

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.02.017

新型装配式剪力墙恢复力模型

樊禹江^{1,2},葛俊²,艾斌平²,丁佳雄²,廖凯²

(1. 长安大学建筑学院,陕西 西安 710061; 2. 长安大学建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘要: 针对新型装配式剪力墙结构,以轴压比和边缘构件纵筋配筋率为对照参数,设计了 3 个缩尺比为 1:1.54 的剪力墙试件并进行了拟静力试验。试验结果表明,3 个试件的最终破坏模式相近,表现为墙体斜裂缝开展至受压区混凝土剥落的弯剪破坏;轴压比的减小或边缘构件纵筋配筋率的降低均对新型装配式剪力墙抗震性能有不利影响,表现为滞回性能减弱和极限承载力降低。结合有限元模拟结果,建立了新型装配式剪力墙的五折线骨架模型及恢复力模型,该模型与试验结果吻合较好,可以为新型装配式剪力墙结构的弹塑性地震反应分析提供参考。

关键词: 装配式剪力墙;水平连接;抗震性能;数值模拟;恢复力模型

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)02-0130-08

Restoring force model of new prefabricated shear walls

FAN Yujiang^{1,2}, GE Jun², AI Binping², DING Jiaxiong², LIAO Kai²

(1. School of Architecture, Chang'an University, Xi'an 710061, China;
2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: Based on the construction advantages of dry connection mode of precast shear wall with high-strength bolts, steel plates and other components, a new type of prefabricated shear wall with the function of friction energy dissipation was proposed. Three shear wall specimens with the scale ratio of 1.54 were designed, and the control parameters were the axial compression ratio and the longitudinal reinforcement ratio of edge components. The quasi-static tests were carried out and the results show that the final failure mode of the three specimens are similar, which is the bending-shear failure that diagonal cracks in the wall develop to the concrete spalling in the compression area. The reduction of axial compression ratio or longitudinal reinforcement ratio of edge components have adverse effects on the seismic performance of the new prefabricated shear wall, which is manifested in the weakening of hysteretic performance and the reduction of ultimate bearing capacity. Combined with the finite element analysis results, the five-fold skeleton model and restoring force model of the new prefabricated shear wall were established. The proposed restoring force model is in good agreement with the test results, which can provide reference for the elasto-plastic seismic response analysis of the new prefabricated shear wall.

Key words: prefabricated shear wall; horizontal connection; seismic performance; numerical simulation; restoring force model

近年来,湿式连接装配式剪力墙在实际工程中得到了广泛的应用,从设计层面到施工层面已基本形成了完善的体系^[1-2]。但由于现场湿作业的存在,湿式连接方法未能充分体现装配式建筑的优势^[3],基于此,干式连接装配式剪力墙成为现阶段诸多学者的研究方向。Sun 等^[4-5]提出一种采用型钢接头和高强螺栓组合的干式连接方法,并进行了拟静力试验,结果表明,连接组件传力可靠,能够确保剪力墙强度和延性的充分开展;Wrzesniak 等^[6]在胶合木剪力墙中研究了螺栓的加固效果,通过拟静力试验发现,螺栓加固剪力墙的延性及等效阻尼较未加固墙体均有明显的提升,验证了螺栓连接锚固预制混凝土墙体的可行性;EI 等^[7-8]提出一种采用螺纹钢锚杆连接的预制剪力墙,连接部位的钢锚栓能够作为结构延性熔断器,有效地减少地震作用下混凝土的损伤;赵斌等^[9]提出一种螺栓-钢连接件-套筒形式的剪力墙水平接缝方案,并开展拟静力试验,结果表明,套筒能够有效传递钢筋内力,水平接缝连接性能可靠;韦宏等^[10]研究了钢板焊接连接的带水平接缝预制剪力墙的抗震性能,结果表明,剪力墙表现出较好的滞回性、延性和耗能能力;方强等^[11]提出一种水平接缝

基金项目: 国家自然科学基金(51808046)

作者简介: 樊禹江(1987—),男,副教授,博士,主要从事新型装配式结构设计及抗震性能研究。E-mail:fanyujiangchd@163.com

引用本文: 樊禹江,葛俊,艾斌平,等. 新型装配式剪力墙恢复力模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):130-137.

FAN Yujiang,GE Jun,AI Binping,et al. Restoring force model of new prefabricated shear walls[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(2):130-137.

量梯度为 20 kN,位移往复循环 3 次。加载后期控制预紧力恒定为 250 kN,依次施加 30 mm、60 mm、70 mm 和 80 mm 的位移荷载,位移往复循环 1 次,末级位移荷载加至作动器水平荷载急剧下降时停止。

1.3 试验结果

1.3.1 破坏性态

图 4 为 3 个试件的最终破坏模式。从图 4 可以看出,试件的裂缝分布形态受到轴压比及边缘构件纵筋配筋率的影响。试件 SW-1 墙身中部交叉斜裂缝分布较广,对称程度较好,斜裂缝开展至约 2/3 墙高处;试件 SW-2 墙身斜裂缝开展角度相对平缓,墙体边缘裂缝走向基本呈水平趋势,且裂缝多分布于 1/2 墙高以下的部位,说明轴压比的降低对剪力墙抗剪性能有削弱作用;试件 SW-3 墙身交叉裂缝主要分布于墙体受压侧(水平作动器外推时),对称程度较差,同时墙角处混凝土受压剥落严重。结合各试件裂缝开展过程,3 个试件的破坏模式总体表现为斜裂缝萌发及深入开展,接着伴随墙角部位混凝土压溃脱落和边缘构件竖向纵筋屈服,表明 3 个试件均呈弯剪型破坏。

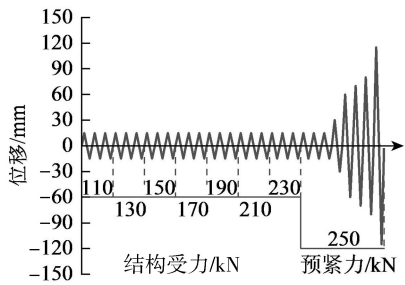


图 3 加载制度
Fig. 3 Curves of loading history

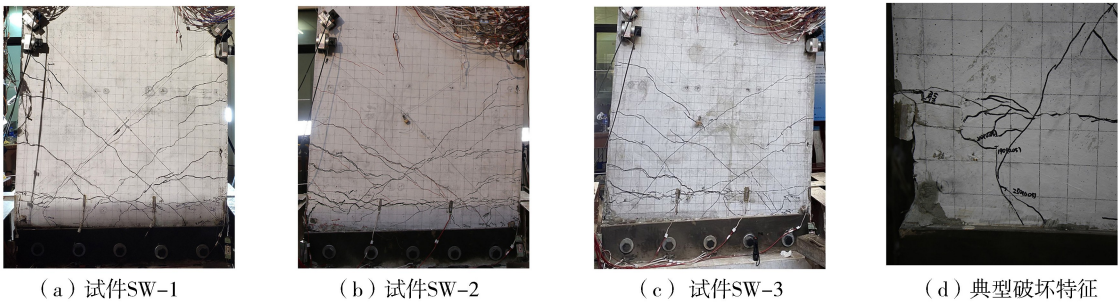


图 4 各试件破坏模式
Fig. 4 Failure modes of specimens

典型试件 SW-1 的墙体构造与文献[14]中普通现浇剪力墙试件 SJ-1 一致,对比其破坏过程发现,二者的承载性能接近且破坏模式相同,但试件 SW-1 的变形能力更好。试件 SW-1 底部的连接钢板和螺栓均未出现明显的损伤,仅钢垫片发生变形,其与 U 型钢接触部位有磨损痕迹,说明试件 SW-1 的水平连接性能可靠。尽管水平连接装置的相对转动在实现摩擦耗能的同时放大了试件 SW-1 的侧移,但试件所受重力荷载和竖向荷载的偏心作用对剪力墙承载性能和破坏性态的影响并不明显。

1.3.2 滞回曲线和骨架曲线

3 个试件的荷载-位移($P-\Delta$)曲线如图 5(a)(b)(c)所示,可以看出,各试件滞回曲线饱满,剪力墙所受水平荷载在 30 mm 的位移加载范围内无明显变化,当位移加载至 60 mm 时,水平荷载明显增大。总体来看,新型装配式剪力墙的滞回性能良好。相较试件 SW-1,试件 SW-2 和试件 SW-3 的曲线捏缩现象更为显著,说明较低的轴压比或边缘构件纵筋配筋率均会削弱新型装配式剪力墙的滞回性能。

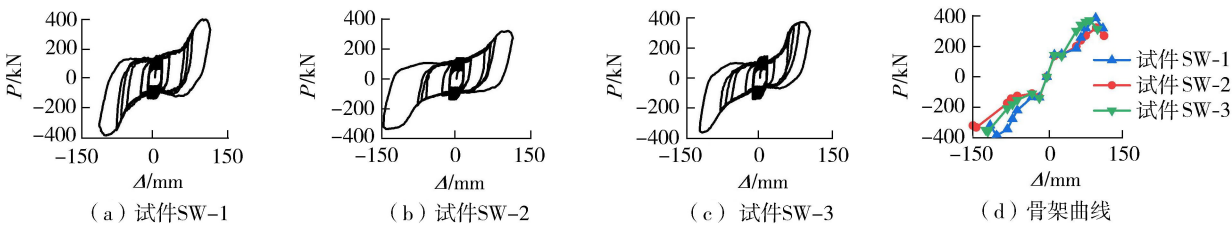


图 5 滞回曲线与骨架曲线
Fig. 5 Hysteretic curves and skeleton curves

图 5(d)为各试件骨架曲线对比,可以看出:

a. 3 个试件的骨架曲线发展规律一致,分为 4 个阶段:①弹性阶段;②墙体协同水平装置摩擦转动,曲线

近似水平;③墙体受力屈服进入弹塑性阶段;④墙体达到极限状态进入破坏阶段。

b. 3个试件的骨架曲线在阶段①和阶段②基本重合,说明墙体协同水平装置摩擦转动时,其所受水平荷载与轴压比和边缘构件纵筋配筋率无明显关系。

c. 相较于试件 SW-1,试件 SW-2 和试件 SW-3 的极限承载力分别降低了 15.01% 和 4.85%,说明轴压比或边缘构件纵筋配筋率的减小均会导致新型装配式剪力墙的极限承载力降低。

2 数值模拟及分析

2.1 模型建立与验证

采用 Abaqus 建立新型装配式剪力墙实体模型。除墙体内部钢筋采用 T3D2 单元外,其余实体部件均采用 C3D8R 单元。混凝土本构采用 GB50010—2010《混凝土结构设计规范》中建议的塑性损伤模型,材料属性参数则充分考虑混凝土在加载过程中弹性、塑性阶段和循环荷载的损伤累积,并参考材料性能试验结果进行设置,钢筋本构选择文献[15]建议的方法。为避免剪力墙底部连接部位产生滑移,采用绑定约束方式将上部剪力墙与下部箱型钢黏结为整体,并将 U 型钢底部按照完全固结处理。剪力墙水平连接部位的 2 个摩擦面(U 型钢和箱型钢、U 型钢和钢垫片)均定义为通用接触,摩擦系数取 0.17。考虑到水平加载初期,墙体协同水平装置表现为低速转动,将水平装置中心定义为铰以模拟转动效果。为保证加载时水平装置的预紧效果,施加预紧荷载前对水平装置 2 个接触面的贴合情况进行二次验证。

模拟得到试件 SW-1 的极限状态应力云图如图 6 所示。由图 6 可以发现,对于剪力墙而言,应力集中主要表现在剪力墙的受压侧和边缘构件受拉纵筋一侧,而水平装置的应力集中主要表现在装置中心两侧的螺孔周围,从模拟情况来看,模拟结果与试验现象基本吻合。

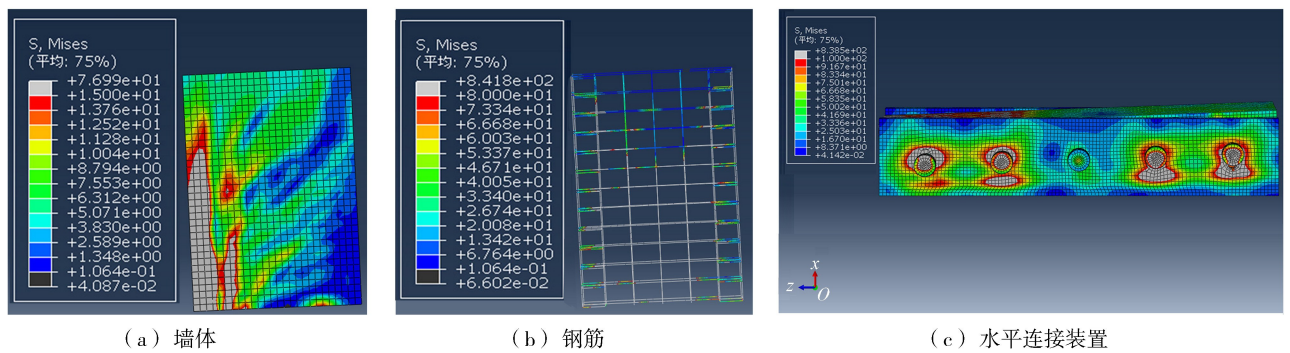


图 6 试件 SW-1 应力云图

Fig. 6 Stress cloud diagram of the specimen SW-1

3 片试件的试验结果与相应有限元分析结果对比见图 7。由图 7 可以看出,模拟所得 $P-\Delta$ 曲线变化规律与试验结果基本一致,与试验结果相比,曲线的水平滞回段表现更为明显。有限元分析的 $P-\Delta$ 曲线对称程度高,其正负向极限位移基本相等,而试验得到的各试件负向极限位移较正向极限位移明显增大。此外,在往复 15 mm 的加载初期,模拟结果较试验值偏差仅在 3% 以内,且各试件极限承载力偏差均在 10% 以内,表明所建模型计算精度良好,可以应用于新型装配式剪力墙的模拟分析之中。

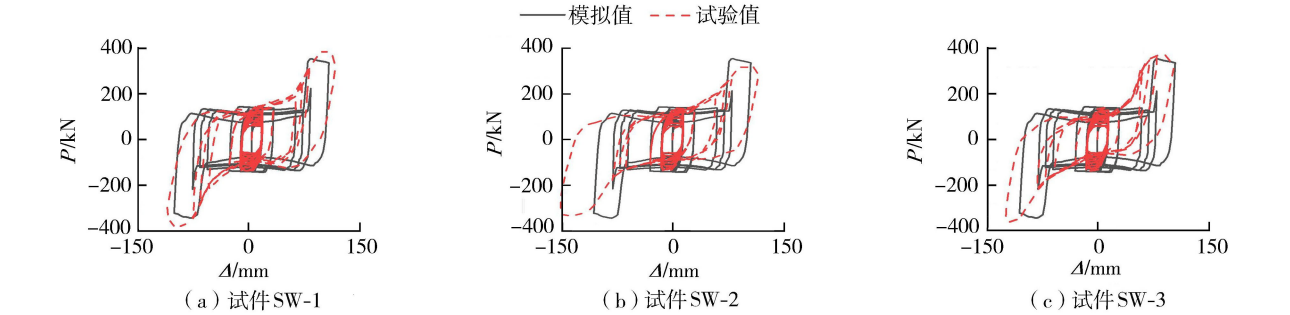


图 7 模拟结果与试验结果对比

Fig. 7 Comparison of numerical results and test results

2.2 参数分析

为探究轴压比和边缘构件纵筋配筋率对新型装配式剪力墙抗震性能影响的一般规律,依据新型装配式剪力墙实体模型建模方法并以控制单一变量为原则,建立了轴压比(u)为0.1、0.3和0.4,边缘构件纵筋配筋率 ρ_s 为0.98%、1.9%和2.5%共6组有限元模型。加载制度调整如下:控制螺栓预紧力为250 kN,以7.5 mm为位移增量施加0~30 mm位移荷载,每级往复循环1次。随后直接施加60 mm位移荷载,并以10 mm为增量至水平荷载明显下降,每级往复循环1次。

参数分析结果如图8所示。由图8可以发现,随着参数数值的增大,轴压比参数模型的极限承载力在模拟范围内提高了26.7%,边缘构件纵筋配筋率参数模型的极限承载力提高了32.6%,这与试验得到的一般影响规律一致。

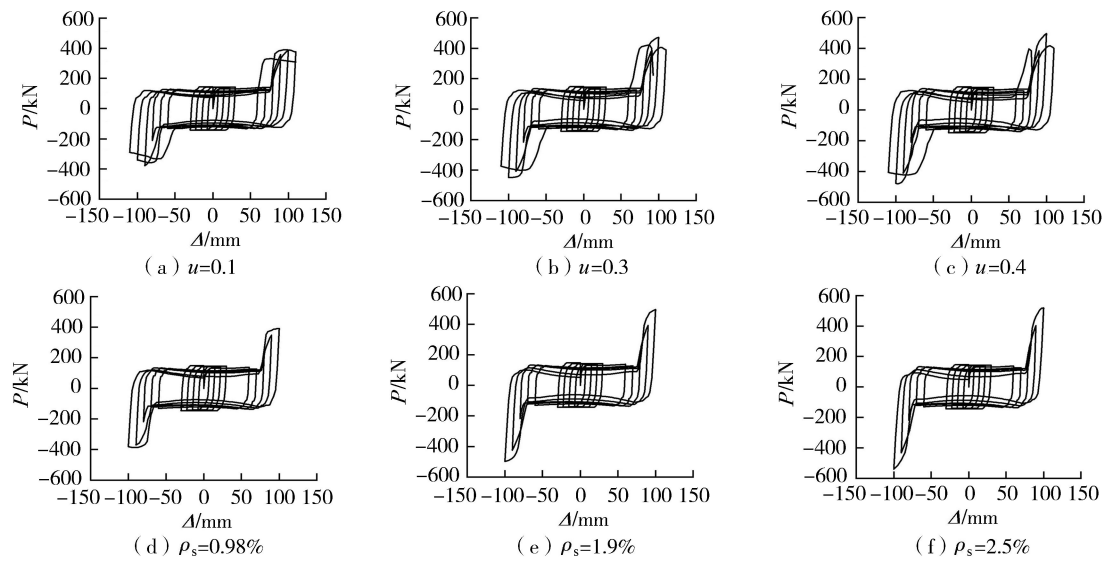


图8 参数模拟分析
Fig.8 Parameter simulation and analysis

3 恢复力模型

3.1 骨架曲线模型

由于试验时工况等因素的限制,未进行水平位移为0~15 mm的新型装配式剪力墙变位移加载试验,而有限元模拟结果较为理想,因此在建立新型装配式剪力墙无量纲化骨架曲线模型时,水平位移未达15 mm的数据点均采用Abaqus模拟结果进行补充。以试件的峰值点作为基准点进行骨架曲线的无量纲化,得到3个试件的无量纲化骨架曲线,见图9(a)。可以看出,3个试件的无量纲化骨架曲线呈现的变化趋势大致相同。由于新型装配式剪力墙循环加载过程中,上部墙体及箱型钢在达到一定的水平荷载后会发生转动滑移,所以

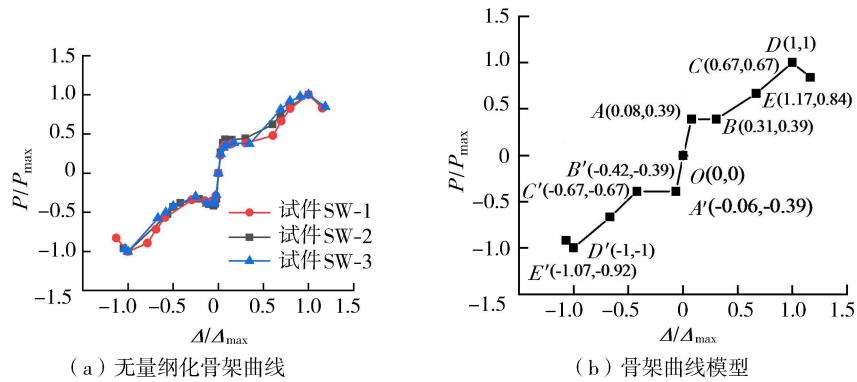


图9 无量纲化骨架曲线及模型
Fig.9 Skeleton curves after dimensionless

其骨架曲线存在 5 个变化阶段。依据试验及模拟结果建立五折线骨架模型,具体分为剪力墙起滑前的上升段,起滑后的平台段,达到水平装置螺孔限位后的弹性段,弹塑性段及下降段。简化的五折线骨架模型见图 9(b),点 A~E(A'~E') 依次对应骨架曲线的起滑点、平台点、屈服点、峰值点和极限点。

根据图 9(b) 中提供的特征点坐标求解各阶段曲线的斜率,即为无量纲化刚度值,通过线性方程的求解得到适用于本文新型装配式剪力墙的五折线骨架模型,如表 1 所示。

3.2 刚度退化规律

确定新型装配式剪力墙的恢复力模型除简化无量纲化骨架曲线外,还应明确其滞回循环规则。分析试验滞回曲线和刚度变化曲线发现,在整个拟静力循环加载的过程中,特别是超过结构的屈服荷载后,加载刚度与卸载刚度均有明显退化。基于试验结果分别对进入弹塑性阶段后的新型装配式剪力墙在相同循环位移下的加卸载刚度变化规律进行研究(图 10),采用割线刚度^[16]代替加卸载刚度值。

3.2.1 正向卸载刚度 K_1 退化规律

循环加载过程中,连接屈服点之后正向开始卸载点及卸至零载时对应点得到线段 12,以该线段的割线刚度作为 K_1 ,经回归分析得到无量纲化 K_1/K_0^+ 与 Δ_1/Δ_u^+ 的拟合曲线,见图 11(a)。 K_1 的退化曲线方程为

$$K_1/K_0^+ = 0.299 (\Delta_1/\Delta_u^+)^{-1.034} \tag{1}$$

式中: K_0^+ 为正向加载初始刚度; Δ_1 为正向卸载位移; Δ_u^+ 为正向加载时的极限位移。

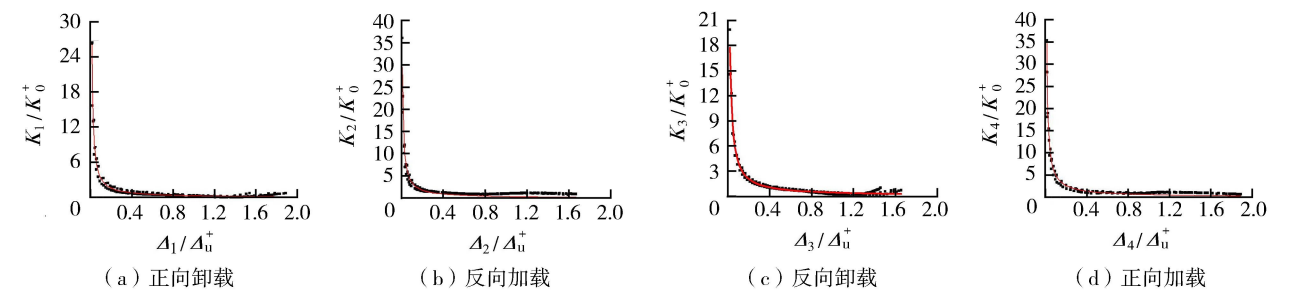


图 10 刚度退化规律
Fig. 10 Stiffness degradation law

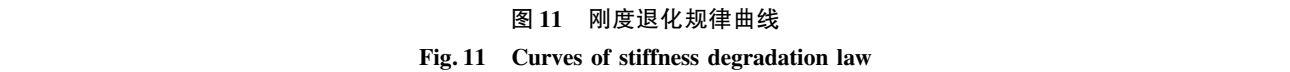


图 11 刚度退化规律曲线
Fig. 11 Curves of stiffness degradation law

3.2.2 反向加载刚度 K_2 退化规律

继续加载,连接正向残余卸载点及反向加载最大点得到线段 23,以该线段的割线刚度作为 K_2 。经回归分析得到无量纲化 K_2/K_0^- 与 Δ_2/Δ_u^- 的拟合曲线,见图 11(b)。 K_2 的退化曲线方程为

$$K_2/K_0^- = 0.378 (\Delta_2/\Delta_u^-)^{-0.969} \tag{2}$$

式中: K_0^- 为反向加载初始刚度; Δ_2 为反向加载位移; Δ_u^- 为反向加载时的极限位移。

3.2.3 反向卸载刚度 K_3 退化规律

循环加载过程中,连接反向开始卸载点及卸载至零时对应点得到线段 34,以该线段的割线刚度作为 K_3 ,经回归分析得到无量纲化 K_3/K_0^- 与 Δ_3/Δ_u^- 的拟合曲线,见图 11(c)。 K_3 的退化曲线方程为

$$K_3/K_0^- = 0.417 (\Delta_3/\Delta_u^-)^{-0.993} \tag{3}$$

式中 Δ_3 为反向卸载位移。

3.2.4 正向加载刚度 K_4 退化规律

继续加载,连接反向残余卸载点及正向加载最大点得到线段 41,以该线段的割线刚度作为 K_4 ,经回归分析得到无量纲化 K_4/K_0^+ 与 Δ_4/Δ_u^+ 的拟合曲线,见图 12(d)。 K_4 的退化曲线方程为

$$K_4/K_0^+ = 0.678 (\Delta_4/\Delta_u^+)^{-0.886}$$

(4)

式中 Δ_4 为正向加载的位移。

3.3 滞回规则

基于试验所得滞回曲线,结合无量纲五折线骨架曲线及循环加载过程中刚度退化规律,提出新型装配式剪力墙的滞回规则,见图 12。

- a. 实际工程中,在新型装配式剪力墙进入屈服阶段前,认为试件加卸载刚度不存在退化。
- b. 循环加载直至水平荷载超过屈服荷载后,正向卸载刚度退化规律由式(1)确定,此时由于墙体产生塑性变形,卸载至零时墙体产生残余应变。
- c. 正向卸载至水平荷载为零后开始反向加载,以正向卸载残余应变点 2 为起始点,循环加载至最大位移点 3 为反向卸载起始点,反向加载刚度退化由式(2)确定。
- d. 反向卸载起始点 3 由五折线骨架模型确定,根据式(3)确定反向卸载刚度,并与 x 轴交于点 4,线段 34 即为反向卸载路径。
- e. 图 12 中反向卸载线与 x 轴的交点 4 即为墙体反向卸载后存在的残余位移点,由式(4)确定正向加载刚度退化规律,点 1 与点 4 的连线即为正向加载路径。

3.4 恢复力模型验证

对 3 个试件的试验五折线骨架曲线进行无量纲化,并与提出的恢复力模型骨架曲线进行对比验证,如图 13 所示。对比结果表明,本文的恢复力模型五折线骨架曲线较准确地描述了新型装配式剪力墙在循环加载下的受力行为,与试验结果吻合程度较高,可以较好地反映新型装配式剪力墙的抗震滞回性能。

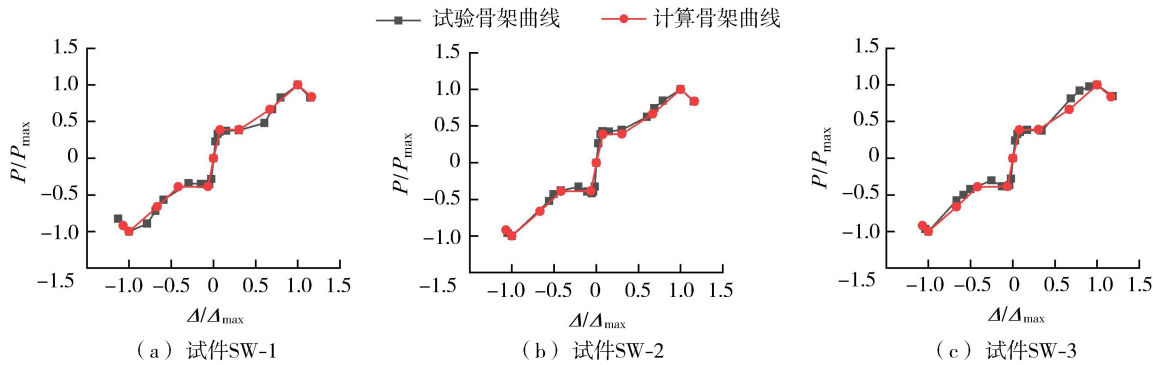


图 13 计算骨架曲线与试验骨架曲线对比

Fig. 13 Comparison of computed skeleton curves and test skeleton curves

4 结 论

- a. 对 3 个试件进行了拟静力加载试验,发现新型装配式剪力墙的最终破坏模式均为弯剪型破坏,但墙身裂缝分布形态受到轴压比和边缘构件纵筋配筋率的影响。随着轴压比或边缘构件纵筋配筋率的降低,新型装配式剪力墙滞回性能减弱,同时极限承载力均有一定程度的降低。
- b. 采用 Abaqus 软件建立了相应的数值模型,与试验结果相比,模拟荷载-位移曲线吻合程度良好,在往复 15 mm 加载范围误差在 3% 以内。
- c. 针对新型装配式剪力墙建立了五折线骨架模型,经回归拟合得到了滞回曲线卸载刚度和加载刚度的计算公式,并明确了相应的滞回规则。
- d. 建立的恢复力模型较好地反映了所提新型装配式剪力墙的抗震性能,为该类结构弹塑性地震反应分析提供了理论依据。

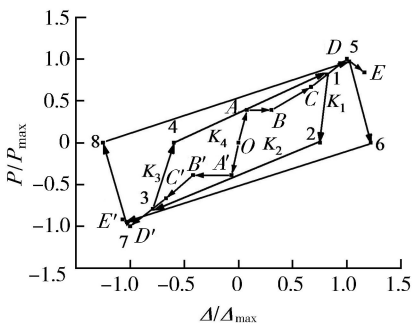


图 12 恢复力模型

Fig. 12 Schematic of restoring force model

参考文献:

- [1] 李希杰. 建筑工程项目管理中的施工管理与优化策略研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(6):591-592. (LI Xijie. Research on construction management and optimization strategy in construction project management[J]. Journal of Hohai University (Natural Science),2021,49(6):591-592. (in Chinese))
- [2] 金睿,丁宏亮,沈西华,等. 基于遗传-剩余矩形算法的装配式预制构件堆场优化[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):182-189. (JIN Rui,DING Hongliang,SHEN Xihua,et al. Packing optimization of precast concrete components for prefabricated construction based on genetic-surplus rectangle algorithm[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(2):182-189. (in Chinese))
- [3] 朱张峰,郭正兴,朱寅,等. 不同连接构造的装配式混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2017,44(3):55-60. (ZHU Zhangfeng,GUO Zhengxing,ZHU Yin,et al. Experimental investigation on seismic performance of precast concrete shear walls with different connections[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2017,44(3):55-60. (in Chinese))
- [4] SUN Jian, QIU Hongxing, LYU Yong. Experimental study and associated numerical simulation of horizontally connected precast shear wall assembly[J]. Structural Design of Tall and Special Buildings,2016,25(13):659-678.
- [5] SUN Jian, QIU Hongxing, JIANG Hongbo. Experimental study and associated mechanism analysis of horizontal bolted connections involved in a precast concrete shear wall system[J]. Structural Concrete,2019,20(1):282-295.
- [6] WRZESNIAK D, FRAGIACOMO M. Cyclic behaviour of glulam shear walls with bolted connections[J]. European Journal of Wood and Wood Products,2016,74(3):393-405.
- [7] EI SEMELAWY M, EL DAMATTY A, SOLIMAN A M. Novel anchor-jointed precast shear wall: testing and validation[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings,2015,168(4):263-274.
- [8] EI SEMELAWY M, EL DAMATTY A, SOLIMAN A M. Finite-element analysis of anchor-jointed precast structural wall system [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings,2017,170(8):543-554.
- [9] 赵斌,王庆杨,吕西林. 采用全装配水平接缝的预制混凝土剪力墙抗震性能研究[J]. 建筑结构学报,2018,39(12):48-55. (ZHAO Bin,WANG Qingyang,LYU Xilin. Research on seismic behavior of precast concrete walls with fully assembled horizontal joints[J]. Journal of Building Structures,2018,39(12):48-55. (in Chinese))
- [10] 韦宏,李琼宁. 钢板焊接连接的带水平接缝装配式 RC 剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2020,41(9):77-87. (WEI Hong,LI Qiongnig. Experimental study on seismic behavior of prefabricated RC shear walls with horizontal joints welded by steel plates[J]. Journal of Building Structures,2020,41(9):77-87. (in Chinese))
- [11] 方强,邱洪兴,孙建,等. 有限滑动螺栓连接装配式混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版),2021,51(4):559-565. (FANG Qiang, QIU Hongxing, SUN Jian, et al. Experimental study on seismic performance of precast concrete shear walls with limited slip bolted connectors[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition),2021,51(4):559-565. (in Chinese))
- [12] 黄炜,苗欣蔚,赵媛媛,等. 不同竖向接缝干式连接的全装配式复合墙体抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2020,41(增刊2):114-122. (HUANG Wei, MIAO Xinwei, ZHAO Yuanyuan, et al. Experimental study on seismic performance of fully assembled composite walls with vertical joints using different dry connections[J]. Journal of Building Structures,2020,41(Sup2):114-122. (in Chinese))
- [13] 樊禹江,黄欢欢,廖凯,等. 新型装配式剪力墙抗震性能数值模拟与起滑荷载分析[J/OL]. 湖南大学学报(自然科学版):1-10[2022-06-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1061.N.20220504.1247.002.html>. (FAN Yujiang, HUANG Huanhuan, LIAO Kai, et al. Numerical simulation on seismic performance and slip load analysis of new prefabricated shear walls [J/OL]. Journal of Hunan University(Natural Sciences):1-10[2022-06-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1061.N.20220504.1247.002.html>. (in Chinese))
- [14] 严涛. 不同连接方式对装配式剪力墙抗震性能的影响[D]. 长沙:湖南大学,2017.
- [15] 方自虎,甄翌,李向鹏. 钢筋混凝土结构的钢筋滞回模型[J]. 武汉大学学报(工学版),2018,51(7):613-619. (FANG Zihu,ZHEN Yi,LI Xiangpeng. Steel hysteretic model of reinforced concrete structures[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2018,51(7):613-619. (in Chinese))
- [16] 钟铭. 钢筋混凝土柱低周疲劳全过程累积损伤性能简化分析方法[J]. 土木工程学报,2016,49(8):84-91. (ZHONG Ming. Simplified method for analysis of damage characteristic of RC columns under and after low cyclic loading[J]. China Civil Engineering Journal,2016,49(8):84-91. (in Chinese))