

钢框架-冷弯薄壁型钢 组合墙体结构抗震性能有限元分析

张铮,郭贺贺,林韩,陈笃海

(福建工程学院 土木工程学院,福建 福州 350118)

摘要:利用有限元软件 ABAQUS 对纯钢框架试件、冷弯薄壁型钢组合墙体试件、钢框架-冷弯薄壁型钢组合墙体试件、覆双面 OSB 板的钢框架-冷弯薄壁型钢组合墙体试件进行水平低周往复荷载作用下研究,分析了试件的滞回曲线、骨架曲线、抗侧刚度、延性和耗能等。结果表明,钢框架与冷弯薄壁型钢组合墙体有明显的组合效应;冷弯薄壁型钢组合墙体能明显增强钢框架结构的承载力、刚度、延性和耗能能力;覆双面 OSB 板钢框架-冷弯薄壁型钢组合墙体结构抗震性能较不覆板的钢框架-冷弯薄壁型钢组合墙体结构抗震性能好。

关键词:钢框架;冷弯薄壁型钢;墙体结构;有限元分析;协同作用;抗震性能

中图分类号:TU398.2

文献标志码:A

文章编号:1672-4348(2023)01-0029-06

Finite element analysis of seismic performance of steel frame-cold-formed thin-walled steel composite wall structure

ZHANG Zheng, GUO Hehe, LIN Han, CHEN Duhai

(School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: The finite element software ABAQUS was used to study pure steel frame specimens, cold-formed thin-walled steel composite wall specimens, steel frame-cold-formed thin-walled steel composite wall specimens, steel frame-cold-formed thin-walled steel composite wall specimens covered with double-sided OSB plates under horizontal low cyclic loading. The hysteretic curve, skeleton curve, lateral stiffness, ductility and energy dissipation of the specimen were analyzed. Results show that steel frame and cold-formed thin-walled steel composite wall have obvious combination effect, cold-formed thin-walled steel composite wall can obviously enhance the bearing capacity, stiffness, ductility and energy dissipation capacity of steel frame structure, and the seismic performance of steel frame-cold-formed thin-walled steel composite wall structure with double-sided OSB plates is better than that of steel frame-cold-formed thin-walled steel composite wall structure without plate.

Keywords: steel frame; cold-formed thin-walled steel; wall structure; finite element analysis; synergistic effect; seismic performance

住宅建设工业化发展是各国共同追求的目标,同时也是我国现代化、工业化的组成部分^[1]。传统的钢筋混凝土建筑结构,具有成本高、建造周期长、污染环境等一系列缺点,不符合我国建筑工业化和可持续发展的战略要求。随着冷弯薄壁型钢结构体系的发展,该结构体系与传统结构体系

相比不仅具有自重轻、建造速度快、抗震性能好等优点,而且绿色节能环保更加符合中国国情^[2]。

目前,国内外学者对冷弯薄壁型钢组合墙体研究较多,Kechidi^[3]采用 OpenSees 有限元软件对多层冷弯薄壁型钢墙体结构进行模拟,建立了结构的易损性曲线。胡健翔^[4]和夏祥^[5]研究了竖

向荷载和设置斜撑对冷弯薄壁型钢组合墙体抗震性能的影响,发现一定的竖向荷载可以提高墙体的抗剪承载力,竖向斜撑可以改善墙体受力性能。江忠画^[6]对覆竹木碳纤维板的冷弯薄壁型钢墙体研究发现,覆板能有效提高结构的抗震性能。但是,对钢框架内嵌冷弯薄壁型钢墙体结构方面的研究较少,钢框架与冷弯薄壁型钢墙体之间的协同工作效应尚不清晰。

本研究通过有限元分析软件 ABAQUS 建立钢框架-冷弯薄壁型钢组合墙体等结构的有限元分析模型,进行水平低周往复荷载模拟,为该类结构在实际工程中应用提供科学依据。

1 有限元分析

1.1 模型设计

利用有限元软件 ABAQUS 建立纯钢框架结构

SF-1、冷弯薄壁型钢组合墙体结构 SF-2、钢框架-冷弯薄壁型钢组合墙体结构 SF-3、覆双面 OSB 板钢框架-冷弯薄壁型钢组合墙体结构 SF-4 典型模型。钢框架模型尺寸 3 060 mm×4 060 mm,框架柱规格 HW200 mm×200 mm×8 mm×12 mm;框架梁规格 HM300 mm×200 mm×8 mm×12 mm,框架梁柱节点采用栓焊混合连接。冷弯薄壁型钢组合墙体模型尺寸为 2 760 mm×3 660 mm,龙骨立柱间距 610 mm,冷弯薄壁型钢厚度 1.2 mm,覆面板采用 9 mm 厚的 OSB 板,冷弯薄壁型钢和框架的钢材强度等级为 Q235B,钢框架与龙骨及墙面板与龙骨之间均采用 ST5.5 级自攻螺钉连接。模型设计如图 1 所示。

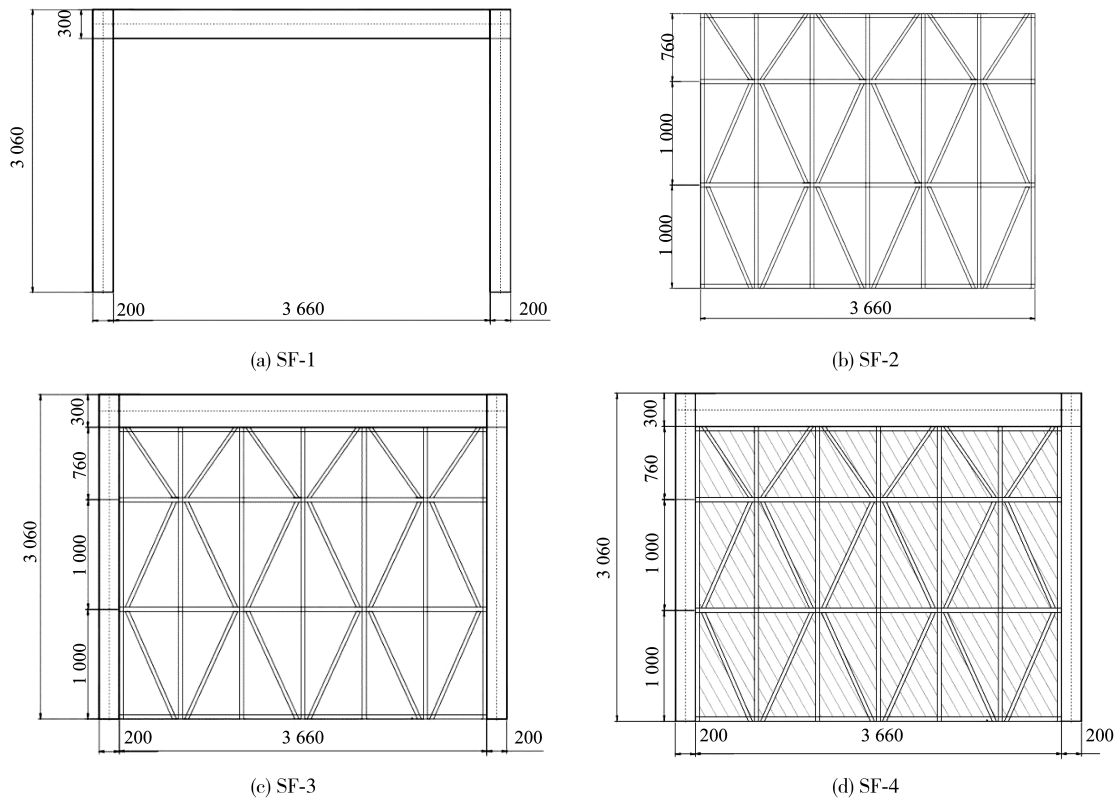


图 1 模型示意图(单位:mm)

Fig.1 Schematic diagram of the model (unit: mm)

1.2 模型建立

钢框架梁柱采用三维实体单元 C3D8R 模拟,梁柱节点假定固接,绑定约束 Tie 连接。冷弯薄壁型钢采用壳单元 S4R 模拟,冷弯薄壁型钢各杆件之间 Coupling 约束连接,忽略自攻螺钉的剪切

滑移,即只约束连接点的平动自由度,放开转动自由度。试验过程中墙体与钢框架应始终保持紧密连接,故冷弯薄壁型钢墙体与钢框架梁柱之间采用 Tie 连接。经试算,钢框架和 OSB 板网格密度为 50 mm×50 mm,冷弯薄壁型钢网格密度为

20 mm ×20 mm。试件的边界条件假定为固接,钢框架柱脚和冷弯薄壁型钢墙体下导轨采用 Tie 连接。加载时,约束框架梁或加载梁腹板面外位移以模拟侧向支撑。

1.3 材料属性

(1)钢材本构。冷弯薄壁型钢的本构关系采用文献[7]的钢材应力应变关系,钢框架按两折线弹塑性材料本构关系进行分析,屈服强度取 235 MPa,弹性模量 E 取 2.06×10^5 MPa,泊松比为 0.3。

(2)OSB 板本构。OSB 板简化成各向同性材料,各项数据采用文献[7]试验所得,弹性模量取 4 166 MPa,抗拉强度取 13.56 MPa,泊松比取 0.3。

1.4 加载方案

加载时,设置两个分析步,第一个分析步在框架梁或加载梁上施加竖向荷载,第二个分析步在保持竖向荷载不变的情况下施加水平荷载。加载制度以 2 mm 为位移增量加载至荷载-位移曲线开始出现非线性段,取此时加载位移为 δ ,分别以 1δ 、 2δ 、 4δ 、 8δ 、 12δ 、 16δ 为位移增量进行加载,直至试件破坏。具体加载制度如图 2 所示。

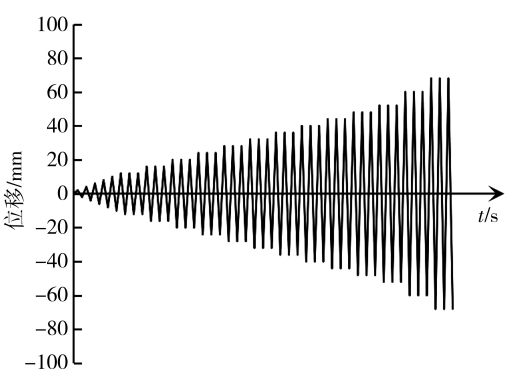


图 2 加载制度
Fig.2 Loading system

1.5 有限元分析模型的验证

将有限元计算结果与文献[7]试验结果进行对比,荷载-位移曲线对比如图 3 所示。

由图 3 可知,加载前期,试件处于弹性阶段,有限元计算结果与试验结果较为吻合;加载中期,试件进入弹塑性阶段,试验的滞回曲线出现捏缩,开始由梭形向反“S”形转变,而有限元计算的滞回曲线还较为饱满;加载后期,试件进入塑性阶段,试验滞回曲线产生较大的捏缩滑移,有限元滞回曲线只产生较小的捏缩变形。有限元计算结果

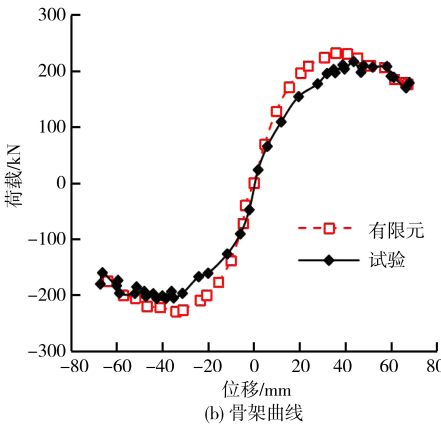
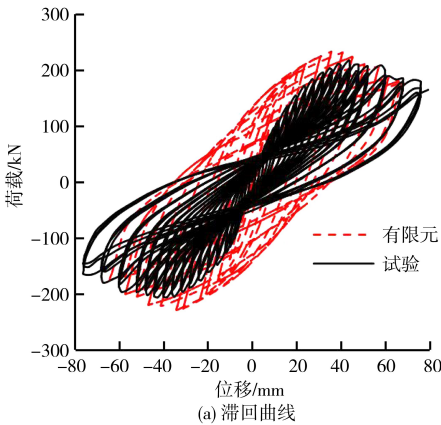


图 3 试件荷载-位移曲线对比

Fig.3 Comparison of load-displacement curves of specimens

与试验结果产生误差的原因主要有,材料材性与真实材性的差异性、各构件之间连接的简化、有限元模型的理想性等。综上,有限元计算结果与试验结果整体较为吻合,表明有限元建模和计算的正确性,在此基础上对该类结构进行详细分析。

2 有限元模拟结果及分析

2.1 荷载-位移曲线

滞回曲线是指循环荷载作用下结构抗力与变

形之间的关系曲线,可以反映结构在循环荷载下的刚度、延性、耗能能力等力学性能。各计算模型的滞回曲线和骨架曲线如图 4、图 5 所示,由骨架曲线计算试件荷载-位移特征值如表 1 所示。

由图 4 和表 1 可知,加载前期,试件处于弹性阶段,滞回曲线呈线性变化;加载中期,试件滞回环愈发饱满,承载力持续提高,刚度缓慢下降;加载后期,试件仍具有较高的承载力和耗能。试件 SF-1 展现了纯钢框架结构良好的耗能和延性;试

件 SF-2 作为单纯的冷弯薄壁型钢组合墙体其承载力、刚度和耗能等抗震性能均较弱;试件 SF-3 表明钢框架和冷弯薄壁型钢组合墙体能够有效地协同工作,基本满足“1+1=2”的效果;试件 SF-4 与试件 SF-3 相比仅为组合墙体覆板,但结构的

承载力、抗剪强度提高了近 2 倍,抗侧刚度提高了近 3 倍,具有“1+1>2”的效果,可见钢框架内嵌的冷弯薄壁型钢组合墙体覆板与否对结构的抗震性能有较大的影响。

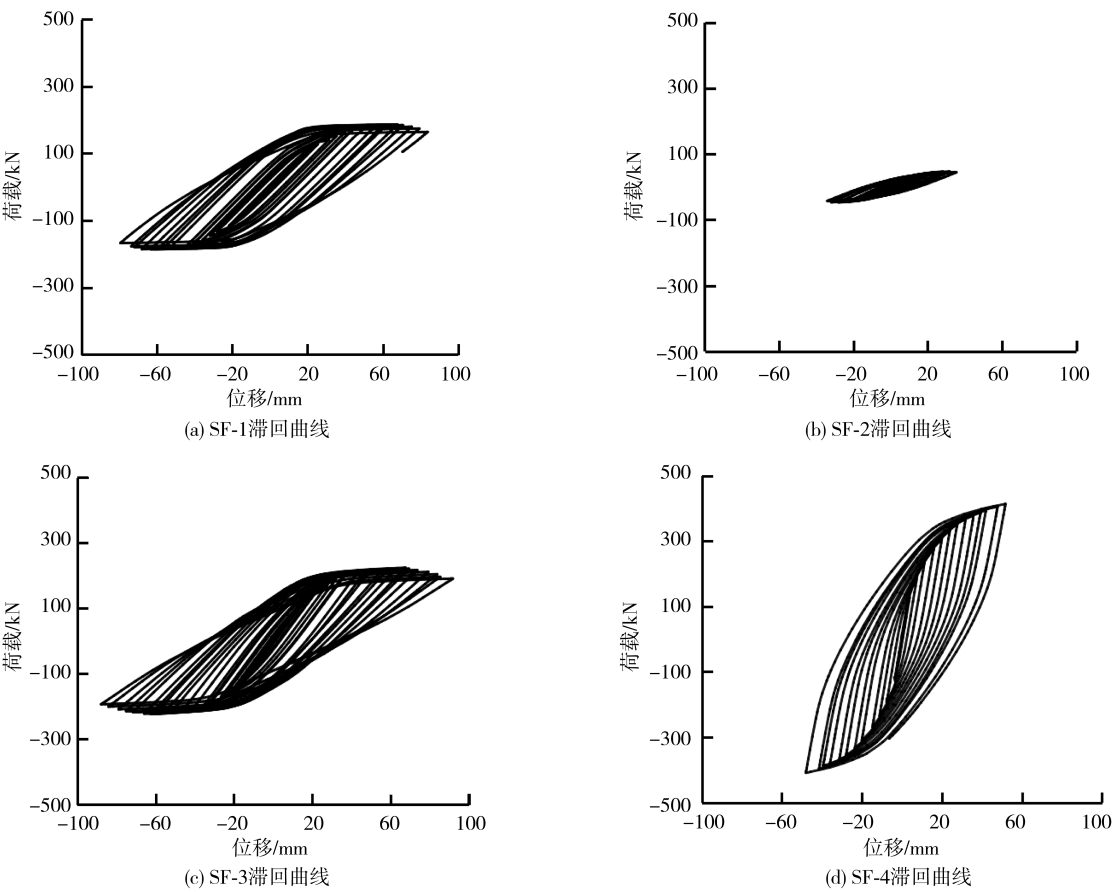


图 4 各试件的滞回曲线
Fig.4 Hysteretic curve of each specimen

表 1 荷载-位移特征值
Tab.1 Load-displacement eigenvalue

试件 编号	屈服点		峰值点		破坏点		延性系数 μ	抗剪强度 $P_s/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	抗侧刚度 $K_e/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)
	Δ_y/mm	P_y/kN	$\Delta_{\max}/\text{mm}$	$P_{\max}/\text{kN}$	Δ_u/mm	P_u/kN			
SF-1	21.42	115.64	67.79	186.29	83.82	163.74	3.91	45.88	5 481.65
SF-2	22.61	43.36	31.57	46.55	35.34	44.41	1.56	12.72	2 704.05
SF-3	22.15	150.05	67.69	224.12	91.83	190.77	4.15	55.20	7 107.26
SF-4	12.64	235.17	51.80	413.73	51.80	413.73	4.10	101.90	20 719.82

2.2 延性系数

结构位移延性系数计算公式为:

$$\mu = \Delta_u / \Delta_y$$

(1)

式中, Δ_u 为极限位移,mm; Δ_y 为屈服位移,mm。
参考《建筑抗震试验方法规程》(JGJ/T 101-2015)采用等效能量面积法^[8],确定试件的屈服点

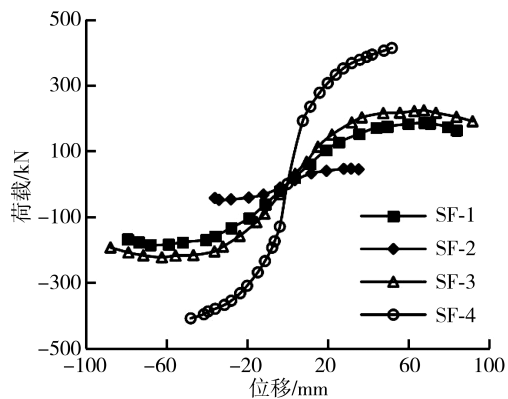


图 5 各试件的骨架曲线

Fig.5 Skeleton curve of each specimen

和极限点,如图 6 所示, B 为峰值点,作 0.85 倍峰值荷载的平行线与骨架曲线相交于点 D , D 点的横坐标为 Δ_u ,过点 B 作水平线 BC ,过原点 O 作割线 OC 与骨架曲线相交于点 A ,使得面积 $S_{OEA} = S_{ACB}$,则 C 点的横坐标为 Δ_y ,试件的延性系数见表 1。

由表 1 可知,单纯的冷弯薄壁型钢组合墙体延性性能较差,与钢框架结合能有效提高结构延性,试件 SF-3 的延性系数较试件 SF-1 和 SF-2 分别提高了 30% 和 166%,而冷弯薄壁型钢墙体覆板对结构延性的提高影响不大。

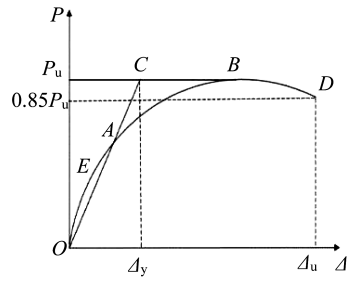


图 6 骨架曲线特征值

Fig.6 Eigenvalues of skeleton curves

2.3 刚度退化

采用滞回曲线峰值点的割线刚度反映试件在低周往复加载过程中的刚度退化,按照《建筑抗震试验方法规程》(JGJ/T 101-2015)^[8] 计算试件割线刚度 K_i 与位移的关系曲线如图 7 所示,试件的抗侧刚度采用 1/300 结构高度所对应的骨架曲线切线刚度,计算结果见表 1。

由表 1 可知,试件 SF-3 的抗侧刚度约是试件 SF-1 和 SF-2 之和,试件 SF-4 的抗侧刚度约是试件 SF-3 的 3 倍,可见墙体覆板能较大提高结构抗侧刚度。由图 7 可知,试件 SF-1、SF-2、SF-3 的抗侧刚度下降较为缓慢,试件 SF-4 的抗侧刚度前期下降较快,后期逐渐趋于平缓,可见覆板对结构前

期刚度提升较大,整体刚度大于其它试件。

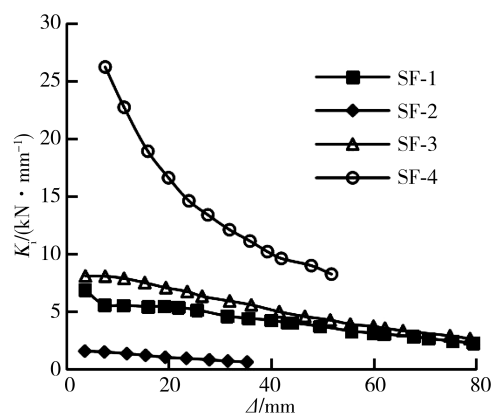


图 7 各试件的刚度退化曲线

Fig.7 Stiffness degradation curve of each specimen

2.4 耗能能力

滞回曲线所包围的面积反映了结构的耗能能力,通常采用等效黏滞阻尼系数 ξ_{eq} 来评价。等效黏滞阻尼系数越大,说明结构地震时吸收的能量越多,试件的耗能能力越强。如图 8 所示, ξ_{eq} 的表达式如下:

$$\xi_{eq} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{S_{ABC} + S_{CDA}}{S_{OBE} + S_{ODF}} \quad (2)$$

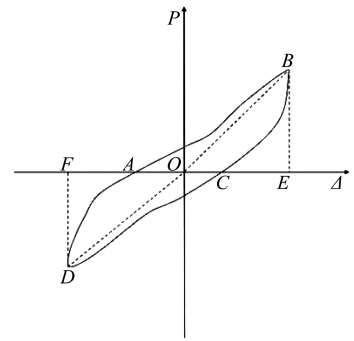


图 8 等效黏滞阻尼系数计算图

Fig.8 Calculation diagram of equivalent viscous damping coefficient

试件耗能能力和等效黏滞阻尼系数如图 9、图 10 所示。加载前期,试件 SF-1、SF-2、SF-3 各级滞回环的耗能差别较小,试件 SF-4 的耗能明显大于其它试件;试件 SF-3 的耗能约等于试件 SF-1 和 SF-2 之和,试件 SF-4 的耗能能力较 SF-3 有较大提高;加载后期,试件的耗能能力逐渐下降,趋于平缓。由图 10 可知,各试件模型的等效黏滞阻尼系数随着位移的增大而增大,加载前期,试件 SF-4 的耗能能力明显强于其它 3 个试件,加载后期,试件 SF-4 的耗能能力更强,主要因为覆面板的存在使轻钢墙体的耗能更加充

分,使墙体与钢框架从始至终都具有较好的协同工作作用。

3 结论

1)通过建立钢框架-覆板冷弯薄壁型钢组合墙体的精细化模型,与试验结果进行了对比分析,验证了有限元模型的可靠性和准确性。分析得到冷弯薄壁型钢组合墙体与钢框架紧密连接具有良好的变形能力和抗震性能,在地震作用下有很好的整体性能和协同受力性能。

2)钢框架内嵌冷弯薄壁型钢组合墙体与纯钢框架结构相比,承载能力提升 20%,抗侧刚度提升了 30%,结构的延性和耗能能力均有较大提升。

3)钢框架-覆 OSB 板冷弯薄壁型钢组合墙体试件 SF-4 的承载能力和抗侧刚度较未覆板试件 SF-3 分别提高了 85% 和 192%,结构抗震性能优良。

4)对于钢框架内嵌冷弯薄壁型钢墙体结构,墙体覆板可显著提高钢框架与墙体之间的耦合作用,使钢框架和冷弯薄壁型钢组合墙体能够最大限度耗能,结构耗能能力较未覆板结构提高 40%,结构延性系数达 4.1,满足结构抗震要求。

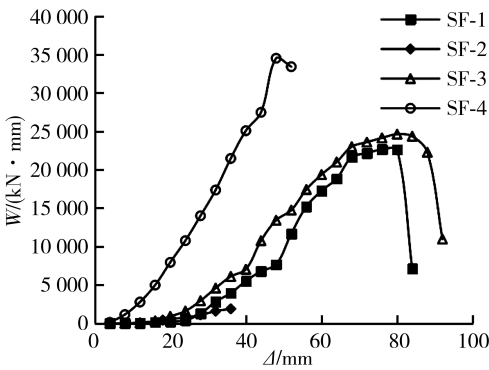


图 9 各试件滞回环耗能

Fig.9 Energy dissipation of hysteresis loop of each specimen

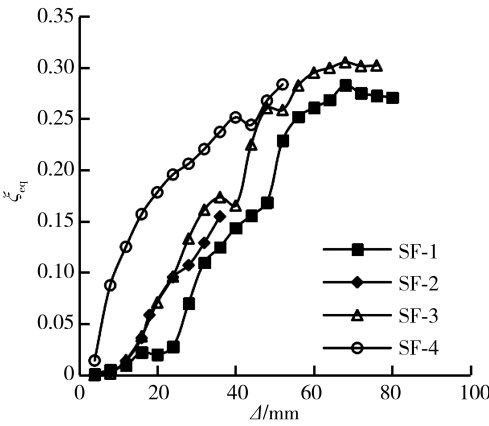


图 10 各试件的等效黏滞阻尼系数

Fig.10 Equivalent viscous damping coefficient of each specimen

参考文献:

[1] 王明贵. 中国的住宅产业化与钢结构住宅:《轻型钢结构住宅技术规程》JGJ209—2010 介绍[C]//影响中国-第二届中国钢结构产业高峰论坛论文集,2010:60-65.

[2] 周绪红. 冷弯型钢结构研究进展(英文)[J]. 钢结构(中英文),2020(1):1-19.

[3] KECHIDI S,BOURAHLA N,CASTRO J M. Seismic design procedure for cold-formed steel sheathed shear wall frames:proposal and evaluation[J]. Journal of Constructional Steel Research,2017,128:219-232.

[4] 胡健翔. 加斜撑冷弯薄壁型钢组合墙体抗震性能研究[D]. 重庆:重庆大学,2018.

[5] 夏祥. 竖向荷载作用下加斜撑冷弯薄壁型钢组合墙体抗震性能研究[D]. 重庆:重庆大学,2018.

[6] 江忠画,张铮,陈笃海,等. 覆竹木碳纤维板冷弯薄壁型钢墙体抗震性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2021,53(4):552-560.

[7] 陈笃海. 钢框架-冷弯薄壁型钢剪力墙结构滞回性能研究[D]. 福州:福建工程学院,2022.

[8] 中华人民共和国建设部. 建筑抗震试验方法规程:JGJ 101—1996[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.

(责任编辑:陈雯)