

引用本文:郑 宏,徐笑东,王 玮,等.装配式交叉密肋钢板剪力墙参数影响分析[J].建筑科学与工程学报,2020,37(4):52-59.

ZHENG Hong, XU Xiao-dong, WANG Wei, et al. Analysis on Influence Factors of Assembled Cross-ribbed Steel Plate Shear Wall[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(4): 52-59.

DOI:10.19815/j.jace.2019.07057

装配式交叉密肋钢板剪力墙参数影响分析

郑 宏,徐笑东,王 玮,张 敏

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘要:提出装配式交叉密肋钢板剪力墙结构,利用有限元分析方法建立纵横密肋钢板剪力墙试验有限元模型,验证建模方法的有效性及其可靠性;建立交叉密肋钢板剪力墙有限元模型,选取内嵌钢板高厚比、密肋钢板网格尺寸 2 个参数进行变参分析,对比各系列试件的滞回曲线、黏滞阻尼系数、骨架曲线及刚度退化情况,分析内嵌钢板墙几何参数对交叉密肋钢板剪力墙滞回性能的影响,并给出两参数的合理取值范围。结果表明:内嵌钢板高厚比 $\lambda \geq 500$ 时,试件耗能能力、侧向承载能力及延性等性能随内嵌钢板高厚比的减小而显著提升,当 $\lambda < 500$ 时,上述性能提升幅度不明显,内嵌钢板高厚比 λ 建议取值 500~600;交叉密肋网格尺寸对试件滞回性能影响显著,试件各项性能随交叉密肋网格尺寸的减小而提升,且提升幅度与网格尺寸减小幅度呈正相关,交叉密肋网格肋板条数建议取值小于等于 5×5 。

关键词:装配式交叉密肋钢板剪力墙;交叉密肋网格;内嵌钢板高厚比;滞回性能;参数分析

中图分类号: TU973.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2020)04-0052-08

Analysis on Influence Factors of Assembled Cross-ribbed Steel Plate Shear Wall

ZHENG Hong, XU Xiao-dong, WANG Wei, ZHANG Min

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: The assembled cross-ribbed steel plate shear wall structure was proposed, the finite element analysis method was used to establish the finite element model of shear wall test of longitudinal and transverse multi-ribbed steel plate, and the validity and reliability of the modeling method was verified. The finite element model of cross-ribbed steel plate shear wall was established, the embedded steel plate height thickness ratio, multi-ribbed steel plate grid size were selected for variable parameters analysis, and the hysteretic curve, viscous damping coefficient, skeleton curve and stiffness degradation of each series of specimens were compared. The influence of geometric parameters of embedded steel plate wall on the hysteretic performance of cross-ribbed steel plate shear wall was analyzed, and the reasonable range of two parameters was given. The results show that when the height thickness ratio of the embedded steel plate $\lambda \geq 500$, the energy dissipation capacity, lateral bearing capacity and ductility of the test specimen increase significantly with the decrease of the height thickness ratio of the embedded steel plate.

收稿日期:2019-09-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51178381)

作者简介:郑 宏(1964-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:cezheng@chd.edu.cn。

When $\lambda < 500$, the above performance improvement is not obvious, and the recommended value of the embedded steel plate height thickness ratio λ is 500-600. The grid size of cross ribs has a significant effect on the hysteretic performance of specimens. The performance of the specimen increases with the decrease of the grid size of cross rib, and the increasing range is positively related to the decreasing range of the grid size. It is suggested that the number of cross-ribbed grid ribs should be less than or equal to 5×5 .

Key words: assembled cross-ribbed steel plate shear wall; cross-ribbed grid; embedded steel plate height thickness ratio; hysteretic performance; parameter analysis

0 引言

钢板剪力墙因其优良的抗侧能力及抗震性能被广泛应用于高烈度地震区抗侧力体系中^[1-2]。试验研究及理论分析表明^[3-8],钢板剪力墙结构具有较高的强度、刚度及承载力,同时表现出良好的塑性变形能力,在大变形情况下依然具备良好的稳定状态,其耗能能力主要来源于内嵌钢板屈曲后强度。为充分利用内嵌钢板屈曲后强度,陈国栋等^[9-16]相继提出各类加劲钢板剪力墙,研究表明内嵌钢板设置加劲肋可明显延缓拉力带的形成,充分利用薄钢板屈曲后强度,缓解其在反复荷载作用下的“捏缩效应”,其中斜加劲肋钢板剪力墙结构性能明显优于十字加劲钢板剪力墙结构。于金光等^[17-18]提出一种采用密肋的新型防屈曲钢板墙结构,研究表明密肋网格板的设置使内嵌钢板剪切屈服先于剪切屈曲发生,有效抑制了内嵌钢板剪力墙的面外变形,在多遇及罕遇地震波作用下密肋网格钢板剪力墙结构内嵌钢板的面外变形最大值仅为 16.9 mm,提高了剪力墙的适用性。

在此基础上,本文提出装配式交叉密肋钢板剪力墙结构,根据已有试验建立有限元模型,对比有限元模拟结果与试验研究结果,验证有限元模型的有效性;然后建立交叉密肋钢板剪力墙有限元模型,分析内嵌钢板高厚比及密肋钢板网格尺寸对其滞回性能的影响。

1 有限元模型建立与验证

运用 ABAQUS 有限元软件模拟西安建筑科技大学结构抗震实验室进行的单跨两层钢框架-密肋网格复合钢板剪力墙结构试验,验证有限元模型的有效性和可行性。

装配式交叉密肋钢板剪力墙结构构造如图 1 所示,具体做法为:对钢板肋条进行开槽,开槽深度为肋条宽度的 1/2,开槽宽度大于垂直方向的钢板肋

条厚度 1 mm 左右,保证垂直交叉钢板肋条插接完成后的网格板两侧表面保持平面状态,如图 1(a)所示;钢板肋条相互垂直插接组合成网格板,在网格交叉处设置圆钢管,圆钢管长度与钢板肋条宽度相同,内径比对穿高强螺栓杆直径大 1~2 mm,并通过点焊方法与相邻钢板肋条连接,使得相互垂直的钢板肋条成为整体,交叉密肋尺寸如图 1(b)所示;安装时,采用对穿高强螺栓代替传统的焊接等连接措施,以实现交叉密肋钢板剪力墙结构的装配式要求,通过对高强螺栓施加预应力来实现两侧网格板与内嵌钢板充分接触的目的,如图 1(c)所示。

1.1 模型参数选择

为了更加精确拟合试验结果,有限元建模过程中各试件的几何尺寸及材料本构参数与试验试件^[12]保持一致。边框架选用钢材 Q235B,屈服强度 $f_y = 235$ MPa;内嵌钢板选用钢材 BLY160,屈服强度 $f_y = 160$ MPa,板厚 $t = 3$ mm。各构件截面尺寸如表 1 所示,本构参数如表 2 所示。

1.2 单位类型及边界条件设置

本文试件边框架与内嵌钢板的厚度均小于其结构整体尺寸的 1/10,故选用考虑大变形、小应变的四边形有限薄膜应变线性减缩积分壳单元(S4R)进行模拟。为方便模拟双侧交叉密肋与内嵌钢板之间的相互接触关系,对交叉密肋选取三维八节点缩减积分实体单元(C3D8R)进行模拟。试验中柱脚和底墙通过高强螺栓与地梁连接,有限元中通过限制柱脚和底墙 X、Y、Z 三个方向的平动自由度与转动自由度模拟其固端约束;试验中两侧边框架柱相应于顶梁与中梁标高处设置侧向支撑,有限元中通过限制相应位置的面外自由度以模拟侧向支撑作用,避免结构整体面外发生失稳。有限元网格划分与边界条件设置如图 2 所示。

1.3 荷载施加

通过有限元软件 ABAQUS 进行结构屈曲分析,将结构一阶或多阶屈曲模态叠加实现几何初始

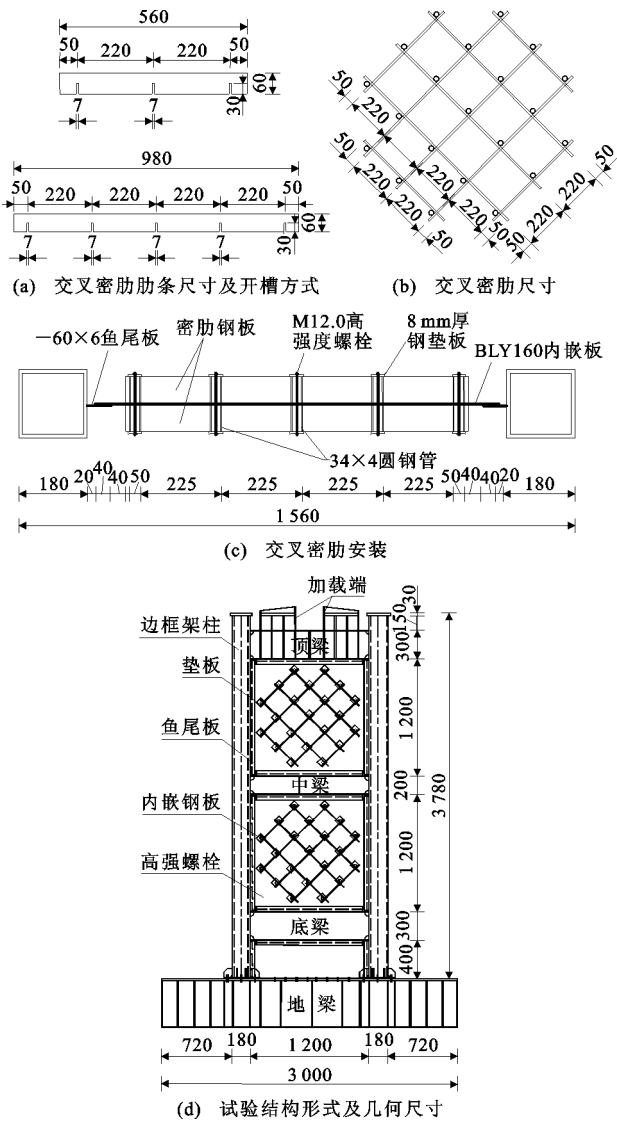


图 1 交叉密肋钢板剪力墙结构构造(单位:mm)

Fig. 1 Structure of Cross-ribbed Steel Plate Shear Wall (Unit:mm)

表 1 构件截面尺寸

Tab. 1 Sizes of Component Section

构件	截面尺寸	构件长度/mm
框架柱	□180×180×10×10	3 600
顶底梁	HN300×150×6.5×9	1 200
中梁	HN200×100×5.5×8	1 200
密肋肋条	60 mm×6 mm	1 000

缺陷,考虑初始缺陷对整体滞回性能的影响。

为模拟上部结构重力荷载对结构滞回性能的影响,在两侧框架柱柱顶施加竖向荷载。为防止加载端应力集中问题,将柱顶截面耦合于柱中心位置处的参考点,根据《高层民用建筑钢结构技术规程》轴压比限值,在参考点处施加竖向荷载 480 kN,名义轴压比为 0.3。

表 2 钢构件本构参数

Tab. 2 Constitutive Parameters of Steel Members

构件	f_y /MPa	f_u /MPa	δ /%	$E/10^5$ MPa
框架柱	342.89	467.74	40	2.07
顶底梁	264.70	420.30	44	2.05
中梁	255.79	419.20	37	2.03
内嵌钢板	169.49	274.83	50	2.04
交叉密肋	255.79	419.20	37	2.03

注: f_u 为钢材抗拉强度; E 为钢材弹性模量; δ 为钢材伸长率。

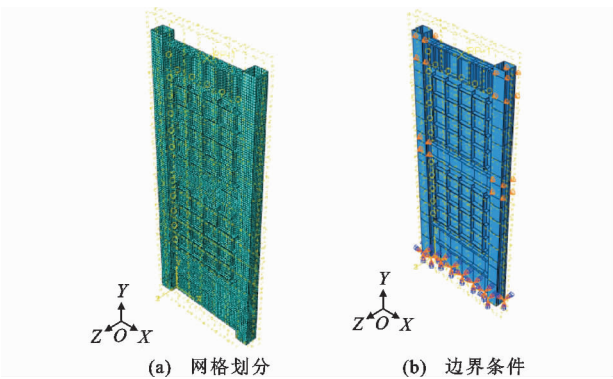


图 2 网格划分与边界条件

Fig. 2 Mesh Generation and Boundary Conditions

水平反复荷载施加在顶梁上表面,采用位移控制加载。结构整体屈服前按 6 mm 和 12 mm 逐级单次循环加载,当结构整体达到屈服以后,以屈服位移 δ_y 的 50%作为循环加载幅值,等幅循环次数为 3 次。加载制度如图 3 所示。

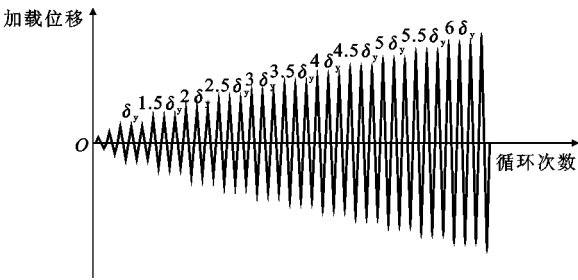


图 3 试验加载制度

Fig. 3 Loading System of Experiment

1.4 有限元模型验证

试验研究与有限元模拟得到的滞回曲线、骨架曲线如图 4 所示。由滞回曲线的对比可知:有限元分析得到的滞回曲线更加饱满,两者在弹性阶段曲线基本重合,峰值相近;在弹塑性和塑性阶段,每一级有限元试件峰值均大于试验试件,但相对误差均小于 10%。这是由于有限元模拟未考虑试件材料强度的离散性、加工质量及安装空隙等偏差,因此有限元计算得到的滞回曲线更加饱满。

由骨架曲线的对比可知:试验结果与有限元模

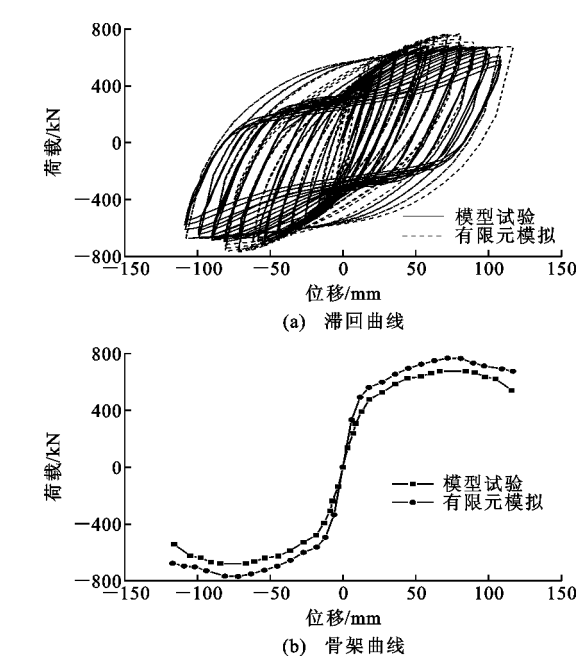


图 4 模型试验与有限元模拟结果

Fig. 4 Model Test and Finite Element Simulation Results

表 3 内嵌钢板高厚比系列模型参数

Tab. 3 Parameters of Embedded Steel Plate Height Thickness Ratio Series Model

试件编号	材料	厚度/mm	高厚比	网格划分	边框架柱尺寸
HD-1	BLY160	3	1 000	5×5	260 mm×260 mm×15 mm×15 mm
HD-2	BLY160	5	600	5×5	260 mm×260 mm×15 mm×15 mm
HD-3	BLY160	6	500	5×5	260 mm×260 mm×15 mm×15 mm
HD-4	BLY160	10	300	5×5	260 mm×260 mm×15 mm×15 mm

2.1.1 滞回曲线对比

内嵌钢板高厚比系列模型的滞回曲线对比如图 5 所示。从图 5 可以看出:内嵌钢板高厚比系列模型的滞回曲线变化趋势一致,且滞回曲线随内嵌钢板高厚比的减小而更加饱满,峰值荷载也更大;内嵌钢板高厚比越小,试件滞回曲线越饱满,耗能性能越优,峰值荷载越大,承载能力越强。

2.1.2 耗能能力对比

内嵌钢板材料强度系列模型分析得到的等效黏滞阻尼系数对比如图 6 所示,每个加载级所得等效黏滞阻尼系数见表 4。可以看出:等效黏滞阻尼系数随内嵌钢板高厚比的减小而增大;在加载后期,各试件拉力带均发育成熟,等效黏滞阻尼系数增长幅度逐渐减缓且稳定。结果表明:结构的耗能性能随着内嵌钢板高厚比的减小而更优,但当内嵌钢板的厚度达到一定值时,结构耗能性能提升效果不再显著,因此应合理选用内嵌钢板的高厚比,使得试件获得良好的耗能性能且各构件能够充分发挥作用。

拟所得骨架曲线发展趋势基本吻合,每一加载级有限元模拟荷载值均略高于试验值,结构荷载达到峰值荷载后,试验得到的骨架曲线因内嵌钢板的局部撕裂及节点焊缝处破坏出现下降段,有限元模拟的骨架曲线下降没有试验结果明显,但整体趋势一致。

试验与有限元模拟所得滞回曲线和骨架曲线趋势基本一致,相对误差均在 10% 以内。有限元模型能够有效模拟结构的受力机制。

2 交叉密肋钢板剪力墙影响参数分析

根据图 1 所示构造,建立交叉密肋钢板剪力墙有限元模型,其方法与有限元验证建模方法相同。选取内嵌钢板高厚比、密肋网格板网格尺寸 2 个参数建立系列模型,对比分析结构滞回性能,给出两参数建议取值范围。

2.1 内嵌钢板高厚比对结构滞回性能的影响

选取 4 个不同的钢板厚度值,将其限制于 12 mm 以内,共设计 4 个计算模型,具体数据见表 3。

2.1.3 骨架曲线对比

内嵌钢板高厚比系列模型分析得到的骨架曲线对比如图 7 所示,关键节点数据如表 5 所示。可以看出:内嵌钢板高厚比的变化对结构屈服荷载与峰值荷载的影响较明显。减小内嵌钢板高厚比能延缓内嵌钢板拉力带的形成,试件的屈服荷载与峰值荷载随着内嵌钢板高厚比 λ 的减小而增加;随着内嵌钢板厚度的进一步增大 ($\lambda \leq 500$),框架柱与内嵌钢板刚度不匹配,边框架柱因刚度相对较弱而过早发生压曲破坏,试件 HD-3, HD-4 的荷载-位移曲线较早出现下降趋势。

2.1.4 刚度退化对比

内嵌钢板高厚比系列模型的刚度退化曲线对比如图 8 所示。可以看出:当高厚比 $\lambda \geq 500$ 时,试件初始刚度随内嵌钢板高厚比的减小而增大,这是由于内嵌钢板高厚比减小,不利于发生面外屈曲变化,初始侧向刚度更大;当高厚比 $\lambda < 500$ 时,试件 HD-4 与试件 HD-3 的初始刚度相差不大,表明当内嵌钢板的高厚比减小到一定程度时,高厚比对结构初始

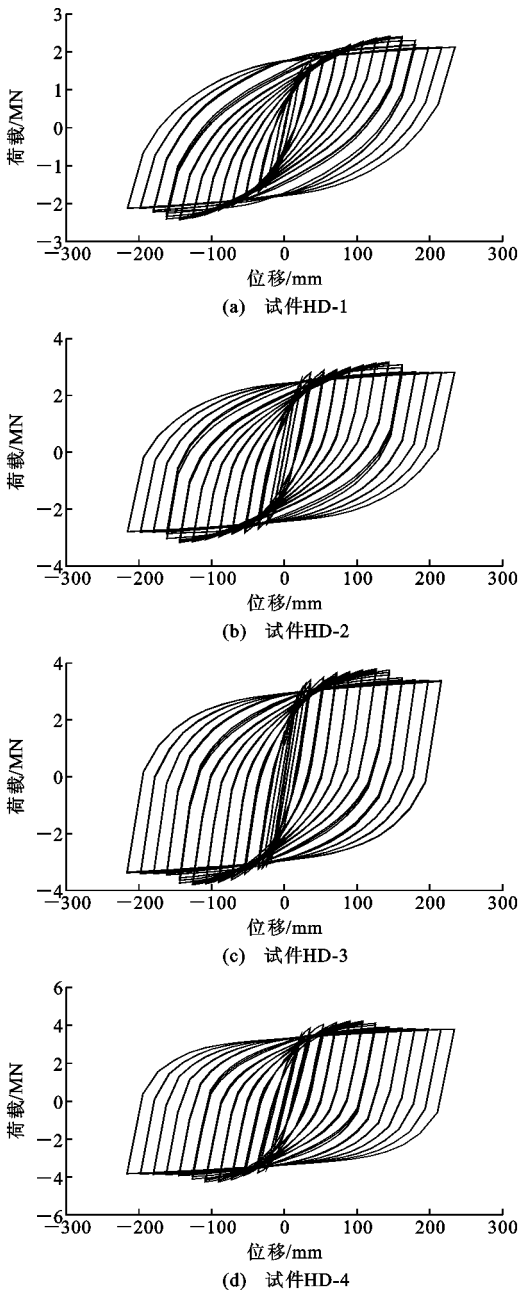


图 5 内嵌钢板高厚比系列模型滞回曲线
Fig. 5 Hysteresis Curves of Embedded Steel Plate
Height Thickness Ratio Series Model

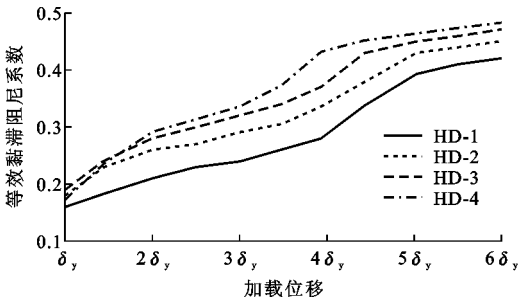


图 6 等效黏滞阻尼系数 1
Fig. 6 Equivalent Viscous Damping Coefficient 1

表 4 等效黏滞阻尼系数取值 1
Tab. 4 Equivalent Viscous Damping Coefficient Values 1

加载位移	HD-1	HD-2	HD-3	HD-4
δ_y	0.16	0.18	0.19	0.17
$1.5\delta_y$	0.18	0.23	0.24	0.24
$2\delta_y$	0.21	0.26	0.28	0.29
$2.5\delta_y$	0.23	0.27	0.30	0.31
$3\delta_y$	0.24	0.29	0.32	0.34
$3.5\delta_y$	0.26	0.31	0.34	0.37
$4\delta_y$	0.28	0.34	0.37	0.43
$4.5\delta_y$	0.34	0.38	0.43	0.45
$5\delta_y$	0.39	0.43	0.45	0.46
$5.5\delta_y$	0.41	0.44	0.46	0.47
$6\delta_y$	0.42	0.45	0.47	0.48

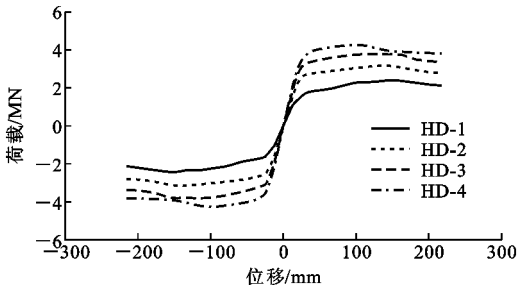


图 7 内嵌钢板高厚比系列模型骨架曲线
Fig. 7 Skeleton Curves of Embedded Steel Plate
Height Thickness Ratio Series Model

刚度的提升基本没有影响,4 组试件在加载后期刚度退化趋于平缓,均表现出良好的延性。

2.2 交叉密肋网格尺寸对结构滞回性能的影响

设计 4 个计算模型,仅改变内嵌钢板两侧的交叉密肋网格尺寸,交叉密肋网格尺寸通过加劲肋数量体现,具体数据见表 5。交叉密肋网格板划分的小区格相关参数见表 6。

2.2.1 滞回曲线对比

交叉密肋网格尺寸系列模型在水平反复荷载作用下的滞回曲线对比如图 9 所示。从图 9 可以看出,该系列模型的 4 个试件滞回曲线均饱满且饱满度相似,因组成交叉密肋网格的肋板条数量较多,对内墙钢板划分的小区格数量较多,形成的拉力带数量也较多,所以滞回环较饱满,耗能能力较强。试件的峰值荷载随着交叉密肋网格尺寸的减小而增大,这主要是由于交叉密肋网格尺寸越小,钢板肋条数量越多,其对结构发生屈曲变形的限制效果越明显。

2.2.2 耗能能力对比

交叉密肋网格尺寸系列模型分析得到的等效黏滞阻尼系数对比如图 10 所示,具体数据见表 7。可以看出:当交叉密肋网格肋板条数小于 5×5 时,试

表 5 交叉密肋网格尺寸系列模型参数

Tab. 5 Parameters of Cross-ribbed Mesh Size Series Model

试件编号	材料	钢板厚度/mm	高厚比	网格划分	边框架柱尺寸
WG-1	BLY160	6	500	3×3	260 mm×260 mm×15 mm×15 mm
WG-2	BLY160	6	500	4×4	260 mm×260 mm×15 mm×15 mm
WG-3	BLY160	6	500	5×5	260 mm×260 mm×15 mm×15 mm
WG-4	BLY160	6	500	6×6	260 mm×260 mm×15 mm×15 mm

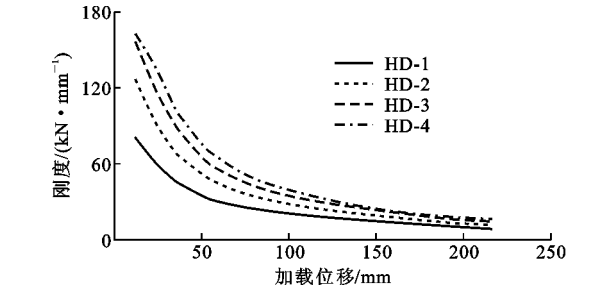


图 8 刚度退化曲线 1

Fig. 8 Stiffness Degradation Curves 1

表 6 交叉密肋网格板小区格参数

Tab. 6 Parameters of Cross-ribbed Grid Panel Cell

试件编号	网格划分	区格数量	区格尺寸	高厚比
WG-1	3×3	4	870 mm×870 mm	145
WG-2	4×4	5	800 mm×800 mm	133
WG-3	5×5	12	560 mm×560 mm	93
WG-4	6×6	13	500 mm×500 mm	83

件的等效黏滞阻尼系数随着交叉密肋网格尺寸的减小而增大,这是因为内嵌钢板小区格数量随交叉密肋网格尺寸的减小而增多,加载过程中参与结构耗能的拉力带数量越多;当交叉密肋网格肋板条数为 6×6 时,试件 WG-4 的等效黏滞阻尼系数小于试件 WG-3,当交叉密肋网格肋板条数设置为 6×6 时,每个小区格的尺寸为 200 mm×200 mm,小区格内的内嵌钢板高厚比为 67,过小的高厚比不利于内嵌钢板拉力带的形成,导致内嵌钢板的拉力带发育迟缓且不够成熟,无法充分发挥其屈曲后强度,因此试件 WG-4 的等效黏滞阻尼系数相对试件 WG-3 有所降低。

2.2.3 骨架曲线对比

交叉密肋网格尺寸系列模型分析得到的骨架曲线对比如图 11 所示。可以看出:试件峰值荷载随着交叉密肋板数量的增加而增大。交叉密肋板数量越多,密肋小区格尺寸越小,进而导致小区格内嵌钢板高厚比降低,其拉力带形成愈发困难,因此试件峰值荷载越大。

2.2.4 刚度退化对比

交叉密肋网格尺寸系列模型分析得到的刚度退

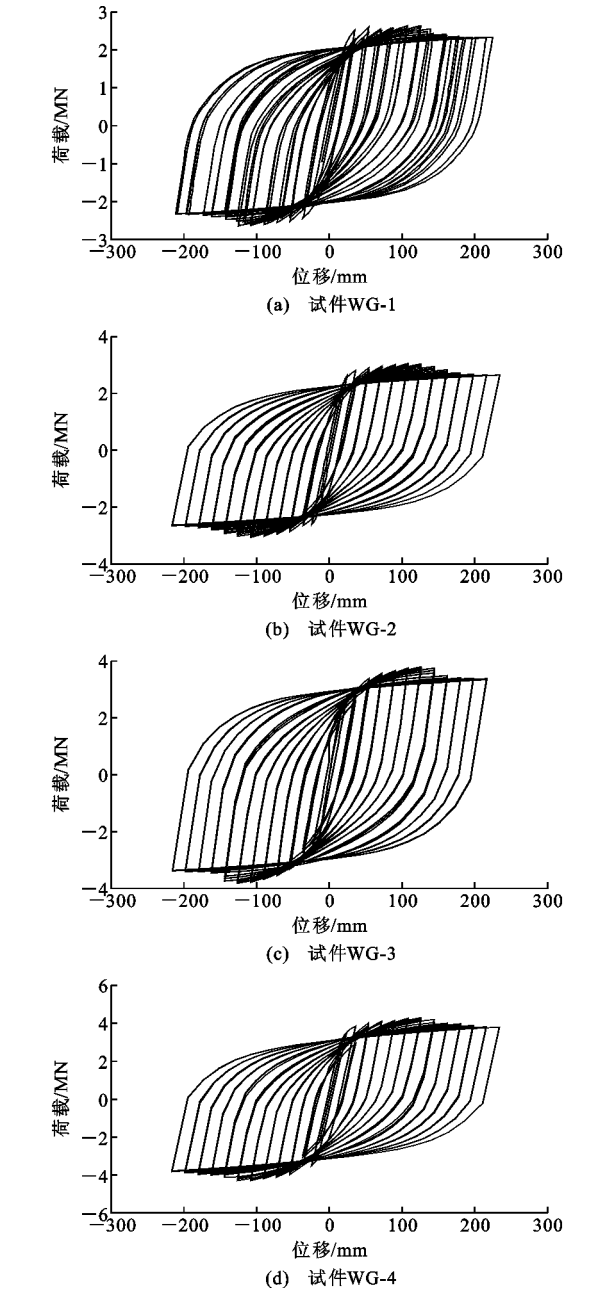


图 9 交叉密肋网格尺寸系列模型滞回曲线

Fig. 9 Hysteretic Curves of Cross-ribbed Mesh Size Series Model

化对比如图 12 所示。可以看出:试件 WG-1 的初始刚度为 104.10 kN·mm⁻¹,试件 WG-2 的初始刚度为 115.32 kN·mm⁻¹,相比于试件 WG-1 提升约

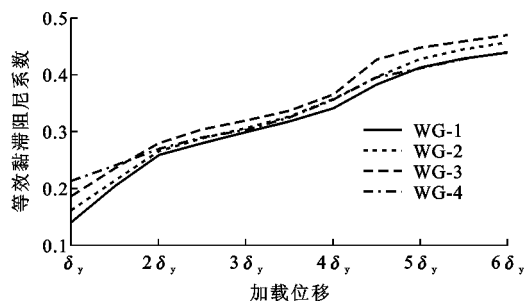


图 10 等效黏滞阻尼系数 2

Fig. 10 Equivalent Viscous Damping Coefficient 2

表 7 等效黏滞阻尼系数取值 2

Tab. 7 Equivalent Viscous Damping Coefficient Values 2

加载位移	WG-1	WG-2	WG-3	WG-4
δ_y	0.14	0.16	0.19	0.21
δ_y	0.21	0.21	0.24	0.24
$2\delta_y$	0.26	0.27	0.28	0.27
$2.5\delta_y$	0.28	0.29	0.30	0.29
$3\delta_y$	0.30	0.31	0.32	0.30
$3.5\delta_y$	0.32	0.33	0.34	0.33
$4\delta_y$	0.34	0.36	0.37	0.36
$4.5\delta_y$	0.38	0.40	0.43	0.40
$5\delta_y$	0.41	0.43	0.45	0.41
$5.5\delta_y$	0.43	0.45	0.46	0.43
$6\delta_y$	0.44	0.46	0.47	0.44

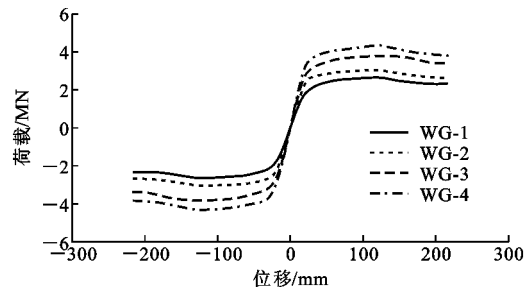


图 11 骨架曲线

Fig. 11 Skeleton Curves

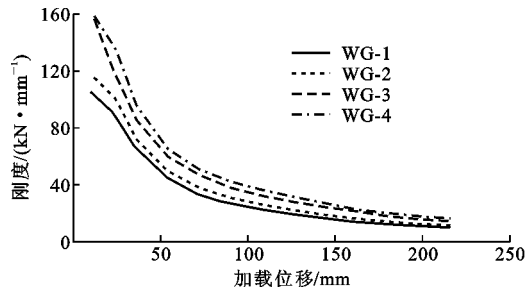


图 12 刚度退化曲线 2

Fig. 12 Stiffness Degradation Curves 2

11%; 试件 WG-3 初始刚度为 $156.18 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$, 相比于试件 WG-2 提升约 35%; 试件 WG-4 的初始

刚度为 $158.58 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$, 相比于试件 WG-3 提升约 2%。由此可见, 试件的刚度随交叉密肋网格尺寸的减小而增大, 且刚度增大幅度与交叉密肋网格尺寸减小幅度正相关。试件 WG-4 与试件 WG-3 的刚度数值基本一致。可见试件 WG-3 对内嵌钢板的面外约束作用显著, 对整个结构刚度的提升贡献突出; 然而由于受到试件整体尺寸的影响, 试件 WG-4 交叉密肋网格肋板条数量的继续增加对于小区格尺寸的影响不大, 对整个结构抗侧刚度的进一步提升贡献有限。

3 结 语

(1)内嵌钢板高厚比对试件滞回性能的影响较大。当内嵌钢板高厚比 $\lambda \geq 500$ 时, 试件的耗能性能、侧向承载能力、侧向刚度、延性等性能均随内嵌钢板高厚比的减小而提升, 且提升幅度较大; 当内嵌钢板高厚比 $\lambda < 500$ 时, 试件的各项性能随内嵌钢板高厚比的减小提升幅度不再显著, 且内嵌钢板高厚比为 300 的试件框架柱先行破坏。综合考虑, 内嵌钢板高厚比建议取值 500~600。

(2)交叉密肋网格尺寸对试件滞回性能的影响较显著。在组成交叉密肋网格的加劲钢板条数在 5×5 范围内时, 试件的耗能性能、承载能力、侧向刚度及延性等性能均随交叉密肋网格尺寸的减小而提升, 且提升幅度与交叉密肋网格尺寸减小幅度呈正相关。当交叉密肋网格的加劲钢板条数大于 5×5 时, 由于试件整体尺寸的影响, 交叉密肋网格尺寸减小幅度有限, 试件的承载能力、侧向刚度及延性等提升有限, 同时因小区格内嵌钢板高厚比过小, 试件耗能性能有所降低。综合考虑, 交叉密肋网格肋板条数建议取 5×5 以内。

参考文献:

References:

[1] SHEKASTEBAND B, AZARAXSH A, SHOWKATI H. Experimental and Numerical Study on Seismic Behavior of LYS and HYS Steel Plate Shear Walls Connected to Frame Beams Only[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2017, 17(1): 154-168.

[2] GUO H C, LI Y L, LING G, et al. Experimental Study of Cross Stiffened Steel Plate Shear Wall with Semi-rigid Connected Frame[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 135: 69-82.

[3] SIGARIYAZD M A, JOGHATAIE A, ATTARI N K A. Analysis and Design Recommendations for Diago-

- nally Stiffened Steel Plate Shear Walls[J]. Thin-walled Structures, 2016, 103: 72-80.
- [4] ALAVI E, NATEGHI F. Experimental Study on Diagonally Stiffened Steel Plate Shear Walls with Central Perforation[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 89: 9-20.
- [5] 陈国栋. 钢板剪力墙结构性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2002.
- CHEN Guo-dong. The Investigation to Structural Behavior of Steel Plate Shear Walls[D]. Beijing: Tsinghua University, 2002.
- [6] 陈国栋, 郭彦林. 非加劲板抗剪极限承载力[J]. 工程力学, 2003, 20(2): 49-54.
- CHEN Guo-dong, GUO Yan-lin. Ultimate Shear-carrying Capacity of Unstiffened Panels[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(2): 49-54.
- [7] 陈国栋, 郭彦林, 范珍, 等. 钢板剪力墙低周反复荷载试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(2): 19-26, 38.
- CHEN Guo-dong, GUO Yan-lin, FAN Zhen, et al. Cyclic Test of Steel Plate Shear Walls[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(2): 19-26, 38.
- [8] 曹春华, 郝际平, 杨丽, 等. 钢板剪力墙弹塑性分析[J]. 建筑结构, 2007, 32(10): 53-56.
- CAO Chun-hua, HAO Ji-ping, YANG Li, et al. Elastoplastic Analysis of Steel Plate Shear Walls[J]. Building Structure, 2007, 32(10): 53-56.
- [9] 陈国栋, 郭彦林. 十字加劲钢板剪力墙的抗剪极限承载力[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(1): 71-78.
- CHEN Guo-dong, GUO Yan-lin. Ultimate Shear-carrying Capacity of Steel Plate Shear Wall with Cross Stiffeners[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(1): 71-78.
- [10] 郭彦林, 陈国栋, 缪友武. 加劲钢板剪力墙弹性抗剪屈曲性能研究[J]. 工程力学, 2006, 23(2): 84-91, 59.
- GUO Yan-lin, CHEN Guo-dong, MIAO You-wu. Elastic Buckling Behavior of Steel Plate Shear Wall with Cross or Diagonal Stiffeners[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(2): 84-91, 59.
- [11] 曹春华. 斜加劲钢板剪力墙性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.
- CAO Chun-hua. The Investigation to Behavior Diagonally Stiffened Steel Plate Shear Walls[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2008.
- [12] 王迎春, 郝际平, 李峰, 等. 钢板剪力墙力学性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2007, 39(2): 181-186.
- WANG Ying-chun, HAO Ji-ping, LI Feng, et al. Study on Mechanical Property of Steel Plate Shear Walls[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2007, 39(2): 181-186.
- [13] 聂建国, 朱力, 樊健生, 等. 钢板剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(1): 61-69.
- NIE Jian-guo, ZHU Li, FAN Jian-sheng, et al. Experimental Research on Seismic Behavior of Steel Plate Shear Walls[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(1): 61-69.
- [14] 王威. 盖板加强斜加劲薄钢板墙性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- WANG Wei. Study on Performance of Cover-plate Stiffening Thin Plate Shear Wall[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [15] 郑宏, 张敏, 王嘉政, 等. 盖板加强斜加劲钢板剪力墙受力性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(2): 48-55.
- ZHENG Hong, ZHANG Min, WANG Jia-zheng, et al. Force Performance of Cover-plate Diagonal Stiffening Steel Plate Shear Wall[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2019, 36(2): 48-55.
- [16] 王先铁, 林麟璋, 宋文俊, 等. 竖向闭口槽钢加劲钢板剪力墙在非均匀压剪作用下的屈曲性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(6): 51-58.
- WANG Xian-tie, LIN Lin-hui, SONG Wen-jun, et al. Buckling Behavior of Steel Plate Shear Wall Stiffened by Vertical Closed Channel Stiffeners Under Non-uniform Pressure and Shear Load[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(6): 51-58.
- [17] 于金光, 郝际平. 半刚性连接钢框架-非加劲钢板剪力墙结构性能研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(8): 74-82.
- YU Jin-guang, HAO Ji-ping. Study on the Behavior of Semi-rigid Connection Steel Frames with Unstiffened Steel Plate Shear Wall Structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(8): 74-82.
- [18] 郝际平, 郭宏超, 解崎, 等. 半刚性连接钢框架-钢板剪力墙结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(2): 33-40.
- HAO Ji-ping, GUO Hong-chao, XIE Qi, et al. Seismic Performance of Semi-rigid Composite Steel Frame with Steel Plate Shear Walls[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(2): 33-40.