

装配式剪力墙新型节点抗震性能试验研究

Experimental Study on Seismic Performance of New Nodes in Prefabricated Shear Walls

刘启超^{1,2}, 付素娟^{1,2}, 姜一天³, 姜新佩⁴, 王 钦⁵, 张 娜⁶

- (1. 河北省建筑科学研究院有限公司, 石家庄 050227; 2. 河北省装配式住宅工程研究中心(筹), 石家庄 050227;
3. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024; 4. 河北工程大学 水电学院, 邯郸 056000;
5. 河北省住房和城乡建设厅信息宣传与档案中心, 石家庄 050000;
6. 九易庄宸科技(集团)股份有限公司, 石家庄 050031)

摘 要: 由于现阶段装配式剪力墙结构在施工过程中存在的运输难、安装难、质量难把控等问题, 设计了一种新型装配式剪力墙无外伸钢筋的连接节点。为了全面评估该新型结构在受力与抗震方面的性能表现, 开展足尺试件的拟静力荷载试验, 并建立有限元模型进行参数分析。结果表明: 新型装配式剪力墙的滞回曲线、骨架曲线、刚度退化曲线、耗能能力等特征参数与现浇剪力墙类似。当贯通粗钢筋取 28 mm 时, 新型装配式剪力墙的承载力、刚度和耗能能力等方面均优于现浇剪力墙, 可以满足等同现浇的设计要求。

关键词: 装配式; 剪力墙结构; 有限元模拟; 抗震性能

中图分类号: TU37 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 03-0156-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.03.028

LIU Qichao^{1,2}, FU Sujuan^{1,2}, JIANG Yitian³, JIANG Xinpei⁴, WANG Qin⁵, ZHANG Na⁶

- (1. Hebei Academy of Building Research, Shijiazhuang 050227, China; 2. Hebei Engineering Research Center of Prefabricated Housing (Preparation), Shijiazhuang 050227, China; 3. PowerChina Beijing Engineering Co., Ltd., Beijing 100024, China; 4. School of Water Conservancy and Electric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056000 China; 5. Information Communication and Archives Center of the Department of Housing and Urban - Rural Development. Shijiazhuang 050000, China;
6. Jiuyizhuangchen Technology (Group) Co., Ltd., Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: According to the problems of transportation, installation and quality control in the construction of prefabricated shear wall structure at this stage, In order to comprehensively evaluate the performance of the new structure in terms of stress and seismic resistance, full-scale quasi-static load tests were conducted on specimens, and a finite element model was established for parameter analysis. The research results indicate that the hysteresis curve, skeleton curve, stiffness degradation curve, energy dissipation capacity and other characteristic parameters of the new prefabricated shear wall are similar to those of cast-in-

基金项目: 河北省创新能力提升计划项目 (225676160H)。

作者简介: 刘启超 (1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 装配式建筑结构节点连接。

通信作者: 张 娜 (1991—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 建筑智能建造。

收稿日期: 2023-09-01

place shear walls. When the through thick steel bar is taken as 28 mm, the bearing capacity, stiffness, and energy dissipation capacity of the new prefabricated shear wall are superior to those of the cast-in-place shear wall, and can meet the design requirements equivalent to cast-in-place.

Key words: assembled; shear wall structure; node analysis; finite element simulation; Seismic performance

0 引言

装配式建筑以其施工速度快、环境污染小的显著优势,成为推动建筑工业化的重要力量^[1]。其中,装配式剪力墙结构又以其出色的整体性和广泛的应用范围,成为市场关注的热点^[2-4]。目前虽然常规装配式剪力墙采用的套筒连接或浆锚搭接连接在抗震性能上可以媲美现浇剪力墙结构,但是通过大量试验与工程实践验证^[5-8],其连接方式仍然具有部分局限性,如:连接钢筋数量多、钢筋外伸长度过长、灌浆数量多、施工安装难度大等,在一定程度上限制了装配式建筑的普及与应用。为了克服这些难题,降低施工难度,并减少现场湿作业,国内学者进行大量创新和试验。

彭志威等^[9]提出了一种采用齿槽和U型套箍连接相结合的新型装配式剪力墙结构,并进行了理论计算和有限元模拟,分析结果表明新型装配式剪力墙结构受力性能良好,其抗剪承载力略高于现浇剪力墙;周稚竣等^[10]提出了一种使用钢扣板竖向连接装配式剪力墙的结构形式,结果表明,钢扣板竖向连接装配式剪力墙结构的延性、耗能能力、刚度退化能力较好;李兴华^[11]提出的一种全新的“非等同现浇”的干式连接预制装配剪力墙结构体系,与现浇剪力墙承载力的理论计算值与试验值基本一致;陆寅杰^[12]提出一种具有弯剪分离受力特征的新型配筋齿槽装配式剪力墙,这种配筋齿槽的拼缝连接形式具有良好的抗剪性能和抗滑移能力;蒋平安等^[13]提出一种底部竖向分布钢筋断开、水平部分开缝的装配式剪力墙结构连接方式,并进行抗震性试验研究,研究表明竖向分布钢筋不连接的装配式剪力墙在承载能力、耗能能力等方面弱于现浇剪力墙,但当增大轴压比可显著提高装配式剪力墙试件的承载能力、位移延性及刚度;隋伟宁等^[14]提出了两种新型干式连接节点方案,并与现浇剪力墙进行分析对比,结果表明,全装配式剪力墙的力学性能优于现

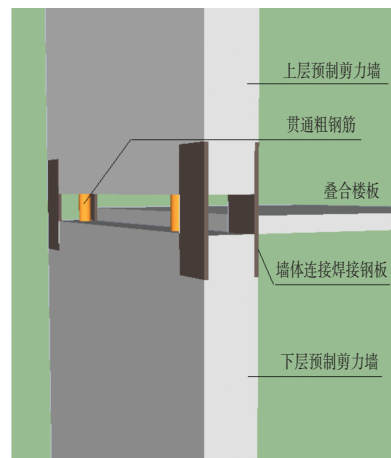
浇剪力墙,工字钢梁连接的全装配式剪力墙比抗剪键连接全装配式剪力墙的力学性能更好。

综上所述,多数研究依然保留了装配式剪力墙的外伸钢筋设计,现场施工难度大、施工效率低、连接质量难以保证等问题依旧存在。因此提出了一种无外伸钢筋设计的新型装配式剪力墙连接方式^[15]。并通过拟静力荷载试验及有限元软件分析。观察其破坏过程及破坏特征,分析其滞回性能、刚度退化、耗能能力等。

装配式剪力墙无外伸钢筋连接方式的提出,不仅是对传统装配式剪力墙连接方式的一次重要革新,也是推动装配式建筑向更高层次发展的一次积极探索。

1 试验概况

新型装配式剪力墙的具体构造如下:预制剪力墙顶部和底部两侧分别预留焊接钢板,并与墙体钢筋笼焊接连接;墙体连接焊接钢板采用三边围焊的方式与预留焊接钢板形成有效连接,将上下两片剪力墙连接成为整体。剪力墙两侧分别设直径为50 mm的预留孔洞,使用大直径的带肋钢筋贯通上下墙体,完成墙体连接后,预留孔内浇筑高强灌浆料。构造示意图如图1所示。



(a) 三维图

建筑结构

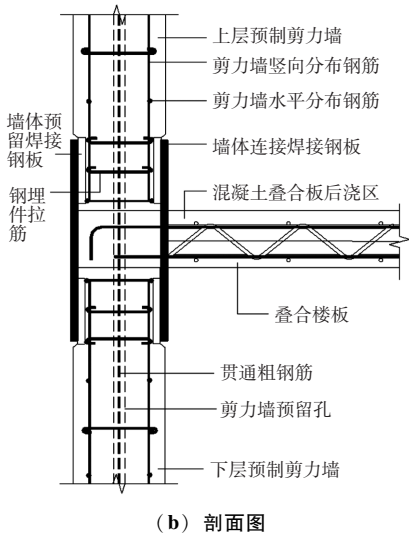


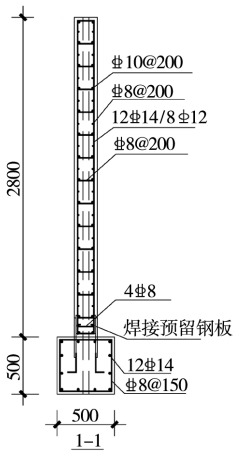
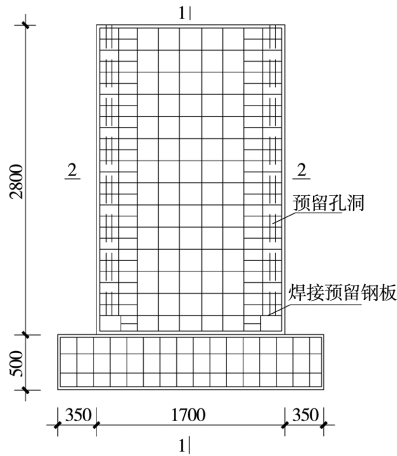
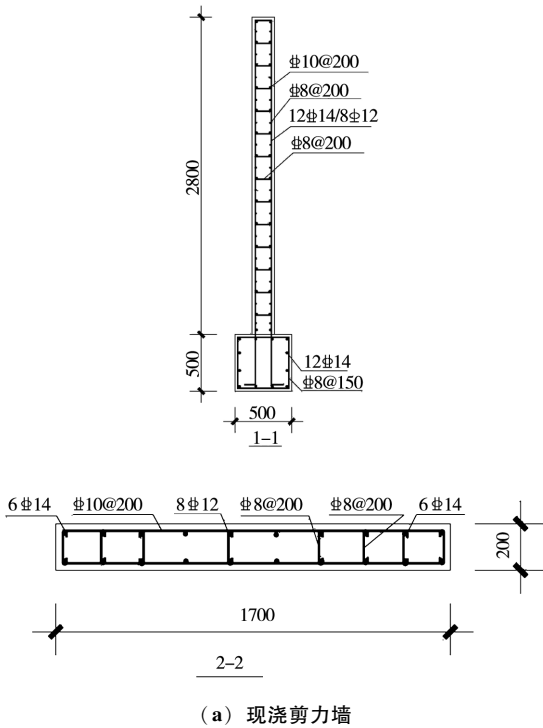
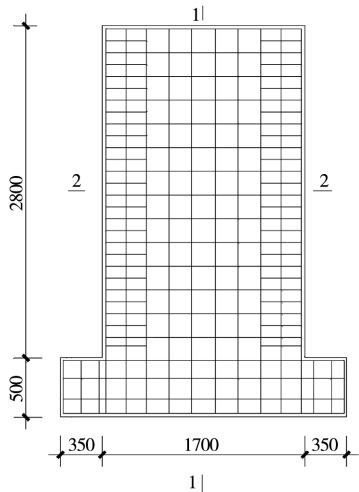
图 1 新型装配式剪力墙构造示意图
Fig. 1 The design of precast concrete shear wall

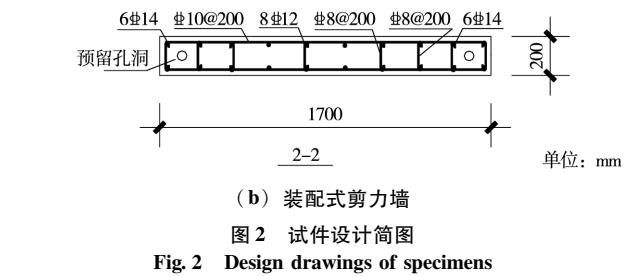
为明确新型连接方式预制剪力墙的受力状态以及破坏模式，建立足尺试验模型并施加拟静力荷载。参照试验结果，建立有限元模型，研究贯通粗钢筋直径的变化对新型装配式剪力墙抗震性能的影响。

1.1 试件制作

制作两个 1:1 足尺剪力墙试件，分别为现浇剪力墙以及新型装配式剪力墙。现浇剪力墙试件墙宽 1 400 mm、墙高 2 850 mm、墙厚 160 mm，混凝土强度等级为 C30，钢筋强度为 HRB400，墙体配筋如图 2 所示。

新型装配式剪力墙试件在墙体材料、尺寸、配筋等方面与 XJ1 试件保持一致，预留焊接钢板尺寸为 190 mm × 140 mm × 16 mm，墙体连接焊接钢板尺寸为 180 mm × 390 mm × 16 mm，钢板材质为 Q235B；预留孔洞内各配有 1 根 HRB400、直径 28 mm 的带肋





贯通钢筋，并用 C40 灌浆料灌实。

剪力墙试件的混凝土、钢筋原料性能实测值见表 1、表 2。

表 1 混凝土材性					
Table 1 Main performance indexes of concrete					
强度等级	立方体抗压强度/MPa	棱柱体抗压强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松系数	强度等级
C30	29.5	25.1	3.1×10^4	0.2	C30

表 2 钢筋力学性能				
Table 2 Main performance indexes of rolled steel				
直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/MPa	伸长率/%
8	367	460	2.1×10^5	10
16	436	551	2.1×10^5	16
28	426	547	2.1×10^5	18

1.2 试件加载方案

试验加载方式为拟静力加载，通过地脚螺栓将剪力墙地梁与试验台连接牢固，试件顶部施加垂直向下的轴压力，由于要兼顾到液压仪的最大量程，试验轴压力取值为 70 kN，在试件顶部一侧施加变力 - 变位移混合控制加载。试件加载时，竖向轴压力维持稳定，试件屈服前，水平方位加载方式采用力控制，每级往复 1 次；试件屈服后，水平方位加载方式采用位移控制，每级往复 3 次。当试件水平承载力降低至极限荷载的 85% 时，认为该试件已完全破坏，即终止加载，试验结束。加载装置如图 3 所示。

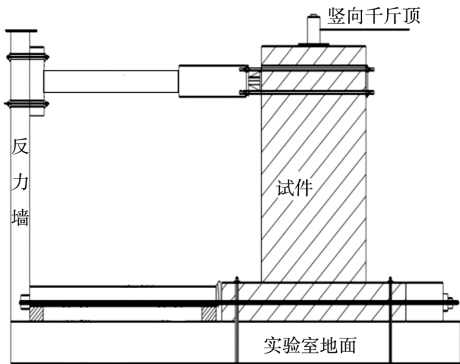
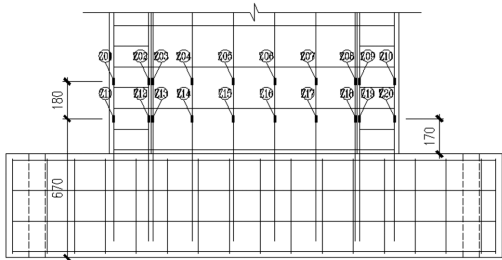


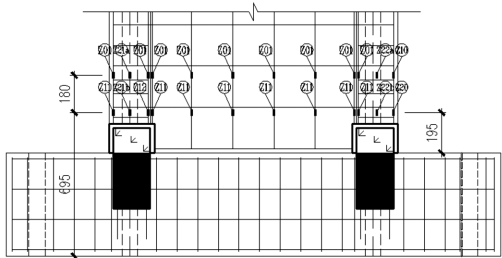
图 3 加载装置图

Fig. 3 Loading device

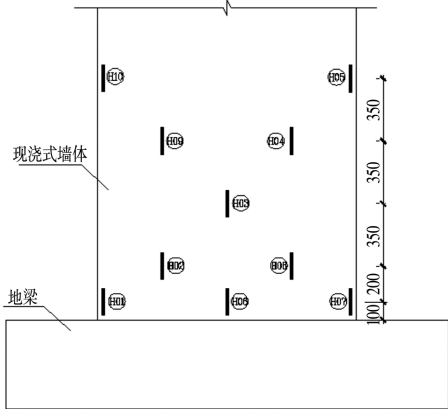
应变片布置如图 4 所示，钢板上的应变片按照 0°、45°及 90°三个方向粘贴，以便得到钢板的主应力与最大应变。



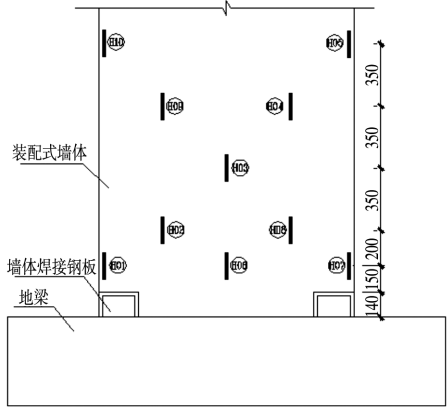
(a) 现浇剪力墙构件的钢筋应变片布置



(b) 新型装配式剪力墙构件的钢筋应变片布置



(c) 现浇剪力墙构件的混凝土应变片布置



(d) 新型装配式剪力墙构件的混凝土应变片布置

图 4 应变片布置图

Fig. 4 Layout diagram of strain gauge

单位: mm

建筑结构

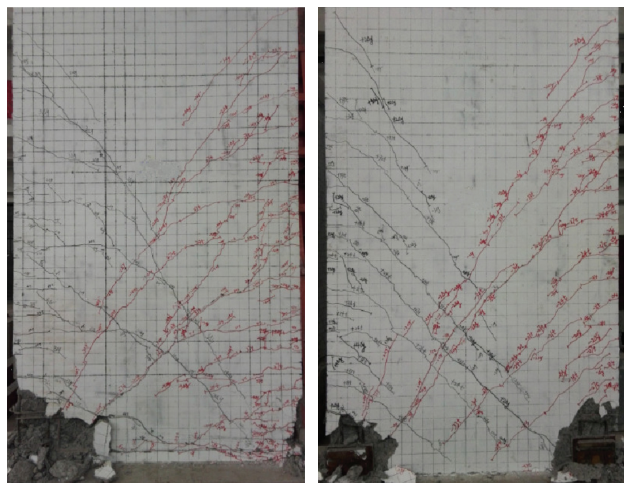
1.3 试验结果与分析

1.3.1 试件破坏现象

现浇剪力墙试件加载开始后,水平推力到达180 kN时,试件正面右侧底部显现出首道裂缝。水平推力到达210 kN时,剪力墙试件左侧下方显现3道长短不一的斜裂缝,裂缝在最开始以横向裂纹为主,随着加载的继续,逐步发展为斜向裂纹,进入开裂阶段。水平推力施加至-270 kN后,混凝土裂缝开始向剪力墙内部快速延长发展,裂缝宽度同时也在不断扩展,边缘约束构件的纵筋开始屈服,认为试件进入屈服阶段,开始位移控制加载,此刻剪力墙试件的屈服位移为10.92 mm。当位移加载 $+4\Delta y$ 时,斜裂缝互相交差,呈现“X”型,边缘约束构件底部混凝土表面开始剥落。当位移加载到 $+5\Delta y$ 时,墙体承载力到达其峰值荷载401.03 kN,且在剪力墙底层出现贯通裂缝、两侧有混凝土压碎断裂。当加载位移到43.05 mm时,底部两侧的混凝土开始剥落,剪力墙试件下方的斜裂缝宽度迅速扩大。此刻墙身水平承载力降低到251.71 kN,为峰值荷载的63%,视构件已经破坏,试验结束。最终破坏形态如图5(a)所示。

新型装配式剪力墙试件加载开始后,当水平推力到达130 kN时,试件正面右侧底部出现第一道混凝土裂缝,裂缝位置位于焊接钢板上部。当水平推力到达150 kN时,剪力墙试件左下位置,围绕在焊接钢板附近,显现若干道斜裂缝,随着继续加载,该裂缝以斜裂缝的形式逐渐向试件中心扩展,进入开裂阶段。当水平荷载达到320 kN后,剪力墙纵向分布钢筋屈服,认为试件发展至屈服阶段,开始位移控制加载,此刻试件的屈服位移为15.12 mm,该墙体的焊接钢板未表现出屈服状态,此状态下的剪力墙原有下部裂缝向墙体内部迅速发展,裂缝宽度也随之加速扩展,同时新的横向裂缝出现在墙体竖向约束构件上方。当位移加载至 $+2\Delta y$ 时,试件正面右侧底部裂纹向内发展为一道斜长裂缝,该裂缝发展到剪力墙底部与坐浆层相通,并且裂缝不断扩展,随着该级荷载的持续循环,墙身出现大量 45° 斜裂纹,斜裂纹继续发展相交,呈现出“X”型。当位移加载至 $+3\Delta y$ 时,剪力墙试件承载力为448.97 kN,达到

峰值荷载,此刻剪力墙底部的水平接缝处位置两侧的混凝土压碎脱落,并暴露出试件内部钢筋;墙体中下方的“X”型裂缝扩展迅速。当试件的水平位移加载至62.45 mm时,剪力墙最底层侧面的混凝土基本上已经完全破坏,试件底部中间位置裂缝的缝长、缝宽发展迅速,但是墙体预留钢板和墙体连接焊接钢板只出现较小幅度的倾斜,未发生明显形变。此刻墙身水平承载力降低到362.07 kN,为峰值荷载的81%,视构件已经破坏,终止加载试验。最终破坏形态如图5(b)所示。



(a) 现浇剪力墙破坏形态 (b) 新型装配式剪力墙破坏形态

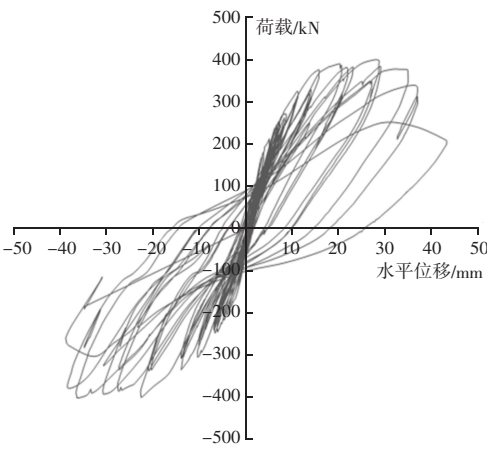
图5 试件破坏形态

Fig. 5 Failure modes of specimen

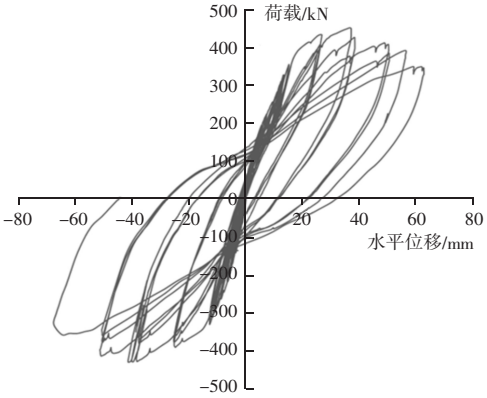
综上,两组试件的相同点:试件底部两侧位置的混凝土都被破坏、脱落,裂缝的最终形式均为“X”型,试件的破坏形式符合弯剪破坏的特点。两组构件的不同点:试件裂缝的产生位置以及发展状态不同,现浇剪力墙试件的裂缝最开始出现在两侧底部,一开始以横向裂纹为主,但会逐步产生斜向裂纹;新型装配式剪力墙试件的裂缝首先在连接焊接钢板位置出现,随后向墙身内部发展。

1.3.2 滞回曲线与骨架曲线

由图6可知,两试件滞回环表现基本一致,饱和度和相似,在弹塑性阶段,滞回环在初始时候均呈现为梭形,随着加载的继续,滞回曲线又开始逐步呈现为弓型,也表现了不同水平的“捏拢现象”。新型装配式剪力墙的极限承载力稍高,两组试件耗能能力较好。



(a) 现浇剪力墙



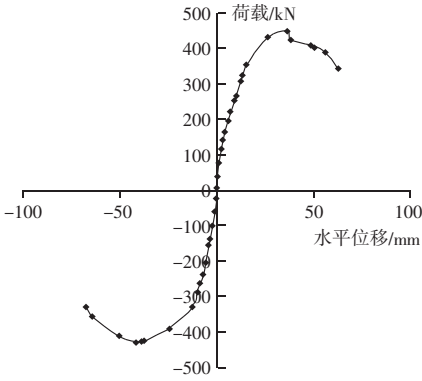
(b) 新型装配式剪力墙

图6 滞回曲线

Fig. 6 Hysteresis curves

由图7可知，两组构件的骨架曲线走势基本一致，并且都有比较平缓的下降段，但是进入屈服阶段后，现浇剪力墙的下

降趋势较大。 综上，现浇剪力墙与新型装配式剪力墙试件在滞回曲线和骨架曲线的形态和趋势上大致相似，但新型装配式剪力墙的极限承载力、刚度、延性、耗能能力等方面优于现浇剪力墙。



(b) 新型装配式剪力墙

图7 骨架曲线

Fig. 7 Skeleton curves

1.3.3 强度

两组试件的荷载特征值详见表3。

表3 墙体特征荷载

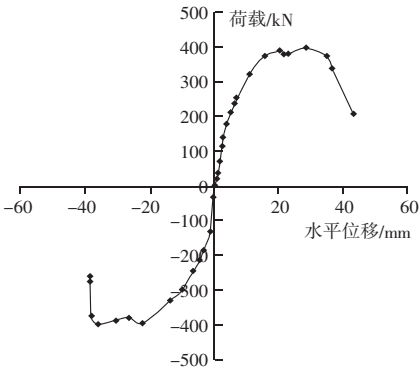
Table 3 The characteristic load of wall

编号	开裂荷载/kN	屈服荷载/kN	极限荷载/kN
XJ1	179.66	324.83	401.03
ZP1	141.03	352.07	448.97

新型装配式剪力墙的开裂荷载值相对较低，因为新型装配式剪力墙采用钢板焊接连接，降低了混凝土有效厚度，容易产生应力集中并产生裂缝。但是随着往复加载的进行，贯通钢筋、焊接连接钢板开始承担荷载，并能够发挥主要作用，而且两者具有较好的协调工作能力，因此新型装配式剪力墙的屈服荷载值、极限荷载值较高。

1.3.4 刚度退化

由图8可知，现浇剪力墙的初始刚度比较大，但是刚度退化趋势比较快；在试件屈服后，新型装配式剪力墙的刚度反而较大。两组构件在加载后期均逐步趋于稳定。可以看出，装配式剪力墙的贯通粗



(a) 现浇剪力墙

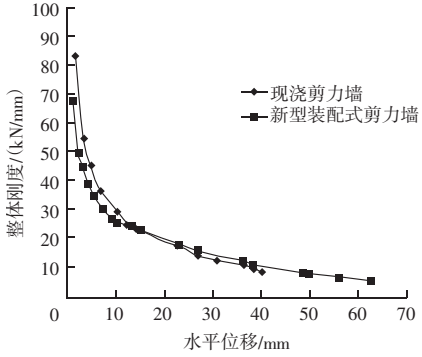


图8 刚度退化曲线对比

Fig. 8 Comparison of stiffness degradation curves

建筑结构

钢筋与焊接板的协同工作对构件在屈服后的刚度提升效果明显。

1.3.5 耗能能力

两组构件在各个阶段的等效粘滞系数详见表 4。

表 4 等效粘滞系数
Table 4 effective viscosity

编号	开裂	屈服	峰值	破坏
现浇剪力墙	0.026 9	0.034 4	0.060	0.084
新型装配式剪力墙	0.039 0	0.056 1	0.094	0.098

随着的加载的进行，等效粘滞系数都是逐渐增大，说明试件损伤在不断积累，且新型装配式剪力墙的耗能能力较高。

2 有限元建模分析

为了掌握贯通钢筋直径的变化对新型装配式剪力墙抗震性能的影响，使用 Abaqus 软件建立了 7 种装配式剪力墙有限元模型，贯通粗钢筋的直径作为唯一变量，其余参数均与新型装配式剪力墙试件一致。通过对比研究其骨架曲线、刚度退化曲线等特征曲线，得到贯通粗钢筋的最佳直径。

2.1 模型建立

试件的力学模型采用混凝土塑性损伤模型来模拟，混凝土的本构关系依据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》^[16]附录 C，钢筋本构关系选择 PQ-fiber 中的 USTEEL-02 钢筋模型。混凝土单元选择 C3D8R，钢筋单元选择 T3D2，钢筋构件采用 Embedded Region（嵌入）方式与墙体连接，焊接钢板之间连接使用 TIE 连接来模拟，装配式剪力墙与地梁之间考虑两界面的库仑摩擦力，未考虑混凝土与钢筋之间黏结滑移的相互作用。模型墙体上方施加竖向均布荷载，模拟加载梁，轴压比为 0.31；墙顶一侧施加水平作用力，加载方式为变力-变位移混合加载；地梁底面施加约束 6 个自由度的约束固定。有限元模型如图 9 所示。

对贯通钢筋直径为 28 mm 的装配式剪力墙模型进行拟静力加载，目的是获取该模型的滞回曲线，并验证模型的准确性。其滞回曲线如图 10 所示。

通过与上文的新式装配式剪力墙试验结果进行分析，可以看出新式装配式剪力墙极限荷载的有限元模拟值比试件试验值高 8.39%。分析原因：在有限元模拟中，不会出现试验中混凝土振捣不达标、

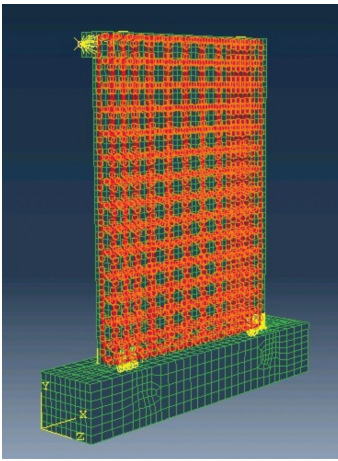


图 9 有限元模型
Fig.9 FEA model

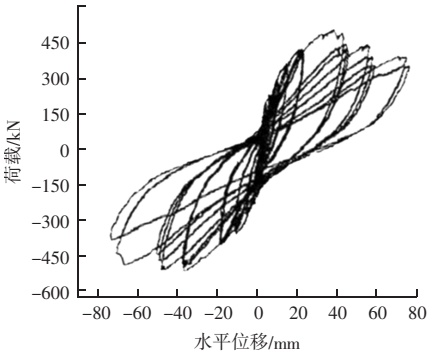


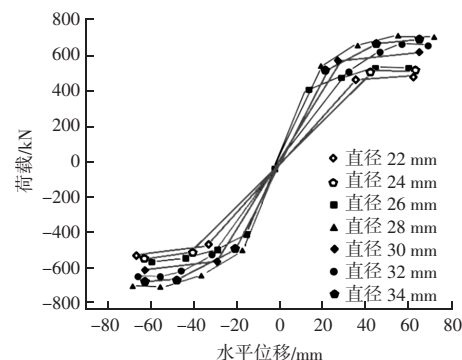
图 10 有限元模型滞回曲线
Fig.10 Hysteresis curves of FEA mode

试验试件养护不充分等问题；有限元建模没有设置混凝土与钢筋之间的黏结滑移作用力，但是两组结果走势与结果较为接近，在误差控制范围内，认为该模型正确。

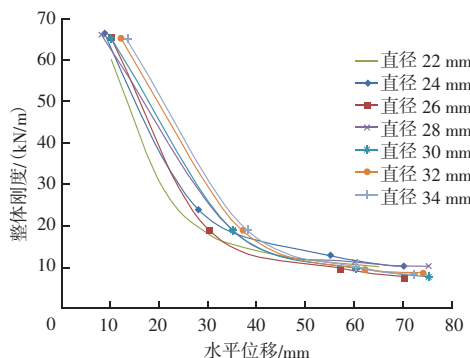
2.2 有限元结果与分析

以贯通钢筋的直径作为单一变量，分别构建了 7 组装配式剪力墙有限元模型。竖向贯通钢筋的直径为 22、24、26、28、30、32、34 mm。对比分析其骨架曲线、刚度退化曲线如图 11 所示。

7 组骨架曲线的走向比较相似。试件在加载开始阶段，位移荷载曲线表现为线性变化，为弹性阶段。随着加载的继续，当试件钢筋到达强化阶段后，所有试件的刚度都开始下降，但是不同直径贯通钢筋的装配式剪力墙刚度下降速度、屈服荷载值还是有区别的。直径 28 mm 贯通钢筋装配式剪力墙的刚度降低过程相较缓慢，屈服荷载值最大；直径 22 mm 贯通钢筋装配式剪力墙的刚度降低过程相较缓慢，



(a) 骨架曲线



(b) 刚度退化曲线

图 11 骨架曲线、刚度退化曲线对比

Fig. 11 Comparison of skeleton curves and stiffness degradation curves
耗能能力降低最快, 屈服荷载值最小。

因 7 组刚度退化曲线较为接近, 为方便观察, 选取其中 4 组进行对比: 试验试件退化趋势基本相似, 在初始加载时, 试件的刚度均出现较大幅度的退化; 当加载至试件屈服荷载时, 各组试件的刚度退化下降走势也开始变小。贯通钢筋直径 34 mm 的装配式混凝土剪力墙初始刚度最大, 但刚度退化的速率较快。刚度退化走势表现最佳的是贯通钢筋直径为 30 mm 的新型装配式剪力墙, 其耗能能力表现最好。

3 结论

通过对新型装配式剪力墙试件的抗震性能研究, 得到以下主要结论:

(1) 新型装配式剪力墙的承载力、耗能能力、刚度、延性性能等参数与现浇剪力墙基本一致, 表现出较好的抗震性能, 可以达到“等同现浇”的设计理念。

(2) 装配式墙体两侧的贯通粗钢筋直径的大小会影响试件的初始刚度, 但不能决定试件的抗震性能。

(3) 新型装配式剪力墙解决了目前装配式剪力墙在运输、安装中难度大的问题, 且只需要在灌浆孔中浇筑少量灌浆料, 现场湿作业少, 可以提高施工质量、增强安装效率。

参 考 文 献

- [1] 何艳阳. 装配式建筑施工技术在工程中的应用探索与要点解析 [J]. 建筑, 2025 (3): 126-128.
- [2] 张鑫, 隗鸾. 预制装配式建筑的发展前景及结构设计要点 [J]. 绿色环保建材, 2019 (6): 68.
- [3] 张宗军, 薛建新, 张再路, 等. 装配式剪力墙高效安装技术分析 [J]. 建筑机械, 2019 (5): 59-62.
- [4] 李晴, 李素蕾, 吴广源, 等. 发展装配式建筑的问题及对策探究 [J]. 价值工程, 2019, 38 (13): 47-50.
- [5] 刘妍琦, 王东旭. 装配式建筑设计中的剪力墙结构设计要点 [J]. 建设科技, 2025 (6): 74-76.
- [6] 别俊含. 装配式建筑常见质量问题防范对策探讨 [J]. 工程与建设, 2024, 38 (3): 708-711.
- [7] 卢树军. 装配式建筑关键安装施工要点及质量控制 [J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23 (2): 190-192.
- [8] 杨志兵, 陈勇. 预制装配式建筑施工工艺探讨与研究 [J]. 中国建筑装饰装修, 2024 (4): 166-168.
- [9] 彭志威, 匡亚川, 陈煜杰, 等. 新型含齿槽式连接装配式剪力墙抗剪性能研究 [J]. 工业建筑, 2023, 53 (12): 135-142.
- [10] 周稚竣, 吴欣禹, 吴金国, 等. 钢扣板竖向连接装配式剪力墙结构抗震性能研究 [J]. 建筑与预算, 2022 (10): 71-73.
- [11] 李兴华. 新型干式连接预制装配剪力墙结构抗震性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2022.
- [12] 陆寅杰. 配筋齿槽装配式剪力墙的局部弯剪分离性能研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2023.
- [13] 蒋平安, 孙岩波, 彭雄, 等. 新型装配式剪力墙结构抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2025, 55 (4): 12-17, 25.
- [14] 隋伟宁, 柳轶男, 张伟男, 等. 新型干式连接全装配式混凝土剪力墙的力学性能 [J]. 黑龙江科技大学学报, 2025, 35 (2): 239-248.
- [15] 姜新佩, 刘启超, 付素娟, 等. 新型预制装配式混凝土剪力墙水平缝受力性能的数值分析 [J]. 水电能源科学, 2016, 34 (11): 124-128.
- [16] 混凝土结构设计规范. GB 50010—2010. 北京: 中国建筑出版社, 2016.