

引用本文:王宇航,杨均德,梁艳来,等. 往复剪切荷载作用下双波形薄钢板的弹塑性屈曲行为[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(4):14-22.
WANG Yu-hang, YANG Jun-de, LIANG Yan-lai, et al. Elastic-plastic Buckling Behavior of Double-corrugated Thin Steel Plate Under Cyclic Shear Load[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(4): 14-22.

DOI:10.19815/j.jace.2019.12040

往复剪切荷载作用下双波形薄钢板的弹塑性 屈曲行为

王宇航¹, 杨均德¹, 梁艳来², 兰涌森³, 罗伟³, 邓然¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆工商职业学院, 重庆 401520;

3. 中国船舶重工集团海装风电股份有限公司, 重庆 401122)

摘要:为研究双波形薄钢板在达到或接近钢材屈服时的弹塑性屈曲行为,完成了4个不同螺栓间距的双波形薄钢板试件和1个单片波形薄钢板试件在往复剪切荷载作用下的拟静力试验。结果表明:设计合理的双波形薄钢板能够先达到全截面屈服抗剪承载力,然后在往复剪切荷载作用下交替发生弹塑性局部剪切屈曲,形成X形屈曲褶皱及撕裂裂缝而破坏;双波形薄钢板的极限抗剪承载力大于单片波形薄钢板的2倍,最大提高约18%;双波形薄钢板的滞回曲线表现出一定的“捏拢”现象,在其抗剪承载力达到峰值之后,随着滞回圈数的增加其抗剪承载力和卸载刚度退化明显,但其等效黏滞阻尼系数无显著下降;双波形薄钢板在剪切荷载作用下可分为弹性、弹塑性局部屈曲以及承载力退化3个工作阶段,由于波形钢板的“手风琴”效应,双波形薄钢板基本不具备屈曲后抗剪承载力,其极限抗剪承载力状态即为弹塑性局部剪切屈曲状态。

关键词:双波形薄钢板;弹塑性屈曲;拟静力试验;抗剪承载力;薄钢板剪力墙

中图分类号:TU973.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)04-0014-09

Elastic-plastic Buckling Behavior of Double-corrugated Thin Steel Plate Under Cyclic Shear Load

WANG Yu-hang¹, YANG Jun-de¹, LIANG Yan-lai², LAN Yong-sen³, LUO Wei³, DENG Ran¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Chongqing Technology and Business Institute, Chongqing 401520, China;

3. CSIC Haizhuang Wind Power Co., Ltd, Chongqing 401122, China)

Abstract: In order to research the elastic-plastic buckling behavior of double-corrugated thin steel plate upon reaching or approaching steel yield stress, the quasi-static tests of four double-corrugated thin steel plate specimens with different bolt spacings and one single-corrugated thin steel plate specimen subjected to cyclic shear load were completed. The results show that the rationally designed double-corrugated thin steel plate can reach the full-section yield shear capacity firstly, and then the double-corrugated thin steel plate undergo elastic-plastic local shear buckling alternately under cyclic shear load, forming X-shaped buckling folds and tearing cracks to destroy. The ultimate shear capacity of double-corrugated thin steel plate is more than twice

收稿日期:2019-12-12

基金项目:重庆市自然科学基金重点项目(cstc2019jcyj-zdxm0088)

作者简介:王宇航(1985-),男,重庆市人,教授,博士研究生导师,工学博士,博士后,E-mail:wangyuhang@cqu.edu.cn.

that of single-corrugated thin steel plate, and the maximum increase is about 18%. Hysteretic curve of double-corrugated thin steel plate shows a certain pinch phenomenon, and the shear capacity and unloading stiffness of double-corrugated thin steel plate degrade obviously with the increase of hysteresis number after the shear capacity reaches peak value, but its equivalent damping ratio does not decrease significantly. The double-corrugated thin steel plate can be divided into three working stages: elastic, elastic-plastic local buckling and shear capacity degradation. Due to the accordion effect of corrugated steel plate, the double-corrugated thin steel plate has not shear capacity increasing after buckling, and its elastic-plastic local shear buckling state can be defined as ultimate shear capacity state.

Key words: double-corrugated thin steel plate; shear capacity; elastic-plastic buckling; quasi-static test; thin steel plate shear wall

0 引言

随着城镇化进程的推进,高层建筑越来越多,高度越来越高,结构形式也不断发展。抗侧力构件对高层建筑结构的抗震性能至关重要,传统的钢筋混凝土剪力墙主要为结构提供抗侧刚度但延性较差,钢板剪力墙因具有优越的延性和消能减震功能得到了大量的研究和应用^[1]。

20 世纪 70 年代,美国、日本的学者首先提出平钢板剪力墙结构体系,并在实际工程中得到应用^[2]。研究表明^[1,3]:平钢板剪力墙因其面外刚度小,易发生平面外屈曲,导致滞回曲线捏缩严重,且强风或小震作用下,平钢板发生往复屈曲会产生较大的声响和振颤。此外,平钢板剪力墙在屈曲后通过斜向拉力带提供抗侧刚度,对框架柱产生较大的附加弯矩,导致框架柱的用钢量增加^[4]。针对平钢板剪力墙的不足,波形钢板墙、加劲钢板墙、防屈曲钢板墙等不同形式的钢板剪力墙结构被提出。

波形钢板剪力墙是一种极具发展潜力的抗侧力结构,其较大的平面外刚度能够有效抑制平面外屈曲,因此具有抗侧刚度大、屈曲承载力高以及对框架柱的附加弯矩小等优势^[5]。双波形钢板剪力墙是在波形钢板剪力墙的基础上提出的一种新型抗侧力构件,由 2 块完全相同的竖向波形钢板组合而成,2 块波形钢板之间通过螺栓进行连接使其协同工作,如图 1 所示。在受力性能方面,通过螺栓将 2 块波形钢板连接形成闭口截面,双波形钢板剪力墙的面外抗弯刚度和抗扭刚度均显著提升,因此其整体稳定性和抗侧刚度得到提高;在施工应用方面,由于冷弯成型工艺和钢板延性的限制,单片波形钢板剪力墙的厚度一般不超过 6 mm,而采用双波形钢板剪力墙时钢板厚度减小,更便于冷弯成型和焊接,同时能

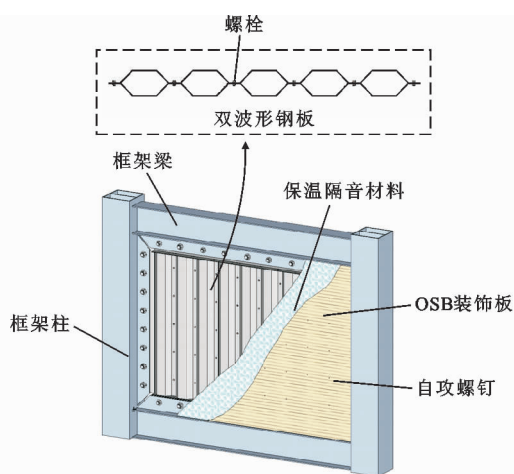


图 1 双波形钢板剪力墙

Fig. 1 Double-corrugated Steel Plate Shear Wall

扩大波形钢板的应用范围。此外,波纹沿竖向放置的双波形钢板剪力墙具有能够承担竖向荷载和面外弯矩、对边缘约束构件的依赖更小、滞回性能及屈服后承载力更加出色等优点^[6]。

国外对波形钢板抗剪性能的研究起步较早,Easley 等^[7-9]对波形钢板进行了大量的理论推导和试验研究,给出了波形钢板弹性剪切屈曲荷载计算公式。周绪红等^[10-11]对波形钢板剪切屈曲承载力计算公式进行了调整和完善。Emami 等^[12-13]对梯形波形钢板剪力墙进行了拟静力试验研究,并与平钢板剪力墙进行比较,结果表明波形钢板剪力墙的初始刚度、延性以及耗能性能有显著的提高,但由于“手风琴”效应的影响,其承载能力有一定的下降。王威等^[5]对梯形波形钢板剪力墙的波纹放置方向进行了试验研究,水平波形钢板剪力墙易发生边缘约束 H 型钢柱屈曲,竖向波形钢板剪力墙发生类似“拉压效应”的剪切变形破坏。谭平等^[6,14]对波形钢板剪力墙的抗震性能进行了试验研究,结果表明波

形钢板剪力墙实现了屈服后屈曲。Dou 等^[15-17]对正弦波形钢板、竖向加劲钢板以及双波形钢板进行了理论分析和有限元模拟,着重分析了上述形式钢板剪力墙的弹性整体屈曲性能及承载力。

目前,已有的研究主要集中于传统的单片波形钢板剪力墙,而对于双波形钢板剪力墙的研究较少。另外,关于波形钢板剪力墙的试验研究和理论分析都主要针对其整体剪切屈曲性能,而对于波形钢板剪力墙在纯剪荷载作用下的弹塑性局部剪切屈曲受力性能和工作机理尚缺乏相关研究。通过合理设计的波形钢板剪力墙具有较大的面外抗弯刚度,能够有效抑制平面外整体屈曲,使其先达到屈服强度而后发生弹塑性局部剪切屈曲破坏^[18]。

实际上,钢板剪力墙抗侧力结构体系中梁柱框架会参与工作,提供抗侧刚度和抗侧承载力,但本文研究针对剥离了框架影响的双波形薄钢板,为后续研究框架-双波形薄钢板剪力墙结构体系的整体抗震性能奠定基础。为了研究双波形薄钢板在接近或达到钢材屈服时的弹塑性屈曲行为,本文对双波形薄钢板进行了拟静力试验研究,分析了双波形薄钢板的弹塑性局部剪切屈曲工作机理。

1 试验概况

1.1 试件设计

为了单独研究双波形薄钢板的弹塑性屈曲行为,需要剥离框架的影响,因此本文采用了四边铰接的刚性框架加载装置,试件仅为内置钢板剪力墙,不包含边缘框架梁柱。试验共设计了 5 个钢板剪力墙试件,其中包括 4 个双波形薄钢板试件和作为对照的单片波形薄钢板试件。根据钢板宽厚比 λ 的大小,一般可将钢板剪力墙分为厚钢板剪力墙($\lambda < 250$)和薄钢板剪力墙($\lambda \geq 250$),本次试验中采用的钢板厚度 $t = 1$ mm,宽厚比 $\lambda = 880$,因此属于薄钢板剪力墙^[2]。波形钢板的波纹形式采用梯形波纹,波纹方向沿竖向布置,试件上下两端设置 T 形端板,分别采用角焊缝与波形钢板连接。波形钢板的截面参数如图 2 所示,其中, S 为斜板段长度,本次试验试件的截面参数为 $d_1 = 100$ mm, $d_2 = 50$ mm, $d_3 = 20$ mm,波高 $p = 50$ mm,波角 $\theta = 68.2^\circ$ 。4 个双波形薄钢板试件的主要变化参数为两单片波形薄钢板之间连接螺栓的间距及排数,螺栓型号为 M10,具体试件尺寸及螺栓参数见图 3 和表 1。

1.2 材性试验

钢板剪力墙钢材强度等级为 Q235,静力拉伸试

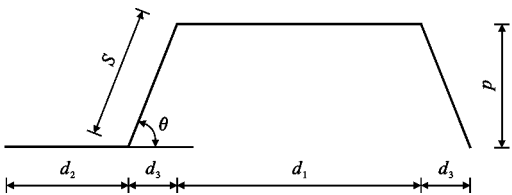


图 2 波形钢板的截面参数
Fig. 2 Section Parameters of Corrugated Steel Plate

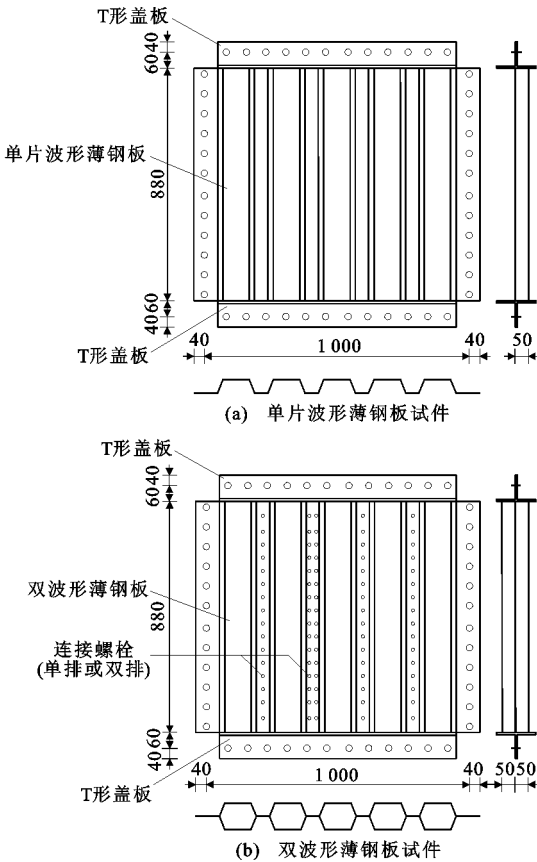


图 3 波形薄钢板试件示意图(单位:mm)
Fig. 3 Diagram of Corrugated Thin Steel Plate Specimens (Unit:mm)

表 1 试件主要设计参数

Tab. 1 Main Design Parameters of Specimens

试件编号	钢板剪力墙特征	螺栓连接排数	螺栓连接间距/mm
SCSP	单片波形薄钢板		
DCSP1	双波形薄钢板	单排	50
DCSP2	双波形薄钢板	单排	100
DCSP3	双波形薄钢板	单排	200
DCSP4	双波形薄钢板	双排	50

验采用板状试件,样胚按照《金属材料室温拉伸试验方法》的要求从母材中切取,试件样胚见图 4。每个试件按要求留 3 个材性试样,所有试样均在重庆大学材料实验室 WDW-100D 万能试验机上完成拉伸,得到各试件钢板的力学性能参数,见表 2。

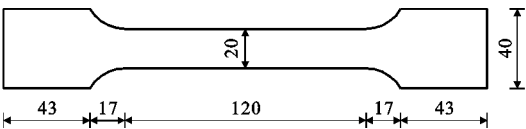


图 4 材性试样(单位:mm)

Fig. 4 Sample of Material Properties (Unit:mm)

表 2 钢材力学性能

Tab. 2 Mechanical Properties of Steel

试件编号	屈服强度 f_y/MPa	抗拉强度 f_u/MPa	弹性模量/ MPa
SCSP	176.7	282.2	194 832.5
DCSP1,DCSP2, DCSP3,DCSP4	198.1	323.8	197 298.1

1.3 试验方案及测点布置

试验在重庆大学土木工程学院振动台实验室进行,为了剥离实际钢板剪力墙抗侧力结构体系中梁柱框架对内置钢板剪力墙受力性能的影响,单独研究双波形薄钢板在纯剪切作用下的抗剪性能及屈曲破坏模式,设计了四边铰接框架剪切加载装置,铰接框架的梁柱刚度远大于钢板剪力墙的刚度,因此该加载装置可视为四边铰接的刚性框架,如图 5 所示。试件与框架之间采用高强摩擦型螺栓连接,对高强摩擦型螺栓施加合理的预拉力,以确保在加载过程中试件与铰接框架之间不会发生相对滑落。

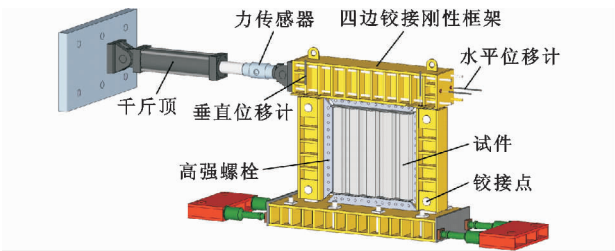


图 5 试验装置及测点布置

Fig. 5 Test Setup and Measuring Points Arrangement

本次试验通过液压伺服试验机对钢板剪力墙试件施加低周往复水平荷载以模拟横向地震作用。依据《建筑抗震试验规程》设计了本次试验的加载制度,采用位移控制的加载方式:每级荷载位移增量为 1.5 mm,屈服前每级荷载往复 1 次,屈服后每级荷载往复 2 次(根据试验现象及荷载-位移曲线走向确定试件是否屈服),加载至试件承载力下降至最大承载力的 85% 以下。为方便描述,规定靠近水平作动器一端为西侧,远离水平作动器一端为东侧。试验加载时先加推力,定义为正向加载(正东方向);然后施加拉力,定义为反向加载(正西方向)。

为了研究波形钢板的受力过程,试验采集了波

形钢板所承担的水平作用力、水平剪切位移以及顶梁两端的竖向位移,具体的测点布置如图 5 所示。

2 试验现象及破坏模式

单片波形薄钢板试件 SCSP 水平位移为 3 mm 时,试件南面两侧波形钢板波峰产生微小局部屈曲并发出“咚咚”的鼓曲声响,面外变形沿斜向延伸。水平位移为 7.5 mm 时,由于斜向主拉应力的作用,试件四角波形钢板与 T 形盖板之间的焊缝出现裂缝,并且裂缝逐渐沿钢板内部开展,在钢板四角出现撕裂裂缝。水平位移为 12 mm 时,试件南面波峰发生在鼓屈处。试件在往复剪切荷载作用下交替发生局部剪切屈曲,形成 X 形屈曲褶皱,由于钢材发生低周往复疲劳破坏,波形钢板沿褶皱产生撕裂裂缝,最终形成不规则的撕裂口。

双波形薄钢板试件 DCSP1, DCSP2, DCSP3, DCSP4 的受力过程与破坏阶段和试件 SCSP 大体一致。值得强调的是,较单波形薄钢板试件 SCSP 而言,由于双波形薄钢板试件通过螺栓连接形成闭口截面,其抗扭刚度显著提高,因此在局部剪切屈曲后其截面畸变发展相对更缓慢,叠合面局部屈曲时的加载位移更大。4 个双波形薄钢板试件之间的试验现象与破坏模式相似,但连接螺栓间距对叠合波形薄钢板的局部屈曲由波峰发展至波谷(叠合面)时的加载位移有一定影响。连接螺栓的间距越小,波谷(叠合面)发生局部屈曲时的加载位移越大;当使用双排螺栓连接时,波谷(叠合面)发生局部屈曲时的加载位移更大且平面外鼓曲变形更小。

所有试件均由于波形薄钢板发生弹塑性局部剪切屈曲而破坏,试件弹塑性局部屈曲及最终破坏形态如图 6 所示。

3 试验结果分析

3.1 标准化滞回曲线

由于本次试验各试件的钢材强度略有差别,为了便于对试验结果进行统一对比,对滞回曲线进行了标准化处理,将每个试件的试验荷载 F 除以单片波形薄钢板全截面剪切屈服承载力 $F_{y,s}$, $F_{y,s}$ 按式(1)计算。得到标准化后的剪力-剪切角($F-\gamma$)滞回曲线如图 7 所示。

$$F_{y,s} = \frac{f_y}{\sqrt{3}} l_w t_w$$

(1)

式中: f_y 为钢材拉伸屈服强度; l_w 为波形薄钢板名义宽度,即波折后的宽度; t_w 为单片波形薄钢板厚度。

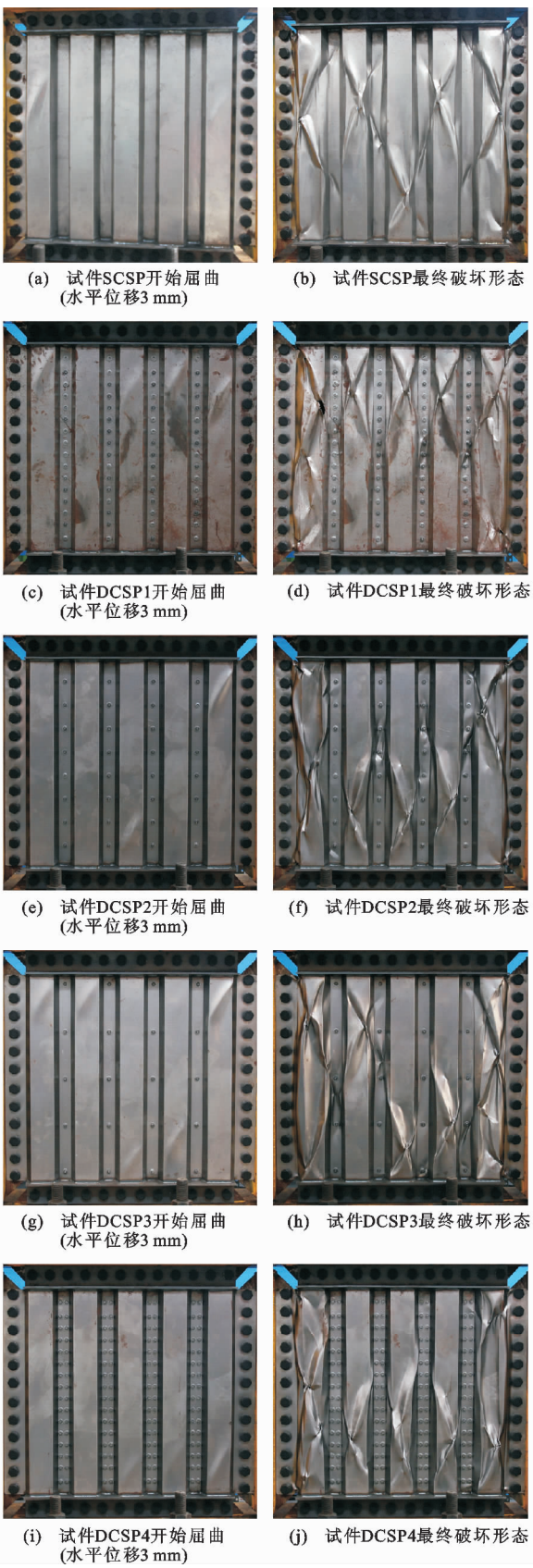


图 6 试件弹塑性局部屈曲及最终破坏形态

Fig. 6 Elastic-plastic Local Buckling and Failure Modes of Specimens

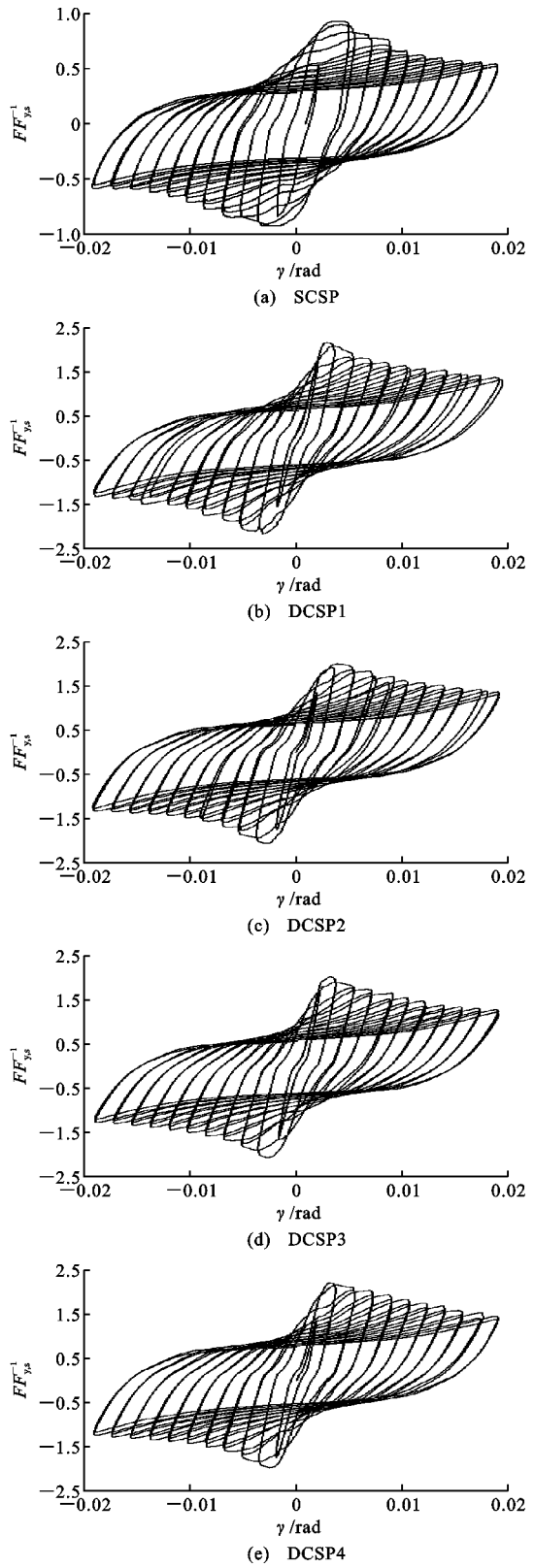


图 7 标准化剪力-剪切角滞回曲线

Fig. 7 Standardized Shear Force-shear Angle Hysteretic Curves

对比标准化后的滞回曲线,可以看出:①单片波形薄钢板试件 SCSP 和各双波形薄钢板试件的滞回

曲线形状大致相同,说明两者经历了同样的受力阶段;②各双波形薄钢板试件在纯剪荷载作用下滞回曲线均表现出一定的“捏拢”现象,在加载初期滞回曲线呈梭形,滞回环较饱满,随着加载位移增大,试件四角及局部屈曲褶皱处钢板的撕裂裂缝逐渐开展且双波形薄钢板截面畸变趋于严重,滞回环形状逐渐由梭形向弓形过渡,最后滞回环呈现出反 S 形,“捏拢”现象越来越明显;③各试件承受的剪力达到峰值之后,随着滞回圈数的增加其承载力和卸载刚度下降明显,表明双波形薄钢板试件在加载过程中的损伤对其承载力和卸载刚度有较大的影响。

3.2 标准化骨架曲线

根据标准化后的滞回曲线,提取出试件的标准化剪力-剪切角骨架曲线,如图 8 所示(2SCSP 曲线表示单片波形薄钢板 SCSP 曲线对应数值的 2 倍),采用基于荷载-位移骨架曲线的图解法^[19]确定试件的屈服点,极限剪切角 γ_u 取为剪力降至极限剪力的 85% 时所对应的剪切角,延性系数 μ 表示极限剪切角 γ_u 和屈服剪切角 γ_e 之比,根据骨架曲线提取出的各试件关键受力特征点数据,见表 3。

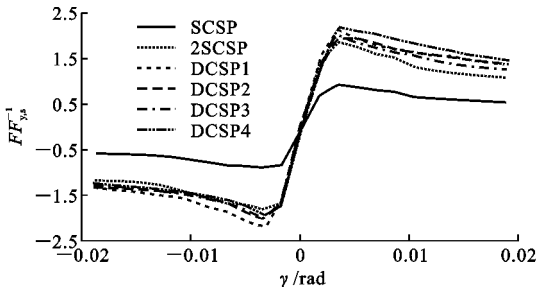


图 8 标准化剪力-剪切角骨架曲线

Fig. 8 Standardized Shear Force-shear Angle Skeleton Curves

从图 8 和表 3 可以看出:①所有试件的剪力-剪切角骨架曲线均呈 Z 形;②双波形薄钢板试件的屈服抗剪承载力和极限抗剪承载力均大于单片波形薄钢板的 2 倍,极限抗剪承载力最大提高约 18%;③对于双波形薄钢板试件,螺栓连接间距减小,其极限承载力略有提升但影响较小;④螺栓连接间距对双波形薄钢板剪力墙弹性阶段的工作性能基本没有影响,但在弹塑性局部屈曲发生之后,连接螺栓越密其承载力退化相对越慢,原因为连接螺栓间距越小,双波形薄钢板的抗扭刚度越大,截面畸变变形发展越缓慢;⑤试件 DCSP4 的剪力-剪切角骨架曲线不对称,可能由于加载装置存在摩擦等原因造成。

3.3 耗能能力

耗能能力为结构或构件吸收地震能量的能力大

小,良好的耗能能力有助于结构在大震作用下通过塑性耗能减小地震灾害,是评价结构或构件抗震性能的一项重要指标。耗能能力可以通过等效黏滞阻尼系数 h_e 来反映,等效黏滞阻尼系数越大说明构件耗能效果越好, h_e 按式(2)计算

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \Delta W / \left[\frac{1}{2} P_m \delta_m + \frac{1}{2} (-P'_m)(-\delta'_m) \right] \quad (2)$$

式中: ΔW 为一个加载循环内结构所耗散的能量,即滞回环所包围的面积; P_m, δ_m 分别为一个加载循环内正向加载到峰值点所对应的荷载幅值和位移幅值; P'_m, δ'_m 分别为一个加载循环内负向加载到峰值点所对应的荷载峰值和位移峰值。

试件各荷载级的耗散能量及等效黏滞阻尼系数 h_e 见表 4,双波形薄钢板试件等效黏滞阻尼系数 h_e 与循环圈数 n 的关系、累积耗散能量 E_n 与循环圈数 n 的关系分别见图 9 和图 10。对于双波形薄钢板试件,当试件发生弹塑性局部剪切屈曲后,随着荷载循环圈数的增加其等效黏滞阻尼系数稍有下降但幅度不大;双波形薄钢板的连接螺栓越密,其耗能能力略有提高。

4 双波形薄钢板工作机理

双波形薄钢板典型剪力-剪切角曲线如图 11(a) 所示,结合试验现象和试验结果分析,该曲线可分为弹性阶段(OA)、弹塑性局部屈曲阶段(AB)、承载力退化阶段(BD)三个工作阶段。

在弹性阶段,经过波折后的钢板剪力墙,板带的宽厚比大幅减小,因此其弹性屈曲承载力大幅提高,双波形薄钢板处于面内剪切的受力状态,剪力和剪切角呈线性关系,钢材处于弹性状态。随着剪切角增大至屈服剪切角 γ_e ,双波形薄钢板的钢材进入弹塑性应力状态并随剪切角的增大塑性逐渐发展,结合试验现象与骨架曲线,双波形薄钢板能够达到全截面剪切屈服承载力 F_y ,而后发生弹塑性局部剪切屈曲,同时其承载力达到峰值 F_u ,此即为双波形薄钢板的弹塑性局部屈曲阶段。在弹塑性局部剪切屈曲发生之前,双波形薄钢板均处于面内剪切受力状态,如图 11(b) 所示, τ 剪应力。当弹塑性局部剪切屈曲发生后,双波形薄钢板屈曲处第一主应力 σ_1 远大于第三主应力 σ_3 ,受力状态接近于单向受拉状态,如图 11(c) 所示。对斜向段而言,结构受到较大的面外拉力,因此双波形薄钢板截面迅速发生畸变,形成波形钢板的“手风琴”效应。当双波形薄钢板发生弹塑性局部剪切屈曲后其面外变形迅速增加且无

表 3 试件受力特征

Tab. 3 Mechanical Characteristics of Specimens

试件编号	方向	屈服荷载 F_e/kN	屈服荷载点 $F_e/F_{y,s}$	屈服剪切角 γ_e/rad	极限荷载 F_u/kN	极限荷载点 $F_u/F_{y,s}$	极限剪切角 γ_u/rad	延性系数 μ
SCSP	正向	80.7	0.79	1/399	94.7	0.93	1/133	2.99
	反向	86.3	0.85	1/512	91.8	0.90	1/112	4.55
	平均	83.5	0.82	1/448	93.3	0.91	1/122	3.68
DCSP1	正向	226.5	1.98	1/323	243.5	2.13	1/148	2.19
	反向	233.0	2.04	1/362	249.4	2.18	1/148	2.45
	平均	229.8	2.01	1/341	246.5	2.15	1/148	2.31
DCSP2	正向	213.5	1.87	1/308	221.8	1.94	1/100	3.07
	反向	209.2	1.83	1/424	230.0	2.01	1/157	2.69
	平均	211.3	1.85	1/357	225.9	1.98	1/122	2.91
DCSP3	正向	219.6	1.92	1/319	231.5	2.02	1/138	2.31
	反向	206.4	1.81	1/416	230.4	2.01	1/161	2.57
	平均	213.0	1.86	1/361	231.0	2.02	1/149	2.43
DCSP4	正向	249.9	2.18	1/268	251.1	2.20	1/102	2.62
	反向	205.8	1.80	1/465	220.9	1.93	1/165	2.82
	平均	227.8	1.99	1/340	236.0	2.06	1/126	2.70

表 4 试件耗能及等效黏滞阻尼系数

Tab. 4 Dissipated Energy and Equivalent Viscous Damping Coefficients of Specimens

加载级/ mm	SCSP		DCSP1		DCSP2		DCSP3		DCSP4	
	耗散能量/ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	h_e	耗散能量/ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	h_e	耗散能量/ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	h_e	耗散能量/ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	h_e	耗散能量/ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	h_e
1.5	0.170	0.195	0.122	0.064	0.133	0.072	0.122	0.059	0.145	0.079
3.0	0.742	0.372	0.897	0.201	0.906	0.210	0.957	0.220	0.945	0.211
4.5	0.986	0.410	3.583	0.305	3.443	0.304	3.261	0.305	3.510	0.307
6.0	2.536	0.421	4.388	0.306	4.349	0.306	4.093	0.298	4.406	0.299
7.5	2.523	0.385	5.288	0.310	5.118	0.307	4.968	0.307	5.312	0.301
9.0	2.798	0.387	5.970	0.301	5.689	0.299	5.548	0.300	6.018	0.297
10.5	3.010	0.377	6.453	0.300	6.413	0.300	6.157	0.298	6.748	0.298
12.0	3.217	0.371	7.264	0.300	7.137	0.297	6.720	0.297	7.493	0.300
13.5	3.417	0.362	7.719	0.290	7.709	0.294	7.227	0.292	8.131	0.304
15.0	3.677	0.353	8.140	0.292	8.402	0.290	7.745	0.288	8.652	0.306
16.5	3.802	0.339	8.714	0.288	8.687	0.283	8.283	0.285	9.048	0.298

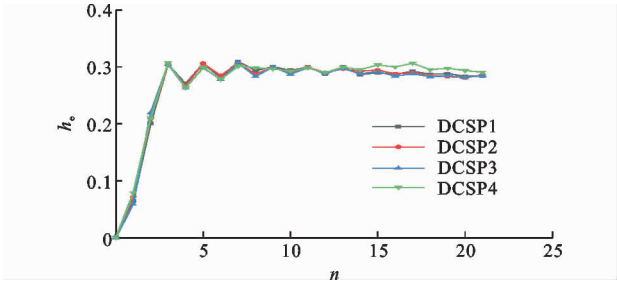


图 9 双波形薄钢板试件 h_e - n 关系

Fig. 9 h_e - n Relation of Double-corrugated Thin Steel Plate Specimens

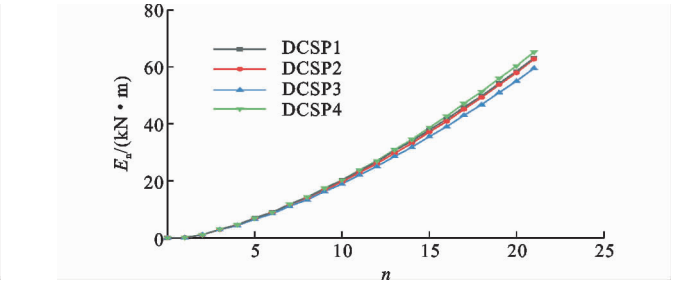


图 10 双波形薄钢板试件 E_n - n 关系

Fig. 10 E_n - n Relation of Double-corrugated Thin Steel Plate Specimens

法形成稳定的拉力带,因此其承载力迅速下降,双波形薄钢板进入承载力退化阶段。随着剪切角的增大,双波形薄钢板有被拉平的趋势,因此其抗剪承载力下降的趋势逐渐变缓。由以上分析及图 11(a)可

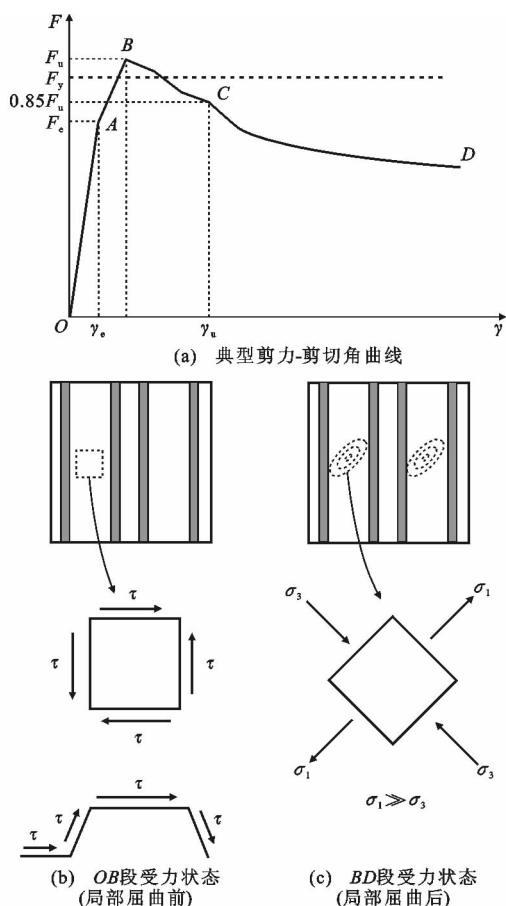


图 11 双波形薄钢板典型剪力-剪切角曲线及受力状态

Fig. 11 Typical Shear Force-shear Angle Curve and Stress State of Double-corrugated Thin Steel Plate

知,双波形薄钢板基本不具备屈曲后抗剪承载力,因此其极限抗剪承载力状态即为双波形薄钢板的弹塑性局部剪切屈曲状态。

由于连接螺栓的作用,双波形薄钢板的抗扭刚度及面外抗弯刚度大幅提高,使得其抗剪承载力大于单片波形薄钢板承载力的2倍。不同连接螺栓间距会影响双波形薄钢板的抗扭刚度和抗弯刚度,因此连接螺栓间距减小(或者增加排数),双波形薄钢板的抗剪承载力略有提高,但由于其破坏形式主要为波峰处发生弹塑性局部剪切屈曲,因此连接螺栓间距对抗剪承载力的影响较小。

5 结 语

(1)双波形薄钢板在往复剪切荷载作用下交替发生局部剪切屈曲,形成X形屈曲褶皱,最终由于弹塑性局部剪切屈曲而破坏。

(2)双波形薄钢板在加载初期滞回曲线呈梭形,但随着波形钢板撕裂裂缝和截面畸变变形的发展,滞回曲线表现出一定的“捏拢”现象,在其抗剪承载

力达到峰值之后,随着滞回圈数的增加,承载力和卸载刚度退化明显。

(3)双波形薄钢板的屈服抗剪承载力和极限抗剪承载力均大于单片波形薄钢板的2倍,极限抗剪承载力最大提高约18%,连接螺栓间距减小,其极限承载力略有提升,但在试验螺栓间距变化范围内影响不显著。

(4)双波形薄钢板在纯剪荷载作用下可分为弹性阶段、弹塑性局部屈曲阶段以及承载力退化阶段3个工作阶段,其抗剪极限承载力状态即为弹塑性局部剪切屈曲状态。

参考文献:

References:

- [1] 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.
- [2] 郭彦林,董全利. 钢板剪力墙的发展与研究现状[J]. 钢结构,2005,20(1):1-6.
GUO Yan-lin, DONG Quan-li. Research and Application of Steel Plate Shear Wall in High-rise Buildings[J]. Steel Construction, 2005, 20(1): 1-6.
- [3] 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.
- [4] 赵秋红,李楠,孙军浩. 波纹钢板剪力墙结构的抗侧性能分析[J]. 天津大学学报:自然科学与工程技术版,2016,49(增):152-160.
ZHAO Qiu-hong, LI Nan, SUN Jun-hao. Analysis on Lateral Performance of Sinusoidally Corrugated Steel Plate Shear Walls[J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2016, 49(S): 152-160.
- [5] 王威,张龙旭,苏三庆,等. 波形钢板剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2018,39(5):36-44.
WANG Wei, ZHANG Long-xu, SU San-qing, et al. Experimental Research on Seismic Behavior of Corrugated Steel Plate Shear Wall[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(5): 36-44.
- [6] 谭平,魏瑶,李洋,等. 波纹钢板剪力墙抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报,2018,51(5):8-15.
TAN Ping, WEI Yao, LI Yang, et al. Experimental Investigation on Performance of Corrugated Steel Plate

- Shear Wall[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(5): 8-15.
- [7] EASLEY J T, MCFARLAND D E. Buckling of Light-gauge Corrugated Metal Shear Diaphragms[J]. Journal of the Structural Division, 1969, 95(7): 1497-1516.
- [8] EASLEY J T. Buckling Formulas for Corrugated Metal Shear Diaphragms[J]. Journal of the Structural Division, 1975, 101(7): 1403-1417.
- [9] ELGAALY M, HAMILTON R W, SESHADRI A. Shear Strength of Beams with Corrugated Webs[J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(4): 390-398.
- [10] 周绪红, 孔祥福, 侯健, 等. 波纹钢腹板组合箱梁的抗剪受力性能[J]. 中国公路学报, 2007, 20(2): 77-82.
- ZHOU Xu-hong, KONG Xiang-fu, HOU Jian, et al. Shear Mechanical Property of Composite Box Girder with Corrugated Steel Webs[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(2): 77-82.
- [11] 聂建国, 唐亮. 基于弹性扭转约束边界的波形钢板整体剪切屈曲分析[J]. 工程力学, 2008, 25(3): 1-7.
- NIE Jian-guo, TANG Liang. Global Shear Buckling of Corrugated Steel Plates with Edges Elastically Restrained Against Rotation[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(3): 1-7.
- [12] EMAMI F, MOFID M, VAFAI A. Experimental Study on Cyclic Behavior of Trapezoidally Corrugated Steel Shear Walls[J]. Engineering Structures, 2013, 48: 750-762.
- [13] BERMAN J W, BRUNEAU M. Experimental Investigation of Light-gauge Steel Plate Shear Walls[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(2): 259-267.
- [14] 赵秋红, 邱静, 李楠, 等. 梯形波纹钢板剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(增2): 112-120.
- ZHAO Qiu-hong, QIU Jing, LI Nan, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Trapezoidally Corrugated Steel Plate Shear Walls[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(S2): 112-120.
- [15] DOU C, JIANG Z Q, PI Y L, et al. Elastic shear Buckling of Sinusoidally Corrugated Steel Plate Shear Wall[J]. Engineering Structures, 2016, 121: 136-146.
- [16] TONG J Z, GUO Y L. Elastic Buckling Behavior of Steel Trapezoidal Corrugated Shear Walls with Vertical Stiffeners[J]. Thin-walled Structures, 2015, 95: 31-39.
- [17] TONG J Z, GUO Y L, ZUO J Q. Elastic Buckling and Load-resistant Behaviors of Double-corrugated-plate Shear Walls Under Pure In-plane Shear loads[J]. Thin-walled Structures, 2018, 130: 593-612.
- [18] 姜文伟, 金华建, 孙飞飞, 等. 无屈曲波纹钢板剪力墙简化分析模型研究[J]. 建筑钢结构进展, 2019, 21(1): 61-71.
- JIANG Wen-wei, JIN Hua-jian, SUN Fei-fei, et al. Research on Simplified Analysis Models of Non-buckling Corrugated Steel Shear Walls[J]. Progress in Steel Building Structures, 2019, 21(1): 61-71.
- [19] 唐九如. 钢筋混凝土框架节点抗震[M]. 南京: 东南大学出版社, 1989.
- TANG Jiu-ru. Seismic Resistance of Joints in Reinforced Concrete Frames[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1989.