范围内为 $\Phi 8@50$ 、加密范围上方为 $\Phi 8@100$ 。预制试件套筒外箍筋的保护层厚度取 15 mm,套筒上端 50 mm^[14]处设置第一道水平分布钢筋。现浇剪力墙连接处的钢筋布置为从墙身底部向上 420 mm 依次设置 3 道 $\Phi 8@50$ 和 3 道 $\Phi 8@100$ 的水平分布钢

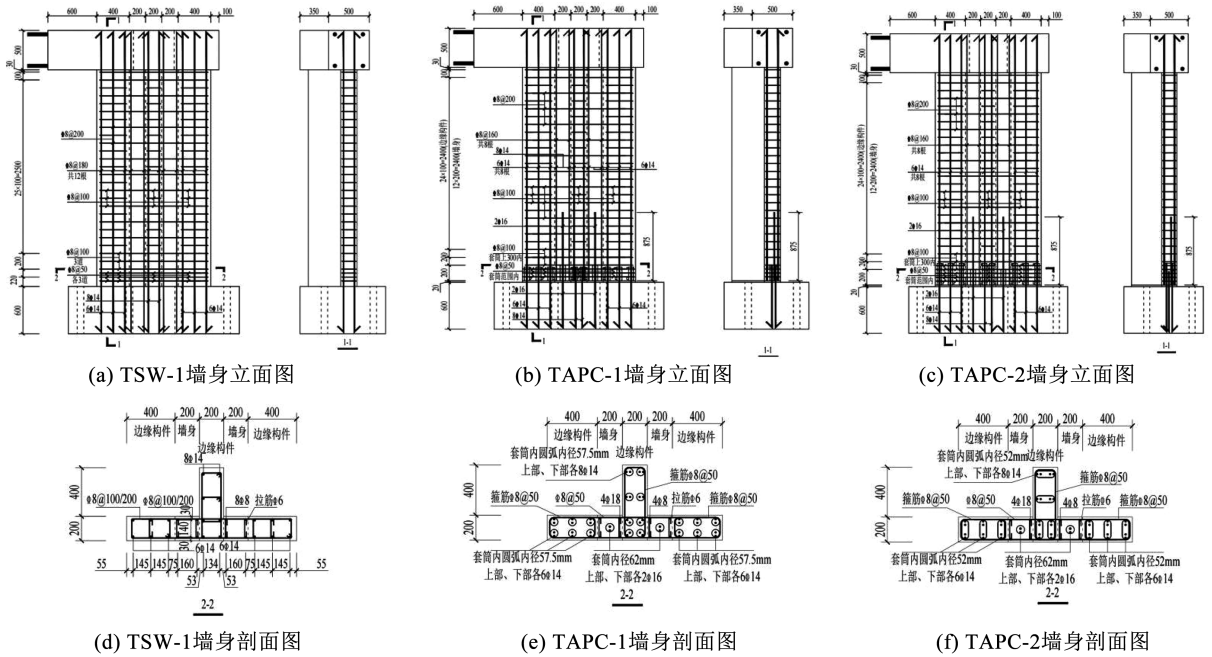
筋。同时,在边缘构件底部设置了 3 道 $\Phi 8@50$ 箍筋。

为研究套筒的力学性能,在 TAPC-1 的一字型边缘构件内均预埋 6 个、短肢突出侧内均预埋 4 个高 175 mm、内径为 57.5 mm 的 I 型套筒,墙身内预埋 2 个内径为 62 mm 的 I 型套筒。墙身内预埋的套筒和基础梁中预留的 1 $\Phi 16$ 钢筋形成搭接连接,其他套筒和基础梁中预留的 1 $\Phi 14$ 钢筋形成搭接连接。墙身内的 6 $\Phi 14$ 竖向分布钢筋与 2 $\Phi 16$ 钢筋形成搭接长度为 875 mm 的间接搭接。TAPC-2 短

肢突出侧和边缘构件内均采用高 280 mm、内径为 52 mm 的 II 型套筒,墙身内预埋套筒为内径 62 mm 的 I 型套筒。

1.1.2 套筒设计

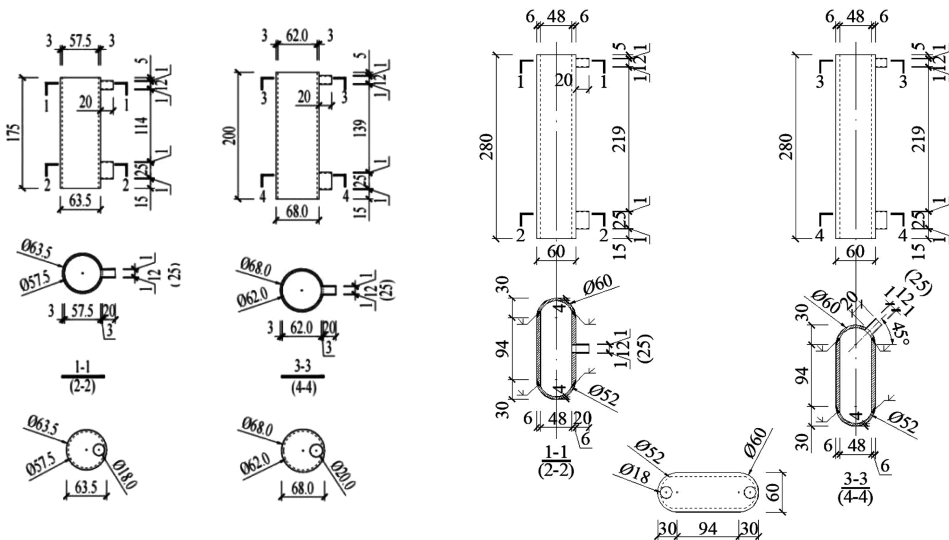
试验使用 I 型、II 型两种 APC 套筒,均由套筒、灌浆孔、出浆孔、盖板组成。所有套筒的灌浆孔、出浆孔均置于短肢突出侧,以尽可能模拟实际施工中的灌浆连接过程,盖板厚度为 2 mm,防止混凝土进入套筒。I 型套筒连接 $\Phi 14$ 、 $\Phi 16$ 钢筋,II 型套筒均连接 $\Phi 14$ 钢筋,套筒及盖板尺寸见图 3。



单位: mm

图 2 各试件截面尺寸及配筋

Fig. 2 Cross-sectional dimensions and reinforcement position of each specimen



(a) I型APC套筒

(b) II型APC套筒

单位: mm

图 3 I、II 型套筒及盖板详图

Fig. 3 Details of type I and II sleeves and covers

1.1.3 墙体制作

预制墙施工流程见图 4。主要包括墙身及底座

制作、试件吊装、组装及灌浆。

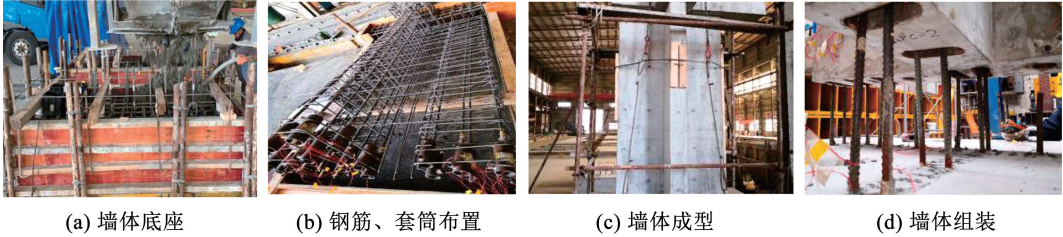


图 4 预制剪力墙制作过程

Fig. 4 Fabrication process of precast shear wall

1.2 试验材料

试件均采用 HRB400 带肋钢筋,其材性数据见表 1。

套筒的无缝钢管和钢板牌号均为 Q235B,其力学指标见表 2。

表 1 钢筋材性数据

表 2 套筒力学参数

Tab. 1 Material properties of rebar

Tab. 2 Mechanical parameters of sleeve

钢筋直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
8	370	633
14	540	636
16	480	643

钢材厚度/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	断后伸长率/%
3	309	426	22.09
4	326	467	13.51
6	315	449	28.69

墙身、加载梁的混凝土强度等级为 C40,根据规范^[15]制作 150 mm × 150 mm × 150 mm 试样进行抗压试验,测得其抗压强度均值为 48.1 MPa,根据规范^[15]计算得到其轴心抗压强度为 32.2 MPa,轴心抗拉强度为 2.89 MPa,弹性模量为 34.2 GPa;底座采用的混凝土强度等级为 C50,测得其抗压强度均值为 60.8 MPa。

1.3 加载制度及量测内容

各试件加载装置示意图 5,实际设备见图 6。试验轴向力设计值为 2 865 kN,设计轴压比为 0.5,采用全位移控制加载。400 t 油压千斤顶一次性施加竖向荷载至设计值,2 个 1 000 kN 作动器施加水平荷载,试验由 2 mm 位移开始加载,循环一圈,每一级增加位移 2 mm 至位移达 20 mm。达 20 mm 后每级均循环 3 圈,每级增加位移 4 mm 直至位移达 34 mm。达 34 mm 后每一级增加位移 6 mm,停止加载的标准为承载力首次下降至最大承载力的 85% 以下^[16]。

灌浆料为 H-40 高强无收缩灌浆料,制作 40 mm × 40 mm × 160 mm 试件进行抗折、抗压试验,测得抗折强度为 8.7 MPa,半截棱柱体的侧面抗压强度为 51.3 MPa。对 150 mm × 150 mm × 150 mm 试件进行劈裂抗拉试验,测得其强度为 4.3 MPa。

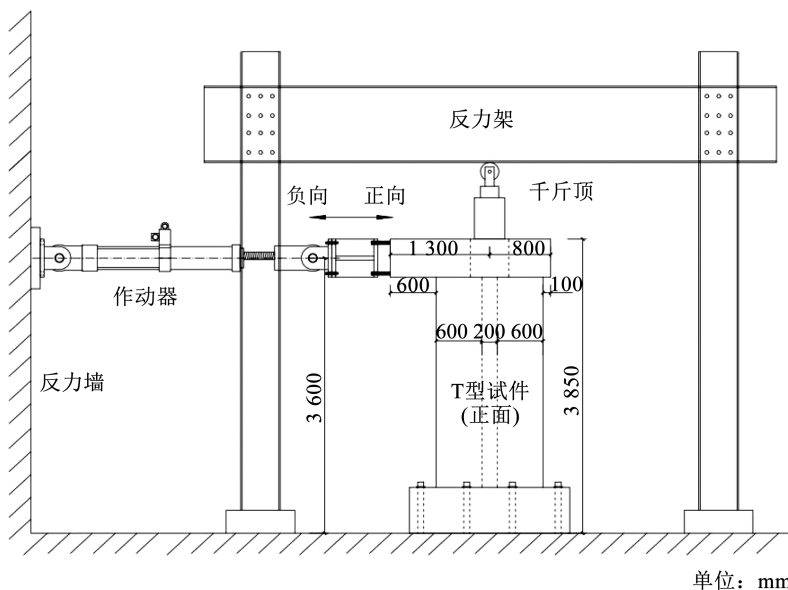


图 5 加载装置示意

Fig. 5 Schematic diagram of loading device

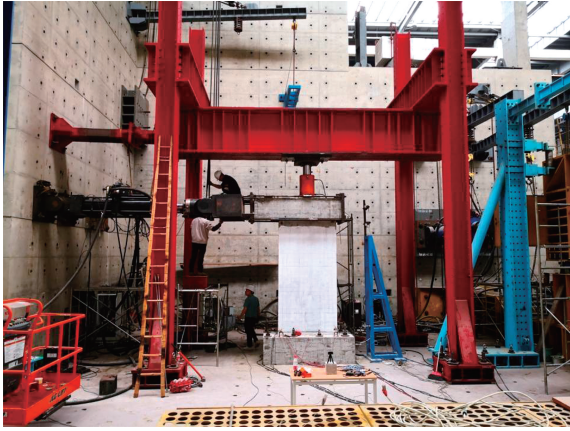


图 6 加载装置照片

Fig. 6 Photo of loading device

各试件位移计布置见图 7。分别布置位移测点 D-1 ~ D-6, 其中, D-1 ~ D-4 测量水平位移, D-5、D-6 测量平面外位移。

为测量钢筋应变, 在 TAPC-1、TAPC-2 的套筒上方 10 mm 处粘贴应变片 S1 ~ S13、S1 ~ S16 以测量钢筋应变, 分别粘贴于边缘构件间接搭接钢筋 Φ 16、墙身分布钢筋 Φ 8 和竖向钢筋 Φ 14 上。粘贴应变片 X1 ~ X12 于预留纵筋 Φ 14 上, 距基础梁上表面 10 mm。TAPC-1、TAPC-2 的边缘构件套筒中部截面分别粘贴应变片 T1 ~ T28、T1 ~ T20 以测量套筒应变, 套筒截面横向、纵向应变分别由偶数、奇数测点测量。应变片具体布置情况见图 8。

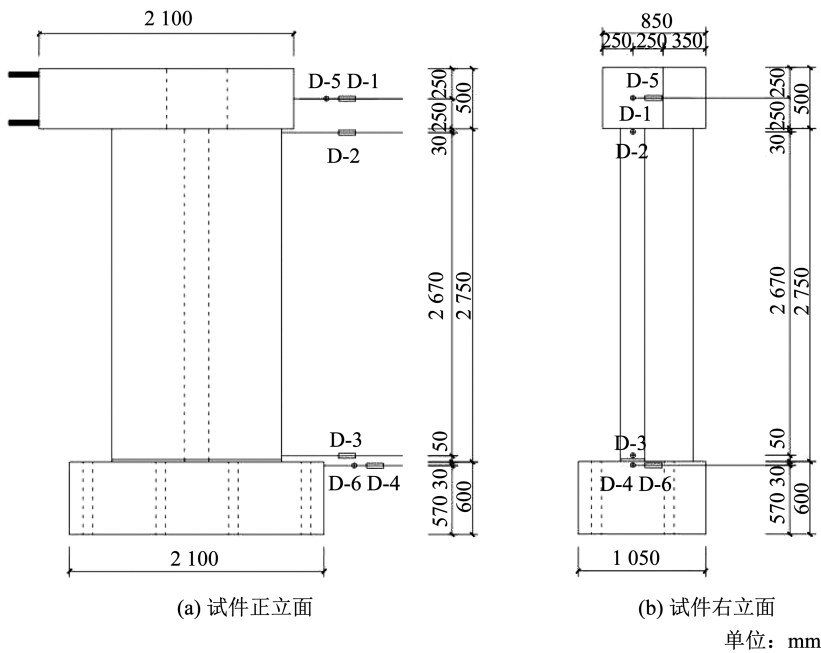
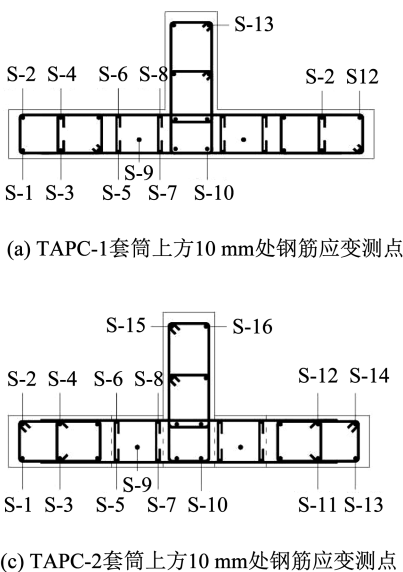


图 7 试件及位移计布置

Fig. 7 Arrangement details of specimen and displacement gauge



(a) TAPC-1套筒上方10 mm处钢筋应变测点

(b) TAPC-1基础上表面10 mm处钢筋应变测点

(c) TAPC-2套筒上方10 mm处钢筋应变测点

(d) TAPC-2基础上表面10 mm处钢筋应变测点

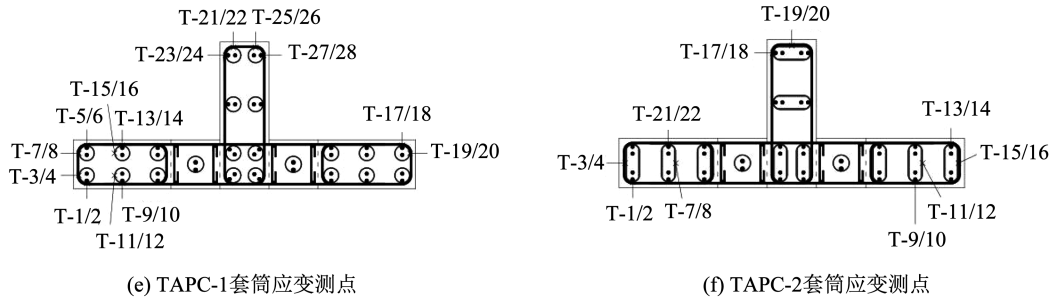


图8 各试件应变测点布置示意

Fig. 8 Schematic layout of strain measurement points of each specimen

2 试验结果与分析

2.1 破坏过程与破坏形态

2.1.1 TSW-1 试件

6 mm 加载级负向位移最大时,第一条水平裂缝出现在 TSW-1 墙体右侧距离基础底面 200 mm 处;8 mm 加载级正向位移最大时,有水平裂缝在墙体左侧距离基础顶面 150 mm、500 mm 左右高度位置出现;10 mm 加载级时,在墙体左侧出现一条沿 45° 斜向开展的裂缝;12 mm 加载级时,45° 裂缝出现在墙体左右两侧,沿斜向开展,墙体背面裂缝延伸至短肢上;14 mm 加载级时,墙身边缘构件最外侧纵筋屈服;16 mm 加载级时,在墙体右侧出现受压裂缝;24 mm 加载级时,墙体左侧出现受压裂缝,墙身正面的斜裂缝在墙身中部交叉;28 mm 加载级时,墙身左侧中上部出现一条 75° 斜裂缝,墙体右侧受压区开始出现混凝土剥落;34 mm 加载级时,墙身正面中部出现斜裂缝,受压区混凝土大面积压碎、剥落;40 mm 加载级时,墙身受压区墙脚处有混凝土大块压碎、脱落现象,墙体达到极限状态。

2.1.2 TAPC-1 试件

6 mm 加载级时,水平裂缝分别在试件左右两侧边缘出现;8 mm 加载级时,水平裂缝出现在墙体背面及左右两侧的出浆孔平面;10 mm 加载级时,斜向 45° 裂缝在墙体左侧沿斜向开展;12 mm 加载级时,沿斜向延伸的裂缝开始出现在墙体右侧;14 mm 加载级时,墙体左右两侧与灌浆层之间的结合面处在正向、负向加载时均出现一条受拉裂缝;16 mm 加载级时,墙身裂缝继续开展,墙身边缘构件的最外侧纵筋屈服;20 mm 加载级时,墙体右侧墙脚处有最外侧灌浆层小片剥落情况,负向加载过程中,墙体右侧斜裂缝沿斜向开展并延伸至中部短肢处;24 mm 加载级时,竖向裂缝分别出现在墙体左右两侧墙脚处;34 mm 加载级时,墙脚出现小块混凝土剥落;40 mm 加载级时,伴随混凝土压碎的“咔嚓”声,墙体边缘

套筒顶部位置处混凝土剥落;46 mm 加载级时,墙体左右两侧墙脚处混凝土大块剥落,套筒、钢筋外露;52 mm 加载级负向加载时,墙体达到极限状态,墙体左侧边缘构件最外侧纵筋在套筒顶面处被压屈。

2.1.3 TAPC-2 试件

6 mm 加载级时,墙身出现水平裂缝,左侧边缘构件出现一道水平裂缝穿过出浆孔;12 mm 加载级时,试件左侧灌浆层与墙体结合面处出现一道受拉裂缝,左侧墙体背面裂缝沿 45° 斜向发展并延伸至中部短肢上;14 mm 加载级时,墙体右侧裂缝沿 45° 斜向开展,左右侧边缘构件最外侧钢筋均屈服;16 mm 加载级时,墙体灌浆层最外侧出现小片剥落现象,墙体右侧混凝土出现受压裂缝,背面裂缝沿斜向开展延伸;20 mm 加载级时,混凝土受压裂缝在墙体左侧墙脚处出现;24 mm 加载级时,正负向加载至最大位移时,墙体底部与灌浆层结合面明显拉开,裂缝在墙体背面短肢上左右贯通;28 mm 加载级时,有小块混凝土从墙体墙脚处剥落,墙体背面斜裂缝穿过短肢继续沿斜向发展;34 mm 加载级时,墙体右侧墙脚处混凝土被大块压碎;40 mm 及 46 mm 加载级时,墙体右、左侧墙脚处混凝土大面积压碎、剥落,套筒外露;52 mm 加载级时,墙体达到极限状态,墙体左侧钢筋压屈。

极限状态下预制墙与现浇墙的裂缝开展情况如图 9 所示。3 片剪力墙裂缝均从墙体的左右两边缘开始发展,由水平逐渐变为倾斜发展最后在墙身中部交汇,最终破坏均主要为弯剪破坏。区别在于,由于墙身边缘构件底部套筒及灌浆料的抑制,预制墙裂缝开展更晚。

极限状态下,预制墙和现浇墙底部的破坏情况均为墙体左右两侧的混凝土被压碎脱落、钢筋压屈,两侧边缘构件均发生破坏,较为对称。2 片预制墙接缝处及现浇墙接触面左右两侧的混凝土被压碎,出现大面积剥落的现象,而预制墙中部灌浆料的破坏较为轻微。各试件破坏情况见图 10。

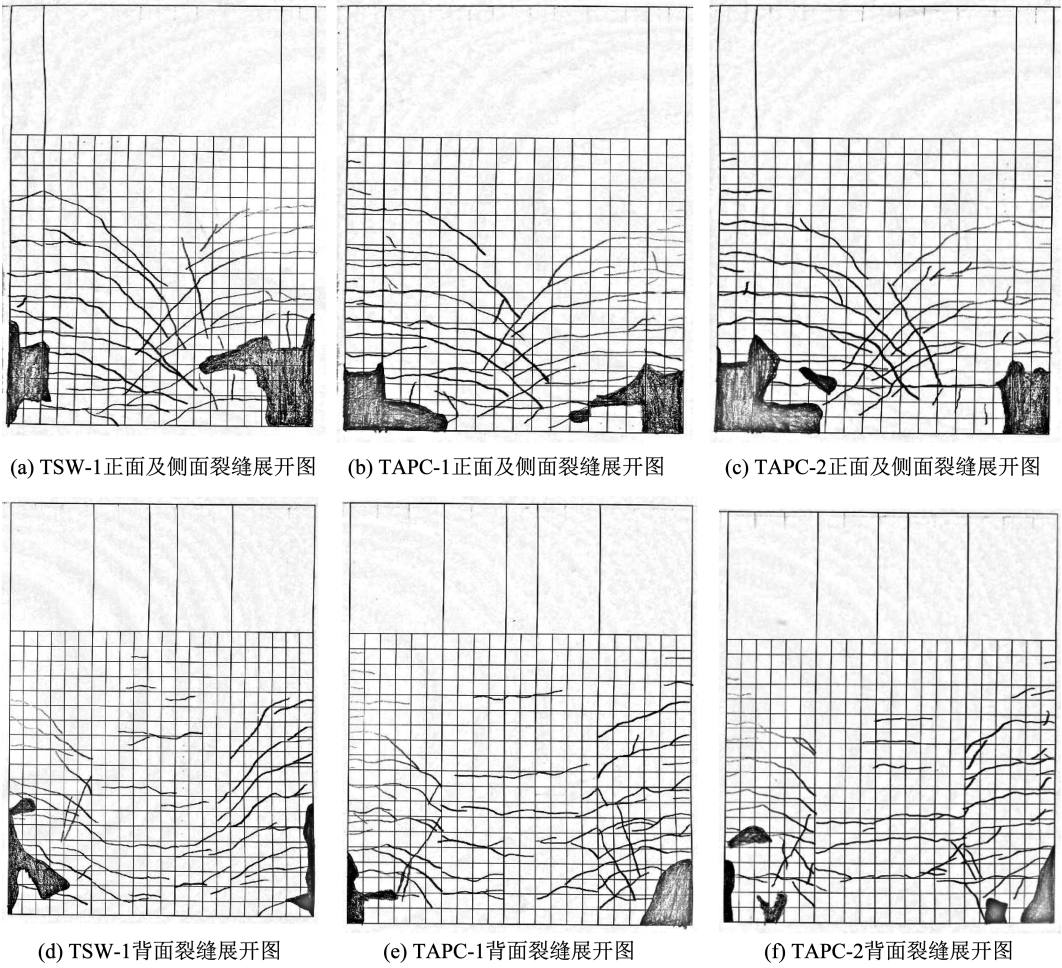


图 9 试件极限状态裂缝

Fig. 9 Crack condition of each specimen at limit state

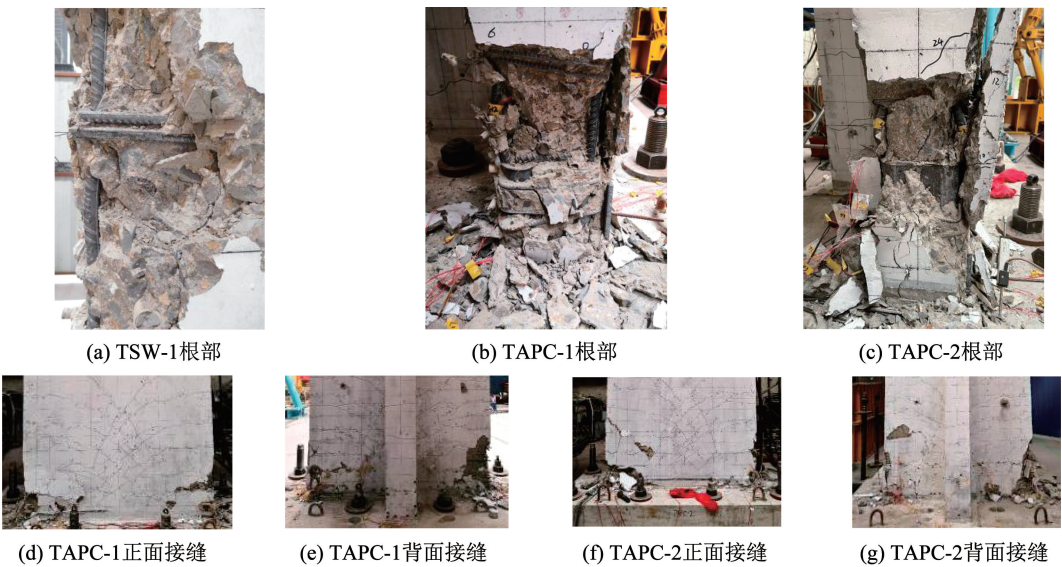


图 10 极限状态下各试件破坏情况

Fig. 10 Failure of each specimen at limit state

区别在于,现浇墙外侧受压区墙脚处混凝土压碎大面积剥落,随后钢筋压屈,预制墙因为 APC 套筒约束了预制墙底部的钢筋和混凝土,薄弱截面上移,表现为套筒上方钢筋被压屈、混凝土压碎,随后

套筒外侧混凝土剥落。

2.2 滞回曲线及骨架曲线

图 11 为各试件的滞回曲线和骨架曲线。其中,荷载为作用于试件加载梁的水平荷载值。滞回曲线

在加载前期,包围面积较小,在加载中期逐渐饱满,说明试件的耗能逐渐增加,加载后期均出现轻微的捏拢现象,说明 T 型试件两侧边缘构件在受压时均形成塑性铰,试件的正、负向滞回环形状在整个加载过程中都相近。

由图 11(d)可知,试件开裂前承载力与位移基

本呈线性关系,3 个试件在弹性阶段骨架曲线基本一致,初始刚度较为吻合。TSW-1、TAPC-2 试件正向骨架曲线基本吻合,TAPC-1 试件到达正向峰值荷载点时的位移较大、变形能力较好;TAPC-1、TAPC-2 试件的负向骨架曲线基本吻合,峰值荷载高于 TSW-1 试件。

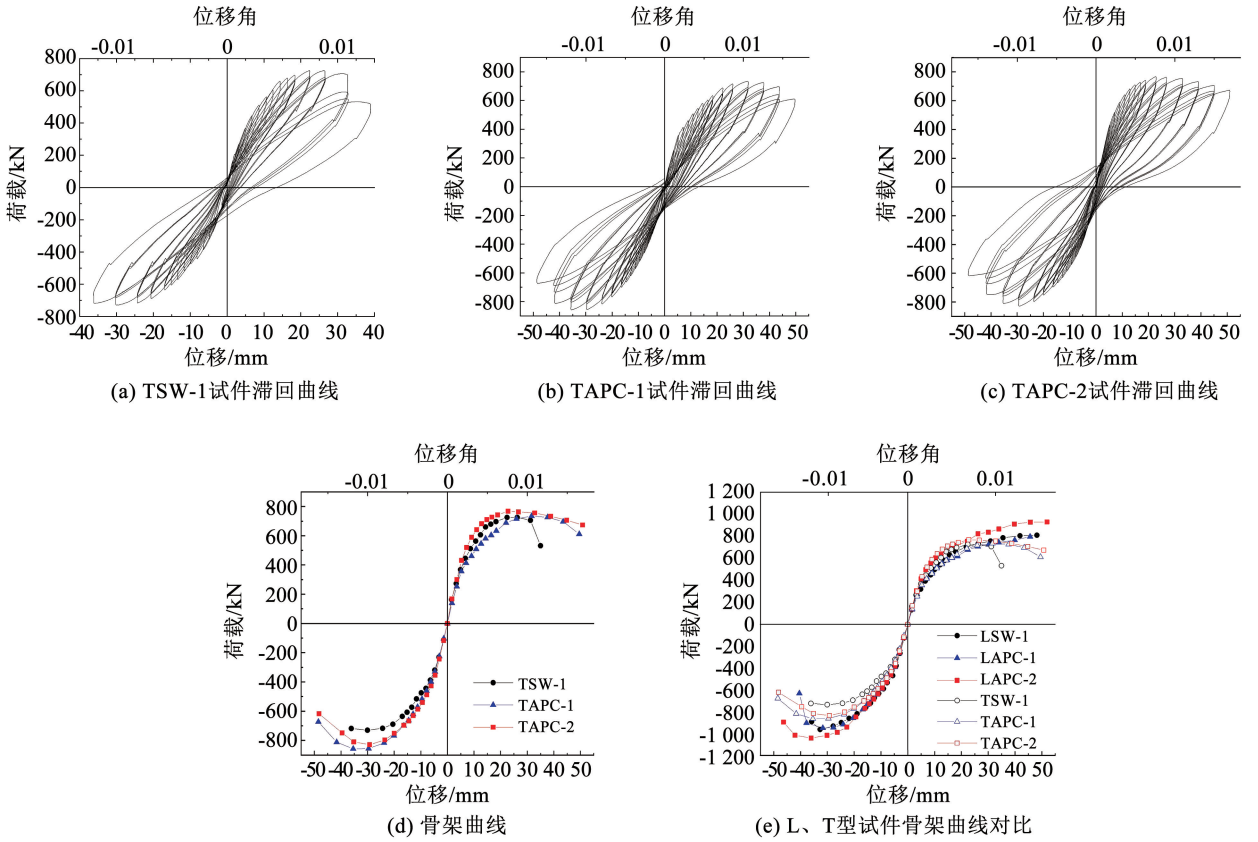


图 11 滞回曲线与骨架曲线

Fig. 11 Hysteresis curves and skeleton curves

对比相同翼缘尺寸的采用 APC 接头连接的 L 型预制、现浇墙^[19]骨架曲线发现,L 型、T 型剪力墙试件在开裂前骨架曲线基本一致,开裂前两种试件刚度基本相同,且 L 型试件的峰值荷载大于对应的 T 型试件。这是由于 L 型试件边缘构件短肢增加了其截面抗弯刚度,且 L 型边缘构件中配筋较

多、混凝土面积较大。

2.3 承载力

特征荷载下各试件的水平力与强度退化系数见表 3。强度退化系数为同一加载级时两相邻加载循环荷载峰值之比^[16]。

表 3 各特征荷载下的水平力及强度退化系数

Tab. 3 Horizontal force and strength degradation factor for each characteristic load

试件	开裂荷载		屈服荷载		峰值荷载		规范 ^[17]		F_{me}/F_m		峰值第 3 次循环 λ_{me2}		峰值第 3 次循环 λ_{me3}	
	正向	负向	正向	负向	正向	负向	正向	负向	正向	负向	正向	负向	正向	负向
TSW-1	367.64	319.08	606.28	515.52	725.42	729.87	564.88	614.82	1.29	1.19	0.943	0.925	1.004	0.945
TAPC-1	356.73	339.52	578.83	619.22	734.71	857.43	564.88	614.82	1.30	1.39	0.974	0.974	0.962	0.987
TAPC-2	431.68	354.15	677.04	585.57	767.97	829.24	564.88	614.82	1.36	1.35	0.946	0.946	0.975	0.932
LSW-1	319.21	465.86	548.15	798.13	—	954.70	—	745.31	—	1.28	0.958	0.935	1.007	0.979
LAPC-1	355.15	463.60	560.97	789.71	—	941.76	—	745.31	—	1.26	0.966	0.940	0.988	0.976
LAPC-2	412.71	380.58	662.16	825.24	—	1 032.96	—	745.31	—	1.39	0.963	0.943	0.982	0.983

T 型试件对称,取正负向开裂荷载平均值进行比较。由表 3 可知,平均开裂荷载 TAPC-2 > TAPC-1 > TSW-1。这是由于 APC 套筒的约束,墙的薄弱截面上移,抑制混凝土的开裂,提高了预制试件的开裂荷载。

由表 3 可知,T 型试件的平均屈服荷载 TAPC-2 > TAPC-1 > TSW-1,预制试件优于现浇试件,这是由于钢筋屈服时套筒对受压区灌浆料的约束提高了受压区抗压能力。TAPC-2 中 II 型 APC 套筒高度更大,对灌浆料的约束面积更大,故试件屈服荷载、峰值荷载最高。

试验结果表明,T 型剪力墙的破坏情况属于大偏心破坏,现象均为受拉区边缘纵筋屈服、受压区边缘构件最外侧纵向钢筋受压屈服、混凝土压碎。按规范^[17]计算 T 型墙的压弯承载力 M ,用钢筋和混凝土的强度实测值计算,再比上墙底至加载梁中心的高度 H , H 取 3 000 mm,计算试件的顶点水平力 F_m 。由表 3 可知,3 片剪力墙试件的强度退化系数相差很小。由试验可知,T 型墙的正负强度退化相近,损伤严重程度相近。

与翼缘尺寸相同的 APC 接头连接的 L 型预制、现浇剪力墙对比发现,总体上 L 型试件的开裂、屈服荷载小于 T 型试件,原因为 L 型试件的形状不对称,加载偏心更大。L 型试件负向峰值荷载大于 T 型试件,主要是负向加载时,L 边缘其混凝土截面较大且钢筋较多,承载力更高。

2.4 刚度

采用试件骨架曲线的割线刚度表示试件的刚度。如式(1)所示,以试件正、负向峰值点荷载绝对值之和比相应位移绝对值之和计算割线刚度^[16]:

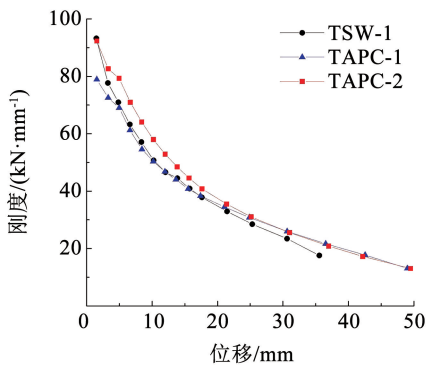
$$K_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+X_i| + |-X_i|} \quad (1)$$

式中: $+F_i$ 、 $-F_i$ 为第 i 个循环正、负向峰值点的荷载值; $+X_i$ 、 $-X_i$ 为第 i 个循环正、负向峰值点的位移值。各特征点下的割线刚度见表 4。可以看出,预制墙在开裂点、屈服点的刚度为 TAPC-2 > TSW-1 > TAPC-1, TAPC-1 试件的保护层厚度较小,因此,开裂点刚度小于 TSW-1,但套筒的约束作用增大了试件刚度,使得其刚度与现浇墙相当。但现浇墙的破坏位移更小,破坏点刚度更高。各试件刚度退化曲线对比见图 12。可以看出,其刚度退化曲线形状基本吻合,在开裂前刚度均退化较慢,试件开裂后至试件正向达屈服位移时,刚度退化较快,是因为混凝土裂缝快速发展;试件达屈服后刚度下降缓慢并逐渐稳定,是因为裂缝开展速度放缓趋于稳定。由于 II 型套筒较 I 型套筒长度更长、截面尺寸更大,灌浆区域更大,对混凝土的约束更强, TAPC-2 试件在整个加载过程中刚度最大。

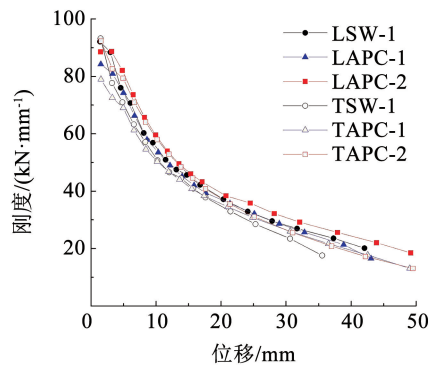
表 4 各试件在各特征点的割线刚度

Tab.4 Secant stiffness at each characteristic points of each specimen $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$

试件	开裂点刚度 K_{ce}	屈服点刚度 K_{ye}	峰值点刚度 K_{me}	破坏点刚度 K_{ue}
TSW-1	70.98	46.60	22.50	17.58
TAPC-1	69.04	47.02	25.67	13.09
TAPC-2	79.03	52.88	28.55	13.03
LSW-1	70.72	47.52	23.57	20.14
LAPC-1	74.26	45.15	25.66	16.52
LAPC-2	82.08	49.55	25.62	18.48



(a) T型预制、现浇试件刚度退化曲线



(b) L、T型预制及现浇试件刚度退化曲线

图 12 各试件刚度退化曲线对比

Fig. 12 Comparison of stiffness degradation curves of each specimen

对比相同翼缘尺寸的采用 APC 接头连接的 L 型预制、现浇剪力墙发现,开裂前 L 与 T 型试件刚度相差不大,开裂后 T 型试件的刚度退化更快,

T 型试件两侧混凝土损伤程度较为严重,是因为 L 型试件边缘构件的翼缘增加了抵抗截面弯矩的能力。

2.5 变形能力

各试件加载梁水平位移 Δ 、顶点位移角 θ 、延性系数 μ 见表5。试件在开裂、屈服、峰值、破坏等特征点时的变形能力,采用试件对应的位移角 θ 来反

映,即加载梁的水平位移 Δ 与加载梁中心至基础上表面的高度 H 之比。取承载力低于峰值荷载 85% 时的水平位移 Δ_u ,与试件屈服荷载所对应的水平位移 Δ_y 的比值为延性系数 μ ,反映试件的塑性变形能力。

表5 试件的变形情况

Tab.5 Deformation of specimens

试件	加载方向	开裂点		屈服点		峰值点		破坏点		延性系数 μ
		Δ_{ce}/mm	θ_{ce}	Δ_{ye}/mm	θ_{ye}	Δ_{me}/mm	θ_{me}	Δ_{ue}/mm	θ_{ue}	
TSW-1	正向	4.91	1/611	12.44	1/241	26.25	1/114	34.99	1/86	2.81
	负向	4.60	1/652	11.64	1/258	30.05	1/100	—	—	—
TAPC-1	正向	5.31	1/565	14.56	1/206	31.65	1/95	49.55	1/61	3.40
	负向	4.69	1/640	12.85	1/233	35.42	1/85	48.50	1/62	3.77
TAPC-2	正向	5.25	1/571	12.66	1/237	22.80	1/132	—	—	—
	负向	4.76	1/630	11.07	1/271	29.22	1/103	48.25	1/62	4.36
LSW-1	正向	4.82	1/622	12.48	1/240	—	—	—	—	—
	负向	5.59	1/537	18.12	1/166	32.72	1/92	38.90	1/77	2.15
LAPC-1	正向	5.23	1/574	13.52	1/222	—	—	—	—	—
	负向	6.35	1/472	17.90	1/168	31.70	1/95	40.45	1/74	2.26
LAPC-2	正向	4.96	1/605	14.36	1/209	—	—	—	—	—
	负向	4.71	1/637	18.78	1/160	36.07	1/83	46.36	1/65	2.47

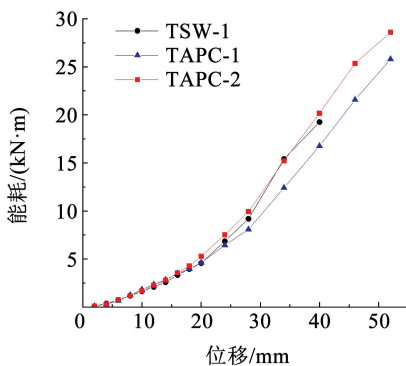
开裂点时,总体来看预制墙的开裂位移角均大于现浇墙。由试验现象可知,初始裂缝出现时,开裂位移角 $TAPC-2 > TAPC-1 > TSW-1$,原因为套筒对混凝土纵向变形的约束。各试件位移角均大于剪力墙结构(框剪结构)1/1 000 (1/800)^[18]的弹性层间位移限值,满足“小震不坏”的设防要求。

TAPC-2 与 TSW-1 的屈服点、峰值点的位移差异不大,均小于 TAPC-1。破坏点时,各试件位移角均大于剪力墙结构(框剪结构)1/120 (1/100)^[18]的弹塑性层间位移限值,满足“大震不倒”的设防要求。各试件延性系数均在 2 以上,由于套筒和灌浆料对预制试件墙身的约束,预制剪力墙的塑性变形能力更好。由于 II 型套筒比 I 型套筒更长、截面积更大,对墙身底部的约束作用更强,故延性系数 $TAPC-2 > TAPC-1 > TSW-1$ 。

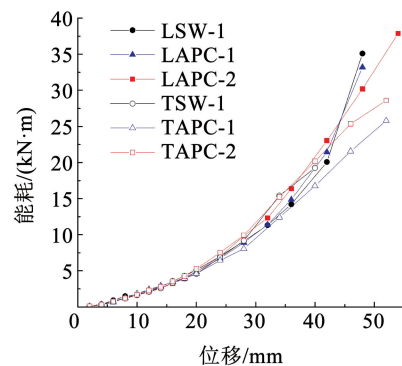
对比相同翼缘尺寸的采用 APC 接头连接的 L 型预制、现浇剪力墙^[19]发现,在各个特征点 L 型试件的负向位移、位移角都基本大于或接近 T 型试件,原因为 L 型墙的翼缘提高了墙体的刚度和强度。

2.6 耗能能力

以滞回曲线包围的面积来衡量试件的耗能能力,考虑到 3 个加载循环的加载级在第 2、3 圈中有损伤累积,仅取第一个加载循环进行计算。试件能耗与水平位移关系见图 13。可以看出,试件的能耗随水平位移增加而升高,且位移越大,能耗增长速度越快。20 mm 加载级前,各试件能耗相当,20 mm 加载级后,TAPC-1 能耗较其他两试件有所降低,这主要是由于在 20 mm 加载级时墙体右侧墙脚处最外侧有小片灌浆层剥落。



(a) T型试件能耗与水平位移关系



(b) L型、T型剪力墙试件能耗与水平位移关系

图 13 各试件能耗-位移曲线

Fig. 13 Energy consumption-displacement curves of each specimen

TAPC-2 的能耗-水平位移曲线与 TSW-1 基本一致,且 TAPC-2 破坏时的位移更大,累计耗能更多,虽然 TAPC-1 在 20 mm 加载级后同一加载级下的能耗低于 TSW-1,但其极限位移更大,累计耗能优于 TSW-1,可见,相比现浇墙,总体耗能能力预制墙更优。

对比相同翼缘尺寸的采用 APC 接头连接的 L 型预制、现浇剪力墙^[19],在加载前期 L 型、T 型剪力墙的能耗-水平位移曲线基本一致;加载后期,加载位移相当时,L 型剪力墙能耗更大。原因为 L 型试件边缘构件短肢增加了截面抗弯刚度,且配筋更多、混凝土面积更大,承载力相对较高,故耗能更大。

3 钢筋与套筒应变

3.1 钢筋应变

TAPC-1、TAPC-2 墙身边缘构件位于基础上方 10 mm 和套筒上方 10 mm 处最外侧纵筋荷载-应变曲线对比分别见图 14、15。由于 T 型墙对称,仅对一侧的应变数据进行分析。正值表示钢筋受拉,受压时则为负值。由于测点高度不同,加载时两测点所受弯矩大小不同,两处钢筋应变略有差异。

如图 14、15 所示,TAPC-1、TAPC-2 的预留钢筋及后插入钢筋的荷载-应变曲线形状相似,表明 I、II 型 APC 套筒均能在 T 型剪力墙中有效地传递钢筋应力。

由图 16 可知,TAPC-1、TAPC-2 试件边缘构件最外侧钢筋荷载-应变曲线与 TSW-1 试件曲线形状相似,表明预制墙的钢筋受力情况与现浇墙相近。预制试件底部的套筒、灌浆料的抗压强度大于现浇

墙的混凝土,故预制墙中受压钢筋应力小,曲线分别在负向加载和正向加载的末尾分离较大。

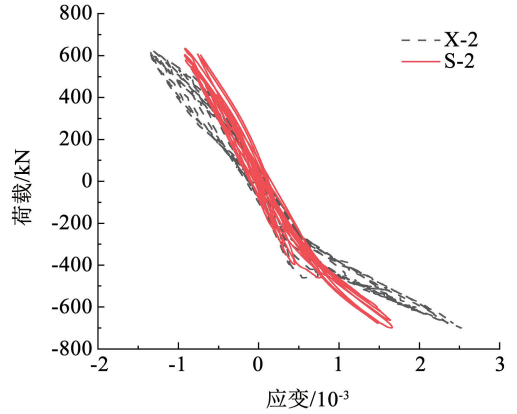


图 14 TAPC-1 边缘构件在基础、套筒上方 10 mm 处最外侧钢筋荷载-应变曲线

Fig. 14 Load-strain curves of outer reinforcement of TAPC-1 edge member at 10 mm above foundation and sleeve

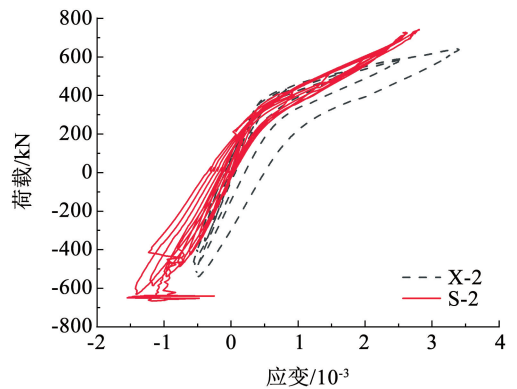
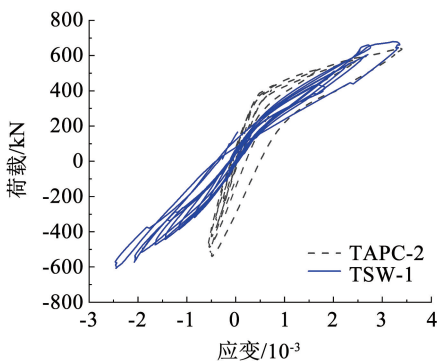
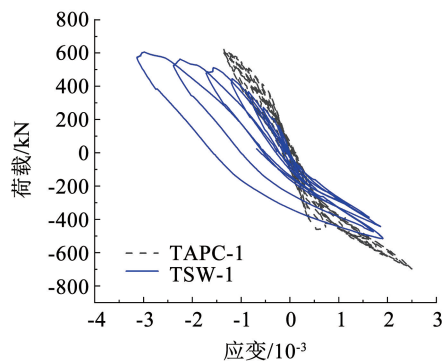


图 15 TAPC-2 边缘构件在基础、套筒上方 10 mm 处最外侧钢筋荷载-应变曲线

Fig. 15 Load-strain curves of outer reinforcement of TAPC-2 edge member at 10 mm above foundation sleeve



(a) TAPC-2与TSW-1左侧边缘构件最外侧纵向钢筋对比



(b) TAPC-1与TSW-1右侧边缘构件最外侧纵向钢筋对比

图 16 各试件基础上方 10 mm 处钢筋荷载-应变曲线对比

Fig. 16 Comparison of load-strain curves of reinforcement at 10 mm above the foundation of each specimen

3.2 套筒应变

TAPC-1、TAPC-2 试件边缘构件套筒中部截面的横向、纵向应变情况见图 17、18。其中,钢筋产生拉应变时为正值,反之为负。

加载过程中,测点处 APC 套筒应变均未达到屈服应变,表明 APC 套筒能够保证 T 型预制墙体纵向钢筋的连接可靠,有一定的安全储备。

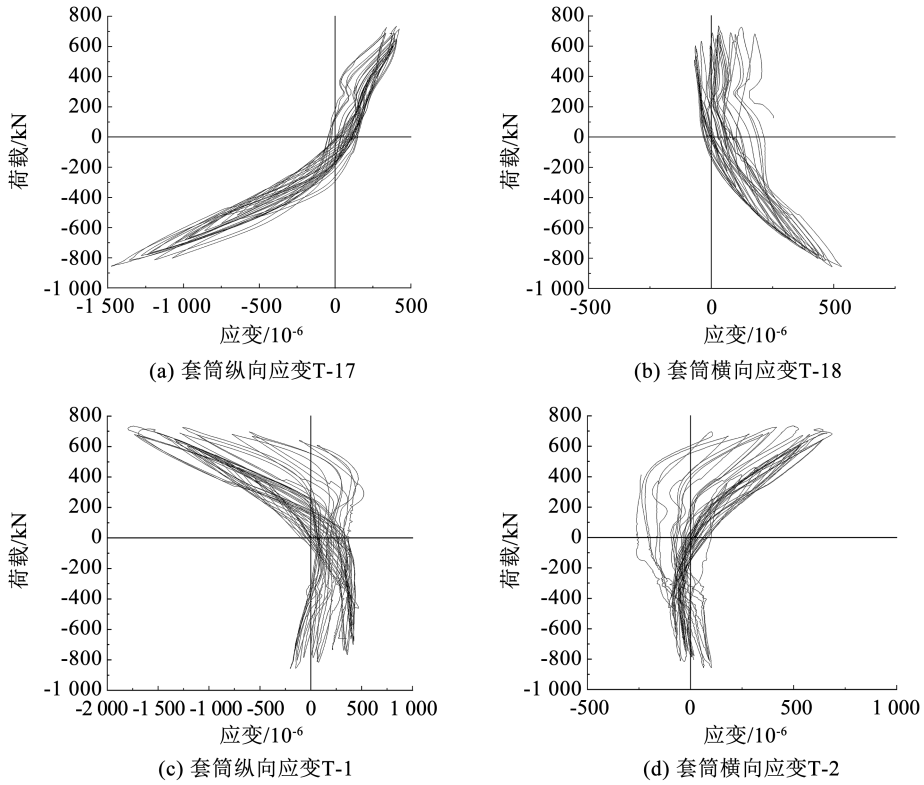


图 17 TAPC-1 边缘构件荷载-套筒应变曲线

Fig. 17 Load-sleeve strain curves for edge members of TAPC-1

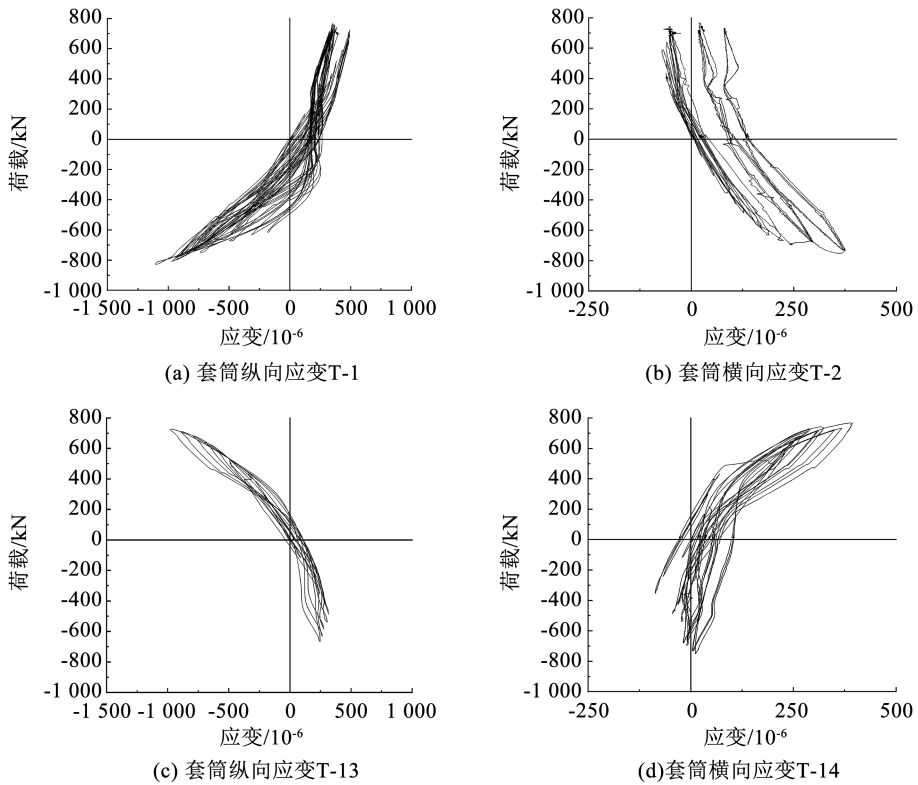


图 18 TAPC-2 边缘构件荷载-套筒应变曲线

Fig. 18 Load-sleeve strain curves for edge members of TAPC-2

4 墙体平面外位移

试件加载前后扭转情况见图 19。由 D-5 和 D-6

的差值计算试件的平面外位移 t , 试件顺时针转动产生的平面外位移为正, 反之为负。图 20 为试件平面外位移与荷载关系曲线。

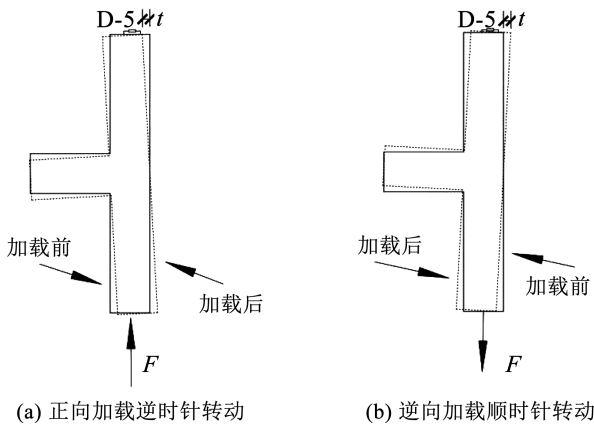


图 19 试件扭转情况示意

Fig. 19 Schematic of specimen torsion

如图 20(a) 所示, TSW-1 平面外位移-荷载曲线呈“V”字形, 正向加载到最大位移时, 试件的平面外

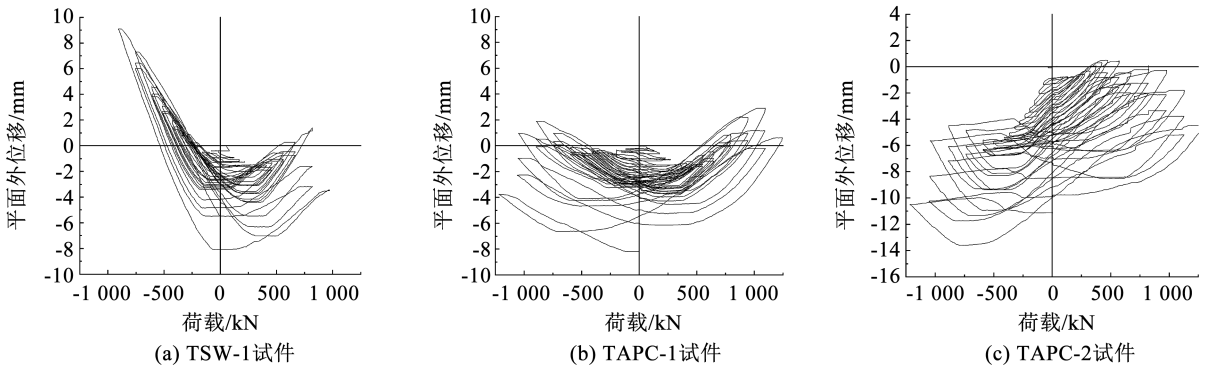


图 20 各试件平面外位移-荷载曲线对比

Fig. 20 Comparison of out-of-plane displacement-load curves for each specimen

5 结 论

1) 极限状态时, 预制试件与现浇试件均发生弯剪破坏, 现浇试件外侧底部混凝土压碎, 钢筋压屈; 预制试件为套筒上方混凝土压碎、钢筋压屈、套筒外侧混凝土剥落; 采用 I 型套筒试件的开裂荷载、屈服荷载、极限承载力、刚度、延性和耗能能力与现浇墙相当, 采用 II 型套筒试件的各项指标优于现浇墙, 原因为 II 型套筒更长, 对灌浆料、混凝土约束作用更大, 故较现浇剪力墙性能提升较大。

2) 预制试件中 APC 套筒连接的预留钢筋和后插入钢筋应变情况较为吻合, 说明接头连接能有效地传递钢筋应力; 预制试件开裂时位移角均大于 1/800, 破坏时位移角均大于 1/100, 具有良好变形性能, 满足“小震不坏、大震不倒”的抗震设防要求。

3) T 型预制、现浇墙与相同翼缘尺寸的采用 APC 接头连接的 L 型预制、现浇剪力墙的骨架曲线、刚度、变形能力、耗能能力在开裂前基本相当, 但在开裂后均为 L 型剪力墙性能更优。这主要是由

位移小于负向加载至最大时的平面外位移。由于剪力墙翼缘的存在, 试件作动器的加载位置存在偏心, 在偏心的影响下, 正、负向加载扭转方向不一致导致墙体两侧在正、负向加载过程中受力情况不对称。

由图 20 可知, 极限荷载时, TAPC-1 试件面外位移绝对值与现浇墙相当, TAPC-2 试件面外位移绝对值偏大。这主要是由于 TAPC-2 极限承载力偏高, 破坏位移偏大, 相同加载级时, 其面外位移绝对值与现浇墙相当。位移较大时, 预制试件正、负向加载过程中出现负向的面外位移累积。此现象与 L 型剪力墙^[19] 试验一致, 主要由于预制试件墙身纵向钢筋采用 APC 套筒灌浆连接, 墙体与基础之间为灌浆层和混凝土咬合连接, 在加载过程中, 结合面发生损伤, 造成试件残余变形。

于 L 型试件边缘构件短肢增加了其截面抗弯刚度。

4) 套筒上下钢筋的应变趋势相近, 表明 I、II 型 APC 套筒均能有效传递钢筋应力; 加载过程中套筒中部截面应变基本处于弹性阶段, 具有较高安全储备; 由于灌浆接缝损伤, 预制试件平面外位移在加载过程中出现负向累积, 但相同加载级时预制墙与现浇墙平面外位移绝对值相当。

本研究试件数量偏少, 后续将通过试验及有限元方法改变试件截面尺寸、轴压比、接头规格等进行试件的面内外抗震性能研究。

参 考 文 献

[1] LIN Feng, WU Xiaobao. Mechanical performance and stress-strain relationships for grouted splices under tensile and cyclic loadings [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2016, 10(4): 435. DOI:10.1007/s40069-016-0156-5

[2] 徐文靖, 马磊, 黄虹, 等. 套筒连接的预制拼装桥墩抗震性能研究[J]. 工程力学, 2020, 37(10): 93

XU Wen jing, MA Biao, HUANG Hong, et al. The seismic performance of precast bridge piers with grouted sleeves [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(10): 93. DOI:10.6052/j. issn.

- 1000-4750.2019.11.0667
- [3] ALIAS A, ZUBIR M A, SHAHID K A, et al. Structural performance of grouted sleeve connectors with and without transverse reinforcement for precast concrete structure [J]. Procedia Engineering, 2013, 53(5): 116. DOI:10.1016/j.proeng.2013.02.017
- [4] 马军卫, 潘金龙, 尹万云, 等. 灌浆套筒连接全装配式框架-剪力墙结构抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(10): 178
MA Junwei, PAN Jinlong, YIN Wanyun, et al. Experimental study on seismic performance of full precast shear wall-frame structures with reinforcement spliced by grouted-filled sleeves [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(10): 178. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2017.10.0475
- [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] 刘香, 崔涛, 伍敏, 等. 直螺纹灌浆套筒连接预制剪力墙抗震性能试验[J]. 沈阳工业大学学报, 2017, 39(2): 205
LIU Xiang, CUI Tao, WU Min, et al. Test for seismic behavior of precast shear wall connected with straight thread grouting sleeves [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2017, 39(2): 205. DOI:10.7688/j.issn.1000-1646.2016.02.16
- [7] 余琼. 一种新型的约束搭接套筒: ZL 2014 2 0656653.0 [P]. 2015-04-01
YU Qiong. A new confined lapping sleeve: ZL 2014 2 0656653.0 [P]. 2015-04-01
- [8] 余琼, 许志远, 袁炜航, 等. 两种因素影响下套筒约束浆锚搭接接头拉伸试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(12): 34
YU Qiong, XU Zhiyuan, YUAN Weihang, et al. Experimental study of grouted sleeve lapping connectors varied in two factors under tensile load [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(12): 34. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.12.004
- [9] 余琼, 王子沁, 白少华, 等. 套筒灌浆搭接接头拉伸试验及受力机理分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(4): 96
YU Qiong, WANG Ziqin, BAI Shaohua, et al. Sleeve lap joint grouting tensile test and stress mechanism analysis [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(4): 96. DOI:10.11918/202006123
- [10] 余琼, 魏晋文, 魏雨桐, 等. 套筒约束两根钢筋浆锚搭接拉伸试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(11): 20
YU Qiong, WEI Jinwen, WEI Yutong, et al. Experimental study of grouted sleeve lapping connectors of two bars under tensile load [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(11): 20. DOI:10.16339/j.cnki.hdxzkb.2019.11.003
- [11] 余琼, 袁炜航, 尤高帅. 带肋钢筋与灌浆料粘结性能试验研究及有限元分析[J]. 结构工程师, 2016, 32(6): 113
YU Qiong, YUAN Weihang, YOU Gaoshuai. Experiment and finite element analysis on bonding properties between deformed bars and grouting material [J]. Structural Engineer, 2016, 32(6): 113. DOI:10.15935/j.cnki.jggcs.2016.06.017
- [12] 余琼, 孙佳秋, 许雪静, 等. 钢筋套筒灌浆搭接连接的预制剪力墙抗震试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(10): 1348
YU Qiong, SUN Jiaqiu, XU Xuejing, et al. Experimental study on seismic behavior of precast shear walls with reinforcement spliced by grouted sleeve lapping connector [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(10): 1348. DOI:10.11908/j.issn.0253-374x.2018.10.005
- [13] 余琼, 匡轩, 方永青. 钢筋套筒灌浆搭接连接的预制框架柱抗震试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 18
YU Qiong, KUANG Xuan, FANG Yongqing. Experimental study on seismic behavior of precast frame column with vertical reinforcement spliced by grouted sleeve lapping connector [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(1): 18. DOI:10.11908/j.issn.0253-374x.2019.01.003
- [14] 中国建筑标准设计研究院有限公司. 装配式混凝土建筑技术标准: GB/T 51231—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017
China Architecture Standard Design and Research Institute Co Ltd. Technical standard for assembled buildings with concrete structure: GB/T 51231—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017
- [15] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010
China Academy of Building Sciences. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010
- [16] 中国建筑科学研究院. 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
China Academy of Building Sciences. Specification for seismic test of buildings: JGJ/T 101—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015
- [17] 中国建筑科学研究院. 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
China Academy of Building Sciences. Technical specification for concrete structures of tall building: JGJ 3—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010
- [18] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010
China Academy of Building Sciences. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010
- [19] 余琼, 唐子鸣, 张星魁, 等. 套筒灌浆搭接连接的L型预制剪力墙抗震试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(9): 72
YU Qiong, TANG Ziming, ZHANG Xinghui, et al. Test on seismic behavior of L-shaped precast shear walls with vertical reinforcements spliced by grouted sleeve lapping connector [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(9): 72. DOI:10.11918/202207038