

文章编号:1673-2049(2019)02-0048-08

# 盖板加强斜加劲钢板剪力墙受力性能

郑宏,张敏,王嘉政,王威

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

**摘要:**提出一种新型抗侧力体系——盖板加强斜加劲钢板剪力墙,运用有限元软件 ANSYS15.0 对斜加劲钢板剪力墙(DSW)、单侧盖板加强斜加劲钢板剪力墙(CSW-1)、双侧盖板加强斜加劲钢板剪力墙(CSW-2)结构进行单调加载、循环加载以及屈曲荷载研究,得到结构的荷载-位移曲线、滞回曲线、耗能能力、骨架曲线、屈曲系数、屈曲荷载等,对比分析了加强盖板斜加劲钢板剪力墙结构的受力性能。结果表明:单调加载条件下,加强盖板的存在提高了斜加劲钢板剪力墙的承载力和初始刚度,且双侧加强比单侧加强更优;循环加载条件下,加强盖板使得盖板加强斜加劲钢板剪力墙的滞回曲线更加饱满,刚度退化更缓慢,表现出良好的延性,且双侧盖板加强效果比单侧加强效果明显;斜加劲肋对内填钢板的平面外变形约束明显,盖板对加劲肋的平面外约束明显,可以在较小的用钢量下获得较大的弹性屈曲荷载增幅,是十分有效的加强方式,综合考虑加劲肋与加强盖板对结构弹性屈曲荷载的影响,建议肋板刚度比取 30,盖板相似比取 0.5。

**关键词:**盖板加强斜加劲钢板剪力墙;初始刚度;滞回曲线;骨架曲线;屈曲荷载

**中图分类号:**TU398.2

**文献标志码:**A

## Force Performance of Cover-plate Diagonal Stiffening Steel Plate Shear Wall

ZHENG Hong, ZHANG Min, WANG Jia-zheng, WANG Wei

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

**Abstract:** A new anti lateral force system — cover-plate diagonal stiffening steel plate shear wall was proposed. The finite element software ANSYS15.0 was used to simulate the monotonic loading, cyclic loading and buckling load of the diagonal stiffened steel plate wall (DSW), the single side cover-plate stiffening steel plate shear wall (CSW-1), the double cover-plate stiffening steel plate shear wall (CSW-2) structure. The load-displacement curves, hysteretic curves, skeleton curves, buckling coefficients, buckling loads were obtained, and the force performances of cover-plate stiffening steel plate shear wall structures were compared and analysed. The results indicate that under the monotonic loading, the existence of strengthened cover-plate increases the bearing capacity and initial stiffness of the diagonal stiffening steel plate wall, and CSW-2 is better than CSW-1. Under the cyclic loading, the hysteretic curves of CSW are fuller, the stiffness degradation is slower and the ductility is better, and the reinforcing effect of CSW-2 is better than that of CSW-1. The out-of-plane constraint effect of the diagonal stiffener on the inner steel plate is obvious, and the out-of-plane constraint effect of the cover-plate on the stiffener is also obvious. The elastic buckling load can be increased with a small amount of steel. Considering the influence of stiffener and cover-plate on the elastic buckling load, the suggested

收稿日期:2018-08-16

基金项目:国家自然科学基金项目(50678025)

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,博士后,E-mail:cezheng@chd.edu.cn。

value of stiffness ratio of stiffener plate is 30 and the similarity ratio of cover plate is 0.5.

**Key words:** cover-plate diagonal stiffening steel plate shear wall; initial stiffness; hysteretic curve; skeleton curve; buckling load

0 引 言

钢板剪力墙是 20 世纪 70 年代发展起来的一种新型抗侧力体系,是一种非常适合作为高烈度地震区结构的抗侧力构件<sup>[1-3]</sup>。目前国内外对该体系的研究表明<sup>[4-8]</sup>,钢板剪力墙屈曲后形成的拉力带能够继续为结构提供侧向承载力,使结构具有较好的延性和较强的侧向刚度,表现出优良的耗能性能,且利用钢板剪力墙屈曲后强度可以降低钢材用量,提高经济效益。由于钢板剪力墙屈曲承载力小,过早的屈曲会造成严重的平面外变形,并伴随巨大的响声,影响建筑的舒适度和使用功能。对此,陈国栋等<sup>[9-11]</sup>、郭彦林等<sup>[12]</sup>、曹春华<sup>[13]</sup>相继提出了加劲钢板剪力墙结构,研究表明加劲肋的设置可以改善内填钢板的实际受力状态,提高墙体的初始刚度和承载力,削弱内填钢板剪力墙的拉力场效应,减缓滞回曲线的“捏缩”效应,减小其面外变形,相比非加劲钢板剪力墙而言具有更优的抗震性能。斜加劲钢板剪力墙结构承载力与抗侧刚度优于十字加劲钢板剪力墙结构,但斜加劲肋在抑制内填钢板拉力带形成的同时受力复杂,且多数加劲肋高厚比较小,在试验中多出现扭转失稳现象,破坏严重。

鉴于此,本文提出了盖板加强斜加劲钢板剪力墙结构这一新型抗侧力结构体系。用矩形钢板覆盖交叉加劲肋中心区域以减小加劲肋长细比,避免斜加劲肋受压时发生整体屈曲,在不造成钢板剪力墙初始刚度下降的情况下改善加劲肋的受力。拟通过有限元软件 ANSYS15.0 研究盖板加强斜加劲钢板剪力墙结构的受力性能,主要通过对斜加劲钢板剪力墙(DSW)结构、单侧盖板加强斜加劲钢板剪力墙(CSW-1)结构及双侧盖板加强斜加劲钢板剪力墙(CSW-2)结构的单调加载、循环加载和屈曲结果进行对比分析,研究盖板加强斜加劲钢板剪力墙结构的抗侧刚度、承载能力、滞回性能和屈曲性能等。

1 有限元模型的建立与验证

本文选取西安建筑科技大学结构与抗震实验室进行的“斜加劲钢板剪力墙”试验<sup>[10]</sup>,建立有限元基本模型过程中各构件尺寸、本构关系严格按照该试验选取,有限元模型的求解遵循该试验加载制度,通

过对比有限元模拟结果与试验研究结果来验证本文有限元模型的有效性和可行性。

1.1 模型参数选择

有限元基础模型的各构件参数与试验研究构件保持一致,构件截面尺寸如表 1 所示,同时为了更加精确地模拟模型试验,本文有限元模型的材料本构参数选取与试验研究保持一致,如表 2 所示。剪力墙结构构造及各构件尺寸如图 1 所示。

表 1 构件截面尺寸  
Tab. 1 Sizes of Component Section

构件	截面尺寸
框架柱	HN300×150×6.5×9
框架梁	HW150×150×7×10
内填钢板	1 350 mm×1 050 mm×3.5 mm
连接板	60 mm×8 mm
加劲肋	40 mm×3.5 mm

表 2 钢构件本构参数  
Tab. 2 Constitutive Parameters of Steel

构件	$\sigma_y$ /MPa	$\sigma_u$ /MPa	$E$ /GPa	$\delta$ /%
框架柱	302	421	198.50	27.7
框架梁	295	398	200.61	29.3
内填钢板	340	451	205.35	37.1

注: $\sigma_y$ 、 $\sigma_u$ 分别为钢材屈服应力和极限应力; $E$ 为钢材弹性模量; $\delta$ 为钢材伸长率。

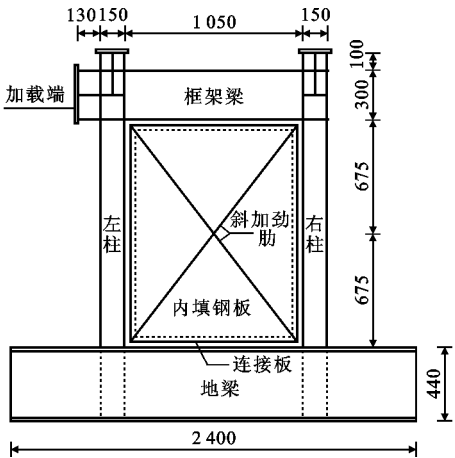


图 1 斜加劲钢板剪力墙构件尺寸(单位:mm)  
Fig. 1 Size of Diagonal Stiffening Steel Plate Shear Wall Component (Unit:mm)

1.2 单元类型及边界条件的设置

模型单元选取:运用 ANSYS15.0 中的四节点有限应变壳单元 Shell181 进行建模,梁柱翼缘及加

劲肋选用完全积分单元提高计算精度,梁柱腹板及内填钢板选用缩减积分单元防止剪切自锁。

约束条件的设置:约束梁平面外平动自由度来模拟楼板对钢梁的约束作用;约束板底及柱底所有自由度来模拟地梁的约束作用;在柱顶施加竖向荷载模拟重力荷载对钢板剪力墙的影响;在重力荷载加载点处耦合柱顶所有节点  $u_y$  方向自由度防止加载端应力集中;在水平荷载加载点处耦合梁中心线高度所有节点  $u_x$  方向自由度。有限元模型的边界条件及荷载施加情况如图 2 所示。

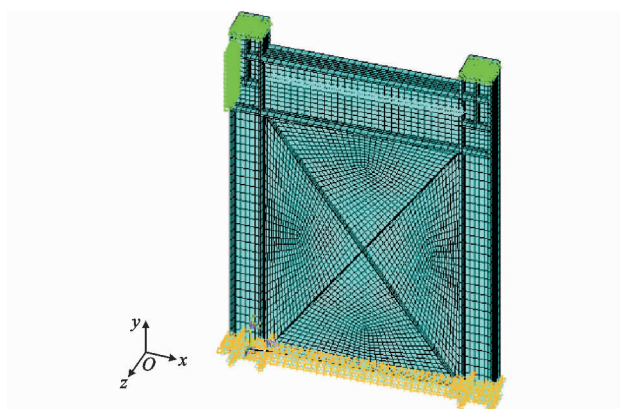


图 2 斜加劲钢板剪力墙有限元模型

Fig. 2 Finite Element Model of Diagonal Stiffening Steel Plate Shear Wall

### 1.3 有限元模型的验证

有限元模拟得到的滞回曲线与试验滞回曲线如图 3 所示,对比滞回曲线可知,2 个计算结果基本吻合,有限元模拟滞回曲线较试验结果饱满,但 2 种方法获得的滞回曲线峰值大小接近,且到达强度极限后下降趋势也较为相似。

由骨架曲线的对比可知:有限元骨架曲线与试验结果在弹性阶段存在一定误差,加载位移为 5 mm 时,试验加载点处反力为 592.3 kN,有限元模型获得的反力为 704.5 kN,比试验结果高 19.0%;有限元模拟屈服荷载明显大于试验研究屈服荷载;进入塑性阶段后 2 组骨架曲线误差减小,最大误差发生在加载位移为 9.28 mm 处,试验加载点处反力为 732.2 kN,有限元模型计算得到的结果为 781.24 kN,比试验结果高出 6.70%。

误差产生的原因主要有两点:首先是初始缺陷,试件中的钢材在生产、轧制及加工过程中,会形成分布复杂、大小不均的残余应力,造成试件在水平荷载作用下部分区域提前屈服,削弱了试件整体刚度,且试件中可能存在加载偏心、面外扭曲变形等情况,而在有限元模型中,没有考虑到初始残余应力及加工

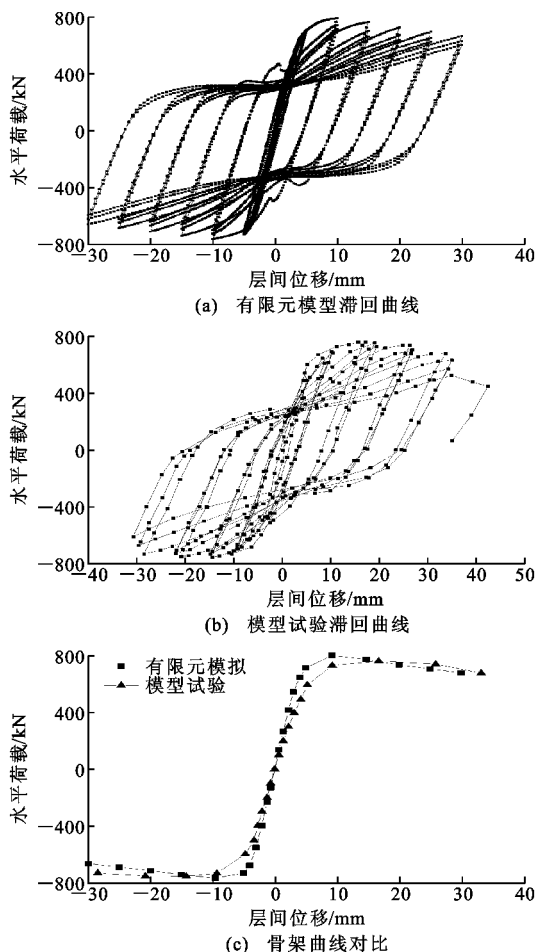


图 3 模型试验与有限元模拟结果

Fig. 3 Model Test and Finite Element Simulation Results

缺陷,并忽略了偏心加载的影响;其次是试件连接,弹性阶段时试件连接处受力较小,2 种方法获得的骨架曲线差距极小,随着循环荷载幅值的增大,试件连接处受力也逐渐增大,试验结构逐渐出现局部钢板撕裂及连接板与内填钢板焊缝撕裂等现象,而有限元模型为理想状态,各试件连接紧密,没有考虑到焊缝开裂的影响。

总体来分析,2 种方法获得的滞回曲线和骨架曲线趋势基本一致,有限元模拟与模型试验误差在可接受范围,本文有限元模型能够比较精确地模拟试件的力学性能和结构的面外变形。

## 2 受力性能分析

### 2.1 试件的设计

通过对比分析有限元模拟结果与模型试验结果可知,结构局部屈曲发生在内填钢板中心附近,直至撕裂,加劲肋整体屈曲发生较早。这主要是因为周边框架梁柱对内填钢板中心区域的嵌固作用较弱,且加劲肋长细比又相对较大,在循环荷载作用下,中

心区域变形激烈,内填钢板局部屈曲后加剧了加劲肋的屈曲。为防止加劲肋屈曲,改善结构性能,本文在传统斜加劲钢板剪力墙结构的基础上,考虑在中心区域加劲肋外侧加盖板,盖板材料与内填钢板一致,盖板与剪力墙板尺寸相似比为 0.5,厚度为 3.5 mm。盖板加强斜加劲钢板剪力墙基本构造及尺寸如图 4 所示。

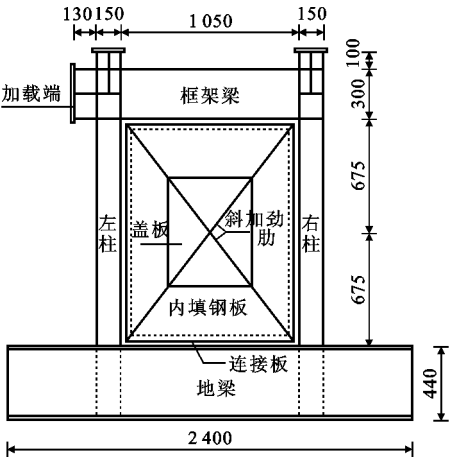


图 4 盖板加强斜加劲钢板剪力墙基本构造(单位:mm)

Fig. 4 Basic Structure of Cover-plate Diagonal Stiffening Steel Plate Shear Wall (Unit:mm)

2.2 有限元模型的建立

盖板加强斜加劲钢板剪力墙除加强盖板以外各构件建模方式与斜加劲钢板剪力墙模型一致,均采用 Shell181 单元,边界条件也与斜加劲钢板剪力墙模型一致,内填钢板与加强盖板沿加劲肋位置分割成 4 块三角形板,采用四边形映射网格划分盖板单元,有限元模型如图 5 所示。

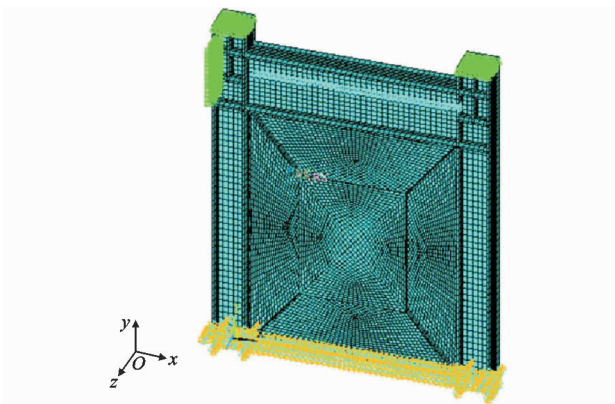


图 5 盖板加强斜加劲钢板剪力墙有限元模型

Fig. 5 Finite Element Model of Cover-plate Diagonal Stiffening Steel Plate Shear Wall

2.3 单调加载荷载-位移曲线的对比

分别对 DSW,CSW-1,CSW-2 结构体系进行单调加载模拟,得到的荷载-位移曲线如图 6 所示,其

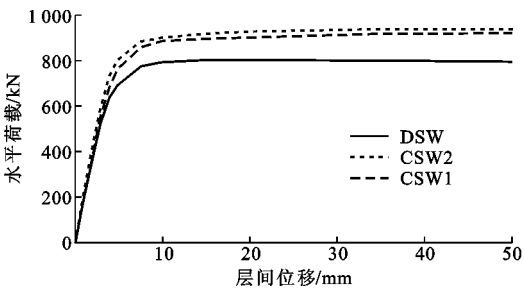


图 6 试件单调加载荷载-位移曲线对比

Fig. 6 Comparison of Load-displacement Curves of Specimens Under Monotonous Loading

中层间位移为柱侧施加的水平位移值,水平荷载为加载点处的反力值。单调加载结果对比见表 3。

表 3 单调加载结果对比

Tab. 3 Comparison of Monotonous Load Results

试件	屈服荷载/kN	屈服位移/mm	初始刚度/(kN·mm <sup>-1</sup> )	峰值荷载/kN	峰值位移/mm	延性系数
DSW	701.2	5.0	191.7	805.6	18.7	3.7
CSW-1	810.7	5.4	196.8	922.9	48.2	8.9
CSW-2	834.5	5.8	208.6	941.0	43.3	7.4

由表 2 可知:相比于模型 DSW,模型 CSW-1 的屈服荷载和峰值荷载分别提升了约 16%和 15%,模型 CSW-2 的屈服荷载和峰值荷载分别提升了约 19%和 17%,表明加强盖板能够有效地提高斜加劲钢板剪力墙结构的承载能力;模型 CSW-1 的初始刚度提升了 3%,CSW-2 的初始刚度提升了 9%,表明加强盖板对斜加劲钢板剪力墙结构的初始刚度有一定的提高,加强盖板的存在使得内填钢板在屈曲前得到更加有效的发挥;模型 CSW-2 的峰值荷载和初始刚度相较于模型 CSW-1 分别提高 2%和 6%,表明双侧盖板加强斜加劲钢板剪力墙结构在承载能力和抗侧刚度方面比单侧盖板更为优良。

2.4 反复加载结果对比

2.4.1 滞回曲线对比

有限元模型在循环荷载作用下的滞回曲线如图 7 所示,可以看出试件滞回曲线<sup>[14-16]</sup>有以下特点:

(1)加载初期,试件的荷载-位移曲线呈线性关系,滞回环所包络面积小,整个试件处于弹性工作阶段,此时,内填剪力墙板处于平面受力状态,结构承载能力和初始刚度主要依靠墙板的剪切作用提供。承载力和初始刚度从大到小依次为 CSW-2,CSW-1,DSW,加强盖板对于斜加劲剪力墙的承载力和初始刚度有所改善,且双侧盖板加强效果优于单侧盖板加强。这是因为加强盖板在某种程度上减小了斜加劲肋的长细比,提高了斜加劲肋的刚度及结构的

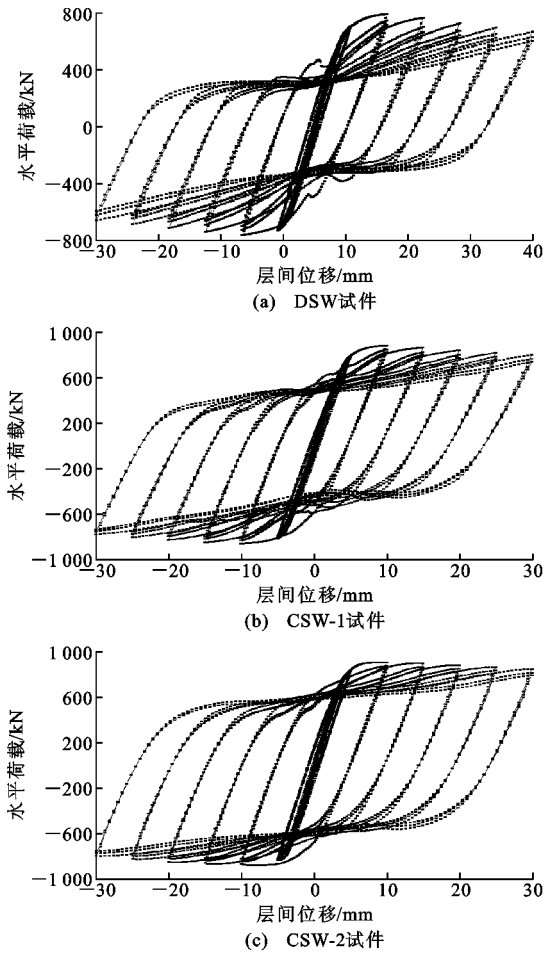


图 7 滞回曲线对比

Fig. 7 Comparison of Hysteresis Curves

抗侧刚度。

(2)随着加载位移的增大,试件的荷载-位移曲线出现非线性关系,滞回环面积增大,且向位移轴逐渐倾斜,呈梭形。此时内填钢板的受力机制逐渐发展为拉力场效应。滞回环面积从大到小依次为CSW-2,CSW-1,DSW,这是因为加强盖板的存在抑制了内填墙板的面外变形,对拉力带的形成具有抑制作用,且双侧盖板的加强效果更佳。

(3)加载后期,反向“零位移”附近的试件刚度退化明显,滞回环出现捏缩现象,模型DSW的刚度跃迁比模型CSW系列明显,相比于模型DSW,模型CSW系列滞回环更饱满。此时结构主要依靠拉力场机制承担水平荷载,加强盖板的存在使拉力带的发展受到限制,同时减小了加劲肋长细比,从而抑制了加劲肋整体屈曲,因此具有更优的耗能能力和塑性变形能力及较好的延性。

2.4.2 骨架曲线对比

骨架曲线<sup>[17]</sup>取循环荷载下荷载-位移曲线在各加载级的第1圈循环峰值点所连成的包络曲线,如

图8所示。

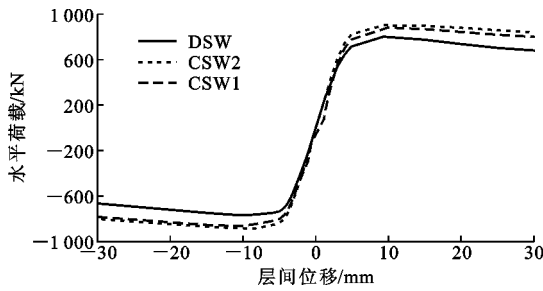


图 8 骨架曲线对比

Fig. 8 Comparison of Skeleton Curves

由图8可知:骨架曲线在推拉方向上具有良好的对称性,3个结构模型的初始刚度基本一致;在塑性阶段,试件的侧向承载力随着层间位移的增大而缓慢增长,这是因为钢材在经过屈服阶段后存在应变强化阶段;随着层间位移的进一步增大,试件的承载能力有所下降,较为平缓,这是因为随着试件的损伤累积,出现刚度退化,属于延性破坏。在整个加载过程中,相较于DSW试件,CSW系列试件的承载能力更强,刚度退化更为缓和,因此CSW系列试件的抗震耗能性能更优,且CSW-2抗震耗能性能优于CSW-1试件。

2.4.3 黏滞阻尼系数对比

等效黏滞阻尼系数 $h_e$ 为能量耗散的相对指标,结构的耗能能力越好,滞回环越饱和,黏滞阻尼系数 $h_e$ 越大, $h_e$ 按下式计算

$$h_e = \frac{S_{ABC+CDA}}{2\pi S_{\triangle OBE} + \triangle ODF} \quad (1)$$

式中: $S_{ABC+CDA}$ 为滞回环包络面积; $S_{\triangle OBE} + \triangle ODF$ 为滞回环的卸载段与横坐标轴所围成的三角形面积,如图9所示。

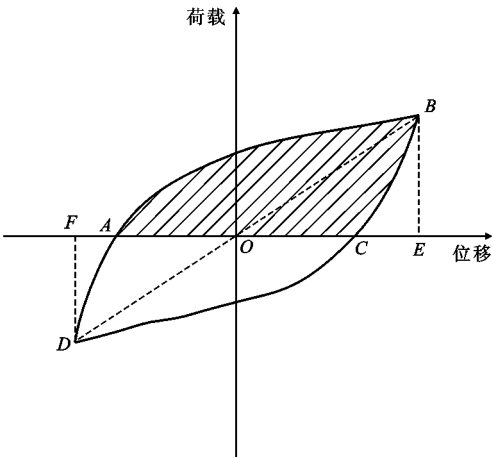


图 9 等效黏滞阻尼系数

Fig. 9 Equivalent Viscous Damping Coefficient

3 个试件的等效黏滞阻尼系数发展趋势如图 10 所示。通过对比可以发现:弹性阶段时,CSW 系列试件与 DSW 试件均表现出较好的弹性性能,且黏滞阻尼系数接近;随着荷载等级的增加,3 个试件逐级进入塑性,且黏滞阻尼系数随荷载增大不断增大,表现出试件良好的耗能能力。

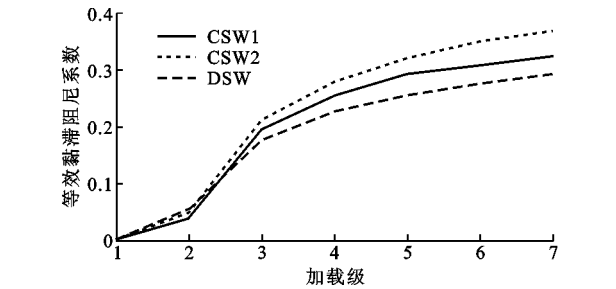


图 10 等效黏滞阻尼系数对比

Fig. 10 Comparison of Equivalent Viscous Damping Coefficients

进入塑性阶段后,CSW 试件黏滞阻尼系数大于 DSW 试件,这是由于加强盖板的存在使得加劲肋更加稳定,在反复加载过程中,试件斜向拉力带刚度较大,抑制了内填钢板面外变形,因此缓解了捏缩效应,内填钢板更为稳定,且 CSW-2 试件耗能能力较 CSW-1 试件更优。

### 3 屈曲性能对比

为了比较不同肋板刚度比  $\eta$  及不同加强盖板相似比  $k_c$  对结构弹性屈曲荷载<sup>[18-19]</sup>的贡献,选取未加劲薄钢板剪力墙 (USW)、斜加劲薄钢板剪力墙 (DSW) 及双侧盖板加强斜加劲薄钢板剪力墙 (CSW-2) 三种试件进行模拟对比。

#### 3.1 肋板刚度比对剪力墙屈曲荷载的影响

加劲肋的强弱变化具有引起内填钢板剪力墙屈曲形式改变的作用。肋板刚度比  $\eta$  反映斜加劲钢板剪力墙的加劲强弱程度,肋板刚度比取值越大,表明加劲肋对墙板的加劲程度越高。肋板刚度比  $\eta$  对钢板剪力墙屈曲系数  $K/K_0$  的影响如图 11 所示,其中,  $\lambda_s$  为加劲肋高厚比,  $\lambda_c$  为盖板高厚比。

随着肋板刚度比的增加,弹性屈曲系数不断增大,但增长速度逐渐缓慢。 $\eta \leq 10$  时,弹性屈曲系数近似呈线性增长,肋板刚度比的增大对屈曲系数提高明显,  $\eta > 10$  时,增长缓慢,  $\eta \geq 30$  时,增长趋于平缓,肋板刚度比的增大对屈曲系数的提高不显著。肋板刚度比过小时,无法对内填钢板提供足够面外约束,结构破坏形态表现为内填钢板整体屈曲;肋板刚度比过大时,可有效抑制内填钢板面外变形,结构

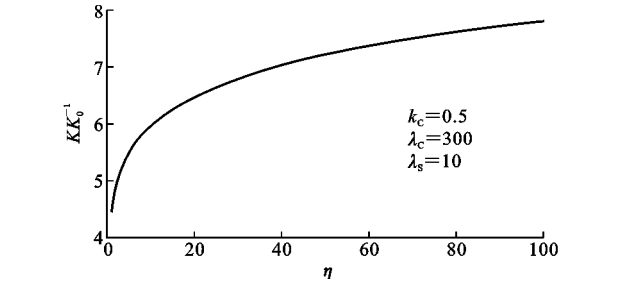


图 11 不同肋板刚度比下结构的弹性屈曲系数

Fig. 11 Elastic Buckling Coefficients of Structure with Different Stiffness Ratios of Stiffener Plate

破坏形态表现为内填钢板小区格内的局部屈曲,此时结构的弹性屈曲荷载不再由加劲肋控制,增大肋板刚度比会造成材料浪费,因此,选择合适的肋板刚度比具有重要的意义。

为进一步研究肋板刚度比对结构屈曲荷载的影响,设计 5 个不同肋板刚度比计算模型,不同肋板刚度比通过保证加劲肋高厚比的前提下调整加劲肋尺寸实现,该系列模型加劲肋高厚比  $\lambda_s$  为 10,盖板高厚比  $\lambda_c$  为 300,盖板相似比  $k_c$  为 0.5。得到不同肋板刚度比下 3 种试件的弹性屈曲荷载,如表 4 所示,其中屈曲荷载为导致剪力墙屈曲时施加在梁轴心方向的侧向力;加劲肋影响率为试件 DSW 相对于试件 USW 的弹性屈曲荷载增幅;盖板影响率为试件 CSW-2 相对于试件 DSW 的弹性屈曲荷载增幅。

表 4 不同肋板刚度比下结构的弹性屈曲荷载

Tab. 4 Elastic Buckling Loads of Structure with Different Stiffness Ratios of Stiffener Plate

$\eta$	弹性屈曲荷载/kN			加劲肋影响率/%	盖板影响率/%	加劲肋用钢量增幅/%	盖板用钢量增幅/%
	USW	DSW	CSW-2				
10	177.0	304.0	476.6	71.7	56.8	2.0	5.4
20		312.7	479.9	76.6	53.4	2.4	5.4
30		318.3	481.9	79.8	51.4	2.7	5.3
40		322.6	483.4	82.2	49.9	2.9	5.3
50		326.1	484.7	84.2	48.6	3.1	5.3

通过对比可以得知:相比于试件 USW,试件 DSW 加劲肋的存在使得弹性屈曲荷载增幅均超过 70%,最高达 84.2%,但用钢量仅占总体用钢量的 2%~3%,加劲肋对内填钢板的面外变形约束十分明显,是一种十分有效的加劲方式;随着屈曲荷载相对增幅由 4.9%减小至 2%,表明随着肋板刚度比的增加,钢材用量不断增大,而加劲肋加劲效果增幅先明显后减缓,为达到增加内填钢板屈曲荷载的同时节约钢材用量,本文建议肋板刚度比取 30~40。

相比于 DSW 试件,CSW-2 试件用钢量增幅在



5.3%左右,弹性屈曲荷载增幅非常明显,均在50%左右,且屈曲荷载增幅随着肋板刚度比的减小而增大,最小为48.6%,最大达56.8%,表明越是弱小的加劲肋,越容易发生屈曲,加强盖板作用越明显。为充分利用加强盖板作用,本文建议CSW-2试件肋板刚度比取30。

3.2 盖板相似比对屈曲荷载的影响

加强盖板在加载过程中具有防止加劲肋过早屈曲与限制面外变形的作用。盖板相似比 $k_c$ 为加强盖板与内填钢板几何尺寸比值, $k_c$ 取值越大,加强盖板对加劲肋的加强及墙板的面外约束作用越明显。盖板相似比 $k_c$ 对钢板剪力墙屈曲系数的影响如图12所示。由图12可以看出,盖板加强试件弹性屈曲系数均大于无盖板试件,同时随着盖板相似比 $k_c$ 的增大,其弹性屈曲系数近似呈线性增加。

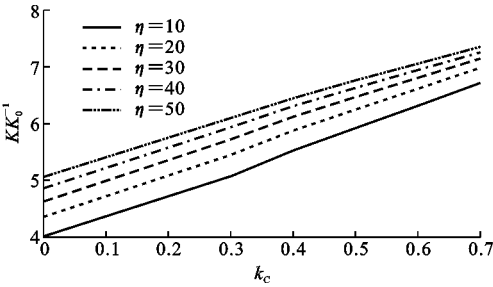


图 12 不同盖板相似比下结构的弹性屈曲系数  
Fig. 12 Elastic Buckling Coefficients of Structure with Different Similarity Ratios of Cover-plate

为进一步研究盖板相似比 $k_c$ 对CSW-2试件屈曲荷载的影响,设计6个不同盖板相似比的计算模型,不同盖板相似比通过保证盖板高宽比的前提下调整盖板的几何尺寸实现,该系列模型加劲肋高厚比 $\lambda_s$ 为10,盖板高厚比 $\lambda_c$ 为300。得到不同盖板相似比及肋板刚度比下各试件的弹性屈曲荷载,如表5所示。

在不同 $\eta$ 下,随着 $k_c$ 的增加,屈曲应力均有所增加, $\eta=20$ 时屈曲应力提高10%左右, $\eta=30$ 时屈曲应力提高8.5%左右, $\eta=30$ 时屈曲应力提高7.5%左右, $\eta=40$ 时屈曲应力提高6.5%左右, $\eta=50$ 时屈曲应力提高6%左右。这表明肋板刚度比越小,加劲肋约束效果越弱,盖板加强作用越明显,但是随着盖板尺寸的变大,用钢量呈现二次增长,为充分利用加强盖板作用同时节约钢材,需合理选取盖板相似比,本文建议CSW-2试件盖板相似比取0.5。

4 结 语

(1)单调加载条件下,加强盖板的存在提高了斜

表 5 不同盖板相似比下结构的弹性屈曲荷载

Tab. 5 Elastic Buckling Loads of Structure with Different Similarity Ratios of Cover-plates

$k_c$	屈曲荷载/kN				
	$\eta=10$	$\eta=20$	$\eta=30$	$\eta=40$	$\eta=50$
0.0	77.6	84.1	89.4	93.9	97.8
0.3	98.1	105.3	110.4	114.5	117.9
0.4	106.7	113.6	118.3	121.9	124.8
0.5	114.4	120.8	125.0	128.1	130.7
0.6	122.1	127.9	131.6	134.2	136.4
0.7	129.8	135.1	138.3	140.5	142.2

加劲钢板剪力墙的承载力和初始刚度,且双侧加强比单侧加强更优。

(2)循环加载条件下,加强盖板减小了加劲肋的长细比,增大了加劲肋刚度,限制了拉力带的形成,使得盖板加强斜加劲钢板剪力墙的滞回曲线更加饱满,具有更优的耗能能力和塑性变形能力;刚度退化更缓慢,表现出良好的延性,且双侧盖板加强效果比单侧加强效果明显。

(3)斜加劲肋对内填钢板的平面外变形具有明显约束作用,在增加很小的用钢量下能较大幅度地提高屈曲荷载,是十分有效的加强方式;加强盖板对加劲肋的平面外约束明显,在增加较小的用钢量下能大幅度增加试件的弹性屈曲荷载。

(4)结合加劲肋与加强盖板对结构弹性屈曲荷载的影响,本文建议肋板刚度比取30,盖板相似比取0.5。

参考文献:

References:

[1] MIMURA H, AKIYAMA H. Load-deflection Relationship of Earthquake-resistant Steel Shear Walls with a Developed Diagonal Tension Field[J]. Transactions of the Architectural Institute of Japan, 1977, 260:109-114.

[2] SHEKASTHEBAND 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.

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

[4] 王先铁,林麟琿,宋文俊,等. 竖向闭口槽钢加劲钢板剪力墙在非均匀压减作用下的屈曲性能[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.
- [5] 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.
- [6] WEI M W, RICHARD LIEW J Y, DU Y, et al. Seismic Behavior of Novel Partially Connected Buckling-restrained Steel Plate Shear Walls[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 103: 64-75.
- [7] 袁昌鲁,郝际平,樊春雷. 抗弯钢框架-密肋网格复合钢板墙抗侧力体系抗震性能理论与试验研究[J]. 土木工程学报,2016,49(1):42-52.
- YUAN Chang-lu, HAO Ji-ping, FAN Chun-lei. Test and Analysis on Seismic Behavior of Steel Frame with Multi-ribbed Grid Composited Steel Plate Shear Wall Structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(1): 42-52.
- [8] 郭彦林,周明. 钢板剪力墙的分类及性能[J]. 建筑科学与工程学报,2009,26(3):1-13.
- GUO Yan-lin, ZHOU Ming. Categorization and Performance of Steel Plate Shear Wall[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(3): 1-13.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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, 28.
- 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, 28.
- [12] 郭彦林,缪友武,董全利. 全加劲两侧开缝钢板剪力墙弹性屈曲研究[J]. 建筑钢结构进展,2007,9(3):58-62.
- GUO Yan-lin, MIAO You-wu, DONG Quan-li. Elastic Buckling Behavior of Stiffened Steel Plate Shear Walls Slotted at Two Edges[J]. Progress in Steel Building Structures, 2007, 9(3): 58-62.
- [13] 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 of Diagonal Stiffened Steel Plate Shear Walls[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2008.
- [14] 巩玉发,李闯. 斜加劲薄钢板剪力墙滞回性能模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2016,35(8):841-844.
- GONG Yu-fa, LI Chuang. Simulation of Hysteretic Behavior of Slanted Stiffened Steel Plate Shear Wall[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2016, 35(8): 841-844.
- [15] 王萌,杨维国. 薄钢板剪力墙结构滞回行为研究[J]. 建筑结构学报,2015,36(1):68-77.
- WANG Meng, YANG Wei-guo. Hysteretic Behaviors Study of Thin Steel Plate Shear Wall Structures[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(1): 68-77.
- [16] 王恒. 带缝钢板剪力墙性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2006.
- WANG Heng. The Analysis on the Behaviors of Steel Shear Wall with Slits[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2006.
- [17] 李然. 钢板剪力墙与组合剪力墙滞回性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- LI Ran. Hysteretic Behavior of Steel Plate Shear Walls and Composite Steel Plate[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [18] 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.
- [19] 赵伟,杨跃强,童根树,等. 钢板剪力墙加劲肋刚度及弹性临界应力研究[J]. 工程力学,2010,27(6):15-23.
- ZHAO Wei, YANG Qiang-yue, TONG Gen-shu, et al. Stiffener Stiffness and Elastic Buckling Stress of Steel Plate Shear Wall[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(6): 15-23.