

文章编号: 1000-4750(2017)07-0021-09

不同参数下低屈服点钢剪切板耗能元件 受力性能试验研究

王宇航, 吴 强, 熊光亮

(重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘 要: 低屈服点钢剪切板耗能元件具有良好的耗能能力, 可以消耗输入结构中的大部分地震能量, 改善和提高结构的抗震性能。为了考察面外初始缺陷对低屈服点钢剪切板耗能元件屈曲后稳定性的影响, 开展了1个传统工字钢耗能元件和3个具有面外初始缺陷的低屈服点钢剪切板耗能元件的低周往复循环荷载试验, 重点考察了面外初始缺陷、耗能元件宽厚比和钢筋混凝土约束板对其受力性能的影响。研究表明: 面外初始缺陷对剪切板的受力性能影响较大, 钢筋混凝土约束板可有效抑制剪切板的面外局部屈曲变形, 翼缘板可有效抑制剪切板的整体扭转屈曲变形, 从而提高剪切板耗能元件的耗能能力。

关键词: 低屈服点钢; 剪切板耗能元件; 整体稳定; 局部屈曲; 耗能能力

中图分类号: TU392.4 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.07.0576

TEST STUDY ON MECHANICAL PROPERTIES OF SHEAR PANEL ENERGY-DISSIPATION COMPONENTS USING LOW YIELD POINT STEEL WITH DIFFERENT PARAMETERS

WANG Yu-hang, WU Qiang, XIONG Guang-liang

(School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Shear panel energy-dissipation components using low yield point steel have a good energy-dissipation capacity, and the seismic property of structures using shear panel energy - dissipation components can be effectively improved. In order to investigate the influences of out-of-plane imperfection on the energy - dissipation capacity of shear panel energy - dissipation components, a traditional I-shape steel energy - dissipation component and three shear panel energy - dissipation components with out-of-plane imperfection were designed for the low cycle loading tests. The out-of-plane imperfection, the width of shear panel and the reinforced concrete constraint plates were the main parameters. Test results showed that the out-of-plane imperfection had significantly influences on the behavior of shear panel energy - dissipation components, and the reinforced concrete constraint plates effectively improved the energy-dissipation capacity of shear panel energy - dissipation components. The global buckling and local buckling of shear panel dampers could be effectively prevented by the flange plate and reinforced concrete constraint plates respectively.

Key words: low yield point steel; shear panel energy-dissipation components; global stability; local buckling; energy-dissipation capacity

收稿日期: 2016-07-30; 修改日期: 2016-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508052); 国家重点研发计划项目课题一(2016YFC0701201)

通讯作者: 王宇航(1985—), 男, 重庆人, 研究员, 博士, 从事组合结构研究(E-mail: wangyuhang@cqu.edu.cn).

作者简介: 吴 强(1992—), 男, 重庆人, 硕士生, 从事钢结构耗能减震研究(E-mail: wuqiangcqu@qq.com);

熊光亮(1990—), 男, 重庆人, 硕士生, 从事钢结构耗能减震研究(E-mail: 823218912@qq.com).

阻尼器是一种利用阻尼特性来减缓机械振动及消耗动能的装置,可有效避免或减少强震作用对结构的破坏。众多学者已对各种耗能元件的性能展开了大量的研究,并在实际工程中得到推广应用。孔子昂、王涛、施唯^[1]等对 4 组弯曲单元宽厚比小于 5 的带缝钢板耗能元件进行了低周往复拟静力试验,研究表明:带缝钢板耗能元件具有稳定的平面内力学性能、低周疲劳性能和较强的耗能能力。邓开来、潘鹏^[2]设计了 5 个变截面软钢剪切耗能元件试件并进行了拟静力试验研究,研究表明:形状优化后的变截面软钢剪切耗能元件具有较强的低周疲劳性能。邓开来、潘鹏、苏宇坤等^[3-4]对开槽 U 型耗能元件进行拟静力试验研究,研究表明:合理设计的开槽 U 型耗能元件具有良好的耗能能力和低周疲劳性能。周云、吴从晓、邓雪松^[5]对由铅芯、粘弹性材料等组成的新型复和型阻尼器进行了滞回性能试验研究,研究表明:该种阻尼器具有较好的耗力、大变形能力和抗疲劳性能。Yohei Koike、Toshihisa Yanaka 等^[6]对桥梁结构中的低屈服点剪切板阻尼器进行了试验研究,重点分析了腹板加劲肋的消角方式对阻尼器的耗能性能的影响。试验结果表明:合理的消角方式有利于提高剪切板阻尼器的滞回耗能能力。剪切板耗能元件是利用钢板平面内产生剪切弹塑性变形以达到消能减震的目的。该类型耗能元件造价相对低廉^[7-8],但采用传统钢材制作的剪切板耗能元件在结构变形较小时的耗能能力有限^[9-11]。采用低屈服点钢制作剪切板耗能元件,能够确保在结构小变形时耗能元件发生屈服,进而耗散能量^[12]。与其他钢材相比,低屈服点钢材延性更好,耗能能力更强^[13-15]。低屈服点钢剪切板耗能元件在平面剪切的受力状态下,剪切板中的应力分布较为均匀,能够最大限度地发挥其耗能能力^[16]。图 1 中所示为常见的不同形式的剪切屈服型耗能元件。

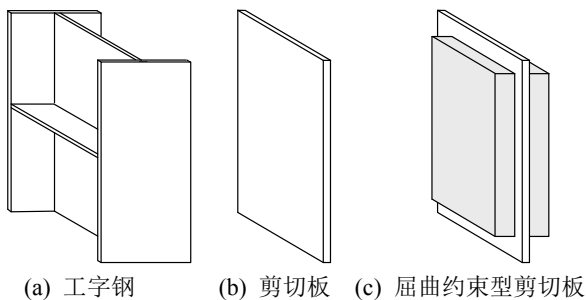


图 1 不同形式的剪切屈服型耗能元件

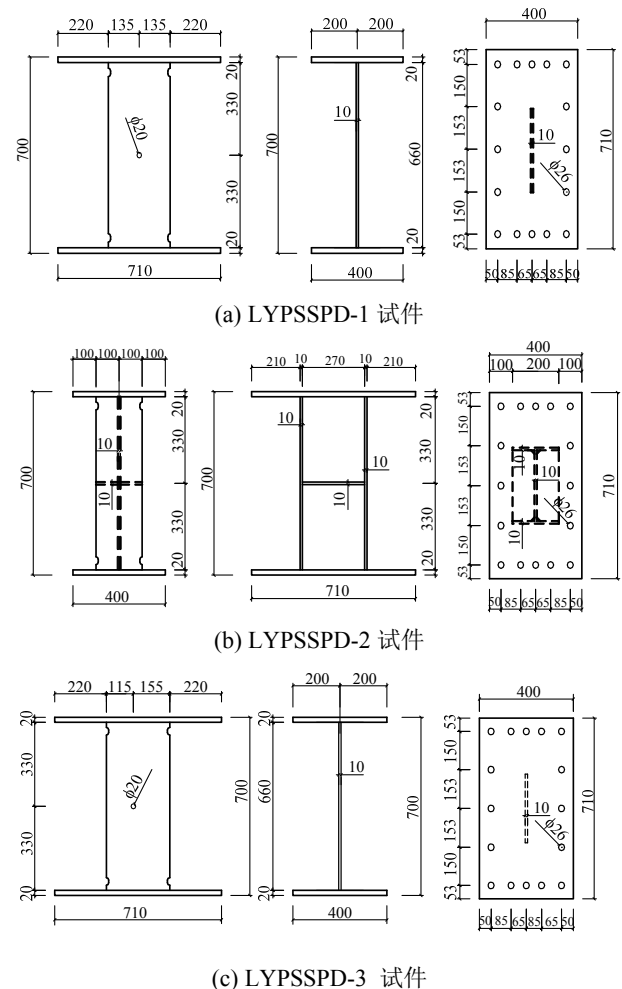
Fig.1 Different types of shear yielding Energy - dissipation Components

由于平钢板在剪切受力屈服后容易发生面外屈曲^[17],导致其承载力、延性和耗能能力大大降低,需要重点研究钢板平面外初始缺陷对剪切板耗能元件受力性能的影响。本文通过对低屈服点钢剪切板耗能元件进行低周往复循环荷载试验研究,重点考察剪切板耗能元件的面外初始缺陷、耗能元件剪切板宽厚比、钢筋混凝土约束板和翼缘板对其受力性能的影响,并给出了相应的性能评价和优化建议。

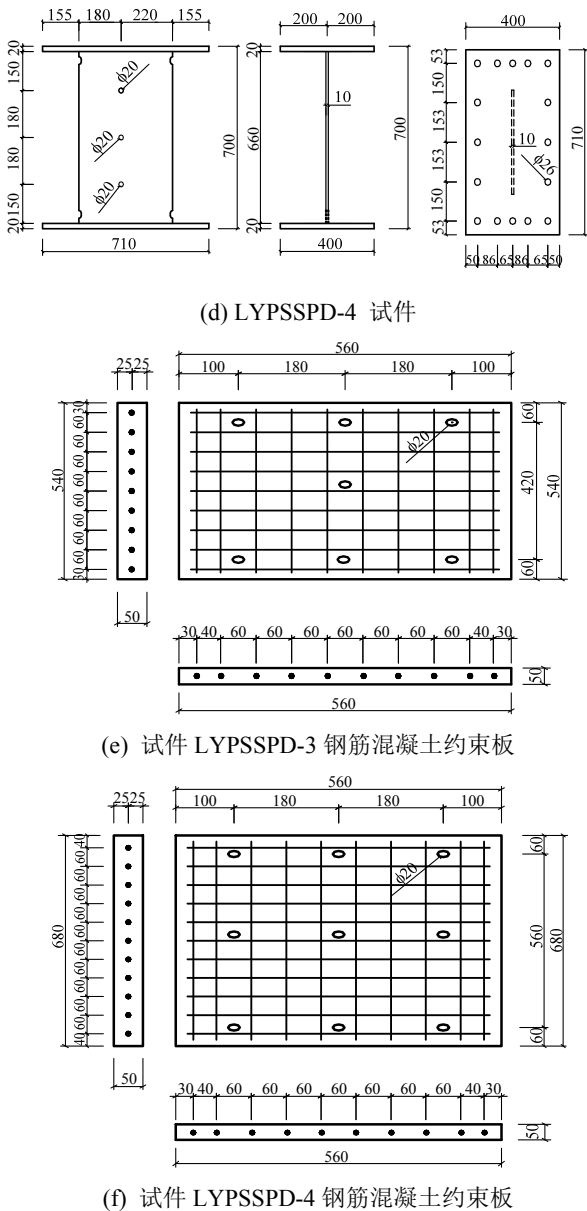
1 试验概况

1.1 试件设计

共设计了 4 个试件,包括 3 个平钢板剪切板耗能元件和 1 个传统工字钢耗能元件。2 个平钢板剪切板试件两侧采用钢筋混凝土板约束其面外变形,1 个纯钢板剪切板试件和传统工字钢耗能元件作为对比试件,其中试件 LYPSSPD-1 为纯钢板试件,试件 LYPSSPD-2 为传统工字钢耗能元件,试件 LYPSSPD-3 和 LYPSSPD-4 在钢板两侧设置钢筋混凝土约束板,用以约束剪切板中部区域的面外变形。所有试件的构造如图 2 所示。



(c) LYPSSPD-3 试件



(d) LYPSSPD-4 试件

(e) 试件 LYPSSPD-3 钢筋混凝土约束板

(f) 试件 LYPSSPD-4 钢筋混凝土约束板

图 2 试件构造详图

Fig.2 Construction detail of specimens

试件 LYPSSPD-2 的腹板、试件 LYPSSPD-1、LYPSSPD-3、LYPSSPD-4 均采用 LYP160 低屈服点钢材，试件 LYPSSPD-2 的翼缘板和加劲肋采用 Q345 钢材。钢筋混凝土约束板采用双面居中布置，其混凝土的强度等级为 C35。钢筋直径为 8 mm，强度等级为 HRB400，实测屈服强度值为 466 MPa。钢材的材料性能参数如表 1 所示，混凝土立方体抗压强度为 42.17 MPa。

表 1 钢材性能

Table 1 Material properties of steel

强度等级	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/(%)	弹性模量/MPa
LYP160	178.3	284.0	48.1	1.93×10^5
Q345	345.6	620.0	27.0	2.11×10^5

1.2 初始缺陷

为了考察面外初始缺陷对于低屈服点钢剪切板耗能元件屈服后稳定性能的影响，在制作试件时对 3 个平钢板剪切板耗能元件试件设置面外初始变形，如图 3 所示。在实际工程实践中，由于剪切板为平钢板，在生成、运输或安装过程中，经常产生不同程度的初始缺陷，将对剪切板的耗能能力尤其是屈服后的面外稳定性产生较大影响，因此本文以试验研究为基础，对有限数量的试件施加完全不同的初始条件，得到完全不同初始条件下剪切板的受力性能的实测数据。根据在试件实际加工和运输过程中所造成的初始缺陷确定试件 LYPSSPD-1、LYPSSPD-3、LYPSSPD-4 的初始位移偏移量 e 分别为 4 mm、9 mm、14 mm。

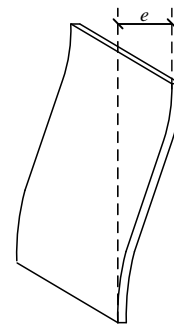


图 3 试件初始缺陷

Fig.3 Initial imperfection of specimens

1.3 加载装置

采用如图 4 所示的加载装置对耗能元件施加往复荷载。试件沿竖直方向放置，装置底座与地面通过地锚和止推挡板完全固定，试件下端板通过螺栓固定在底座上，上端板通过螺栓与顶梁固定。采用 1000 kN 的电液伺服作动器对顶梁施加水平荷载。顶梁和底座之间采用两个两端铰接的二力杆相连形成平行四边形约束机构，保证加载时试件两端没有转角。该装置能够模拟耗能元件在地震作用下受到的往复剪力作用。

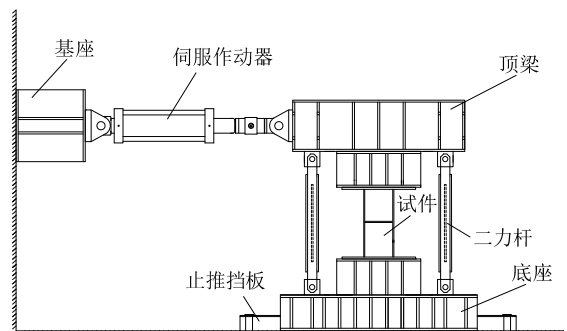


图 4 加载装置

Fig.4 Test setup

1.4 加载制度

所有试件均施加往复剪切荷载，根据试件两端的剪切角控制加载增量对试件施加循环荷载。为了考察耗能元件在同一剪切角荷载多次循环下的承载力和刚度退化特性，在 1/60、1/20 和 1/15 三个剪切角荷载等级下各循环 5 次。所有试件的具体加载历程图 5 所示。

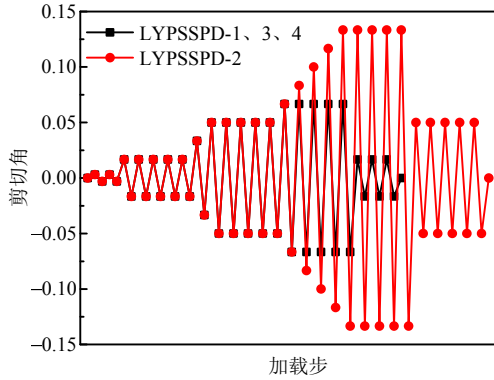


图 5 试件加载历程

Fig.5 Loading process of specimens

1.5 位移测量方案

所有试件均采用图 6 中所示的量测方案测量位移。采用位移计 2 和位移计 4 测量试件的水平位移，试件的水平位移取为位移计 2 和位移计 4 的平均值。由于加工误差等原因，顶梁可能产生微小的转动，因此采用位移计 1 和位移计 3 测量试件的竖向位移，根据两个位移计的位移差可以得到整个加载过程中顶梁的转角。

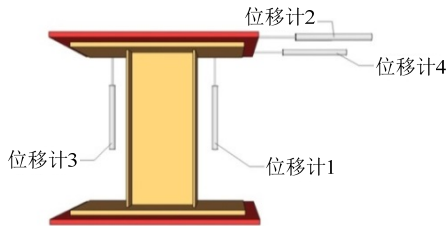


图 6 位移传感器布置图

Fig.6 Arrangement of displacement meters

2 破坏模式

试件 LYPSSPD-1 具有 4 mm 的面外初始缺陷，在弹性受力阶段，剪切板未发生明显的面外变形，但当剪切板剪切屈服后，由于剪切板两侧未设置钢筋混凝土约束板，发生了明显的面外屈曲变形和整体扭转，荷载达到峰值承载力后下降较快，滞回曲线捏拢效应明显。试件 LYPSSPD-2 的腹板在屈服后由于受到翼缘板和加劲肋的限制，面外屈曲位移明显减小，滞回曲线较为饱满，极限承载力较大。

试件 LYPSSPD-3 具有 9 mm 的面外初始缺陷，剪切板屈服后发生了整体扭转失稳，但由于在剪切板两侧设置了钢筋混凝土约束板，滞回曲线较试件 LYPSSPD-1 更为饱满。试件 LYPSSPD-4 的剪切板具有 14 mm 的面外初始缺陷，剪切板屈服后同样发生了整体扭转失稳，由于剪切板宽厚比加大，试件发生了整体顺时针方向的转动，滞回曲线也存在明显的捏拢效应，但极限承载力较试件 LYPSSPD-3 有明显提高。

所有试件的最终破坏形态如图 7 所示，剪切板试件最终的面外变形大小及分布模式如图 8 所示。

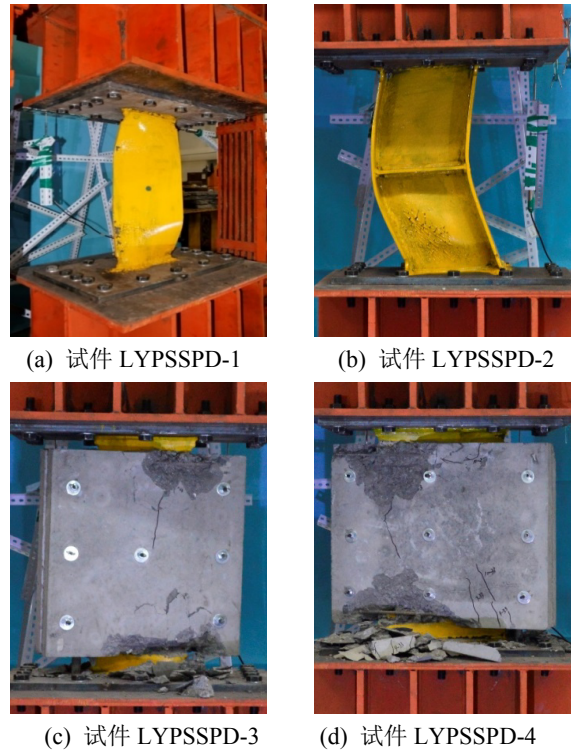
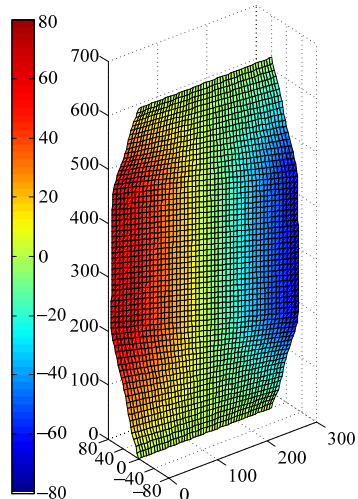


图 7 试件最终破坏形态

Fig.7 Failure modes of specimens



(a) 试件 LYPSSPD-1

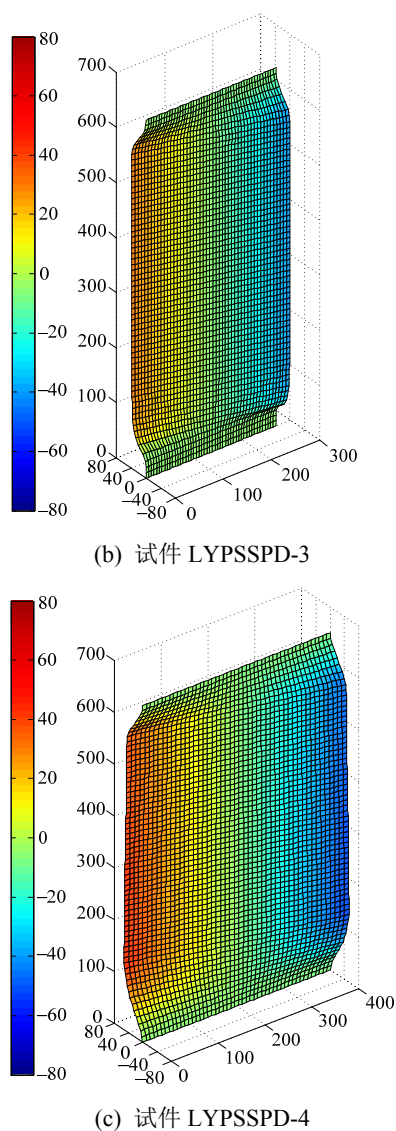


图 8 试件面外屈曲变形云图

Fig.8 Out-of-plane buckling deformations of specimens

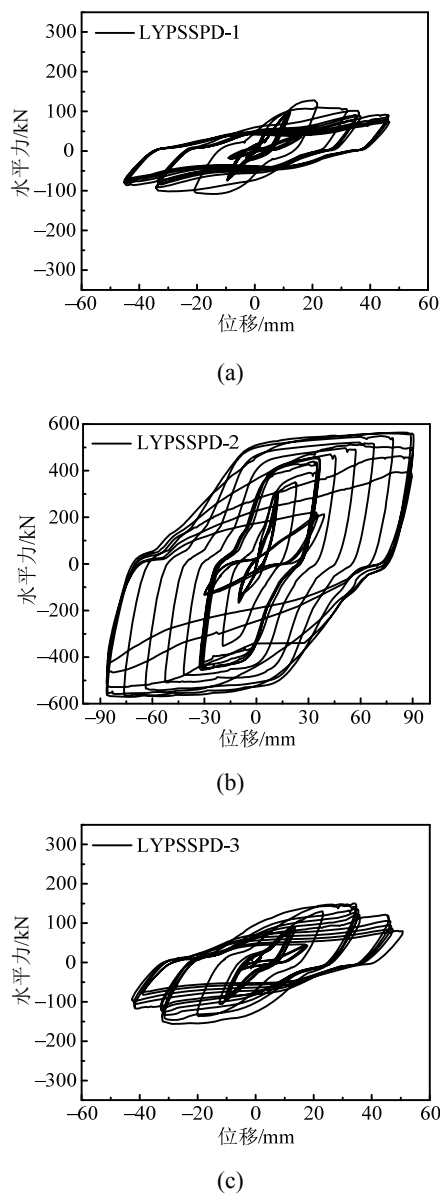
从最终破坏形态可以看出试件 LYPSSPD-1、LYPSSPD-3、LYPSSPD-4 发生的是整体扭转屈曲破坏，并且不是最初初始变形的形态，说明初始变形对最终的破坏形态影响较小，试件 LYPSSPD-2 发生的是弯曲破坏和板内的屈曲变形，焊接翼缘和加劲肋能够有效地抑制试件的面外屈曲变形和扭转，纯钢板的屈曲变形发生在四个角部，不会在中部发生屈曲。

从面外屈曲变形云图中可以看出，钢筋混凝土约束板可以减小钢板的面外屈曲扭转变形，同时改变了钢板屈曲变形位置，使之发生在无钢筋混凝土约束处。有钢筋混凝土约束的剪切板的面外变形与约束板大小有关，需进一步研究。

3 试验结果及分析

3.1 滞回曲线

各试件的水平力-位移滞回曲线如图 9 所示。试件 LYPSSPD-2 受到翼缘板和剪切板加劲肋的约束，其转动变形和面外屈曲现象不明显，滞回曲线非常饱满。试件 LYPSSPD-1、LYPSSPD-3、LYPSSPD-4 在屈服之前均未发生明显的面外变形，但由于其具有不同程度的面外初始缺陷，且在剪切板屈服后都出现了不同程度的整体扭转变形，其滞回曲线具有明显的捏缩现象。在剪切板两侧设置钢筋混凝土约束板和增大剪切板的宽厚比，可明显提高试件的承载力和降低滞回曲线的捏拢效应。



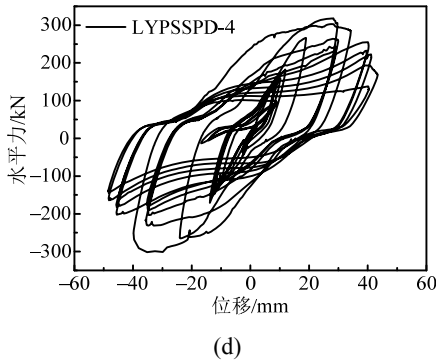


图 9 水平力-位移滞回曲线
Fig.9 Hysteretic loops between horizontal force and displacement

3.2 骨架曲线

图 10 所示为所有试件的无量纲化的骨架曲线。试件 LYPSSPD-2 的骨架线分为弹性段和强化段，最后一圈 88 mm 出现下降。试件 LYPSSPD-1、LYPSSPD-3、LYPSSPD-4 的骨架曲线分为弹性段、强化段和下降段。在弹性阶段，各试件均无明显面外局部屈曲和整体扭转屈曲变形，骨架曲线基本一致。当试件受剪屈服后，各试件的骨架线差别较大。试件 LYPSSPD-1 为纯钢板试件，屈服后最早出现面外屈曲变形和整体扭转，极限承载力最低；试件 LYPSSPD-3 由于设置了钢筋混凝土约束板，可有效

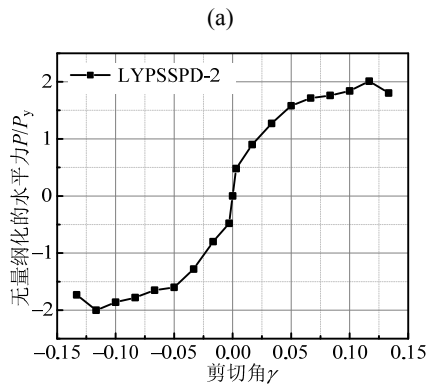
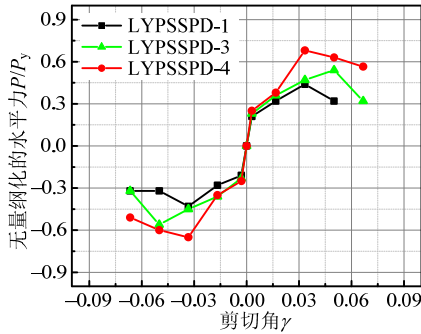


图 10 水平力-位移无量纲化骨架曲线
Fig.10 Non-dimensional skeleton curves of horizontal force versus displacement

抑制剪切板的面外局部屈曲变形，但由于缺乏翼缘板，在发生整体扭转失稳后承载力有所降低，但承载力与尺寸相同的试件 LYPSSPD-1 相比略有提高。试件 LYPSSPD-4 由于在试件 LYPSSPD-3 的基础上增加了剪切板的宽度，极限承载力明显提高，且发生整体扭转失稳后承载力下降较慢。

3.3 耗能能力

图 11 和图 12 所示为试件的单圈耗能和累积耗能随荷载循环圈数的变化规律，从图中可以看出，试件发生过大的面外屈曲和整体扭转变形之前，单圈耗能值随荷载循环圈数的增加而增大，但当试件发生整体扭转变形之后，单圈耗能有所降低。试件的累积耗能值始终随荷载循环圈数的增加而增大。

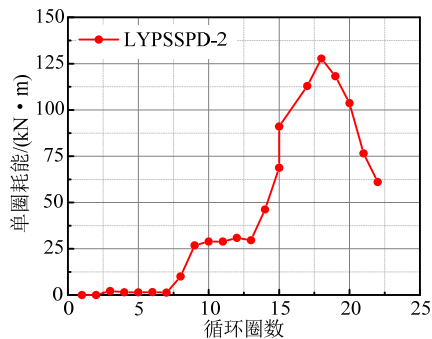
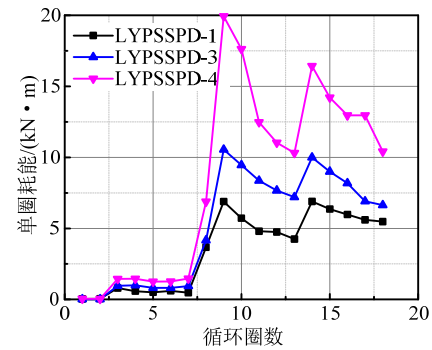
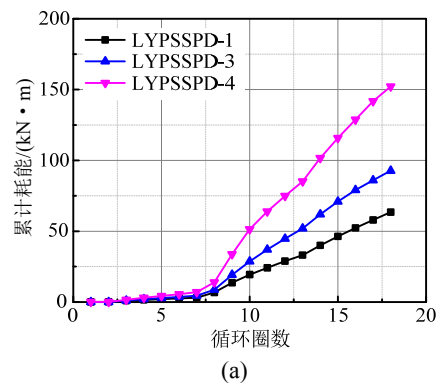


图 11 单圈耗能随循环圈数的变化
Fig.11 Energy-dissipation of lap changes along with loading cycle



(a)

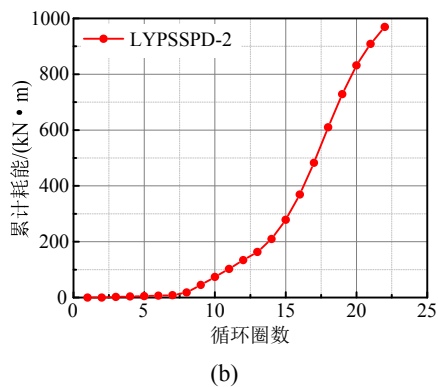


图 12 试件累计耗能对比

Fig.12 Comparison of cumulative dissipation energy of specimens

等效粘滞阻尼系数 h_e 为试件所耗散的能量与让等效弹性体产生相同位移需要输入的能量的比值, 可根据图 13 中所示的计算示意图, 按下式计算:

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \frac{A(FBE + FDE)}{A(AOB + COD)} \quad (1)$$

式中: $A(FBE + FDE)$ 表示单圈滞回曲线面积; $A(AOB + COD)$ 表示相应的三角形面积。

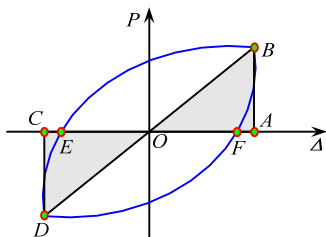


图 13 等效粘滞阻尼系数计算图示

Fig.13 Calculation diagram of equivalent viscous damping coefficient

图 14 所示为试件等效粘滞阻尼系数曲线随剪切角的变化规律, 从图中可以看出: 弹性阶段, 各试件的等效粘滞阻尼系数较为接近。当试件剪切屈服后, 试件 LYPSSPD-2 的等效粘滞阻尼系数持

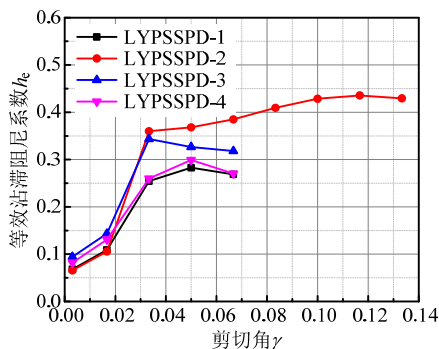


图 14 试件等效粘滞阻尼系数随剪切角的变化

Fig.14 Relations between equivalent viscous damping coefficient and shear angle of specimens

续增长且没有明显的衰减, 试件 LYPSSPD-1、LYPSSPD-3、LYPSSPD-4 的等效粘滞阻尼系数有所降低, 其中试件 LYPSSPD-1 由于没有设置钢筋混凝土约束板, 其等效粘滞阻尼系数最小, 表明试件的整体扭转屈曲对等效粘滞阻尼系数存在一定的影响。

3.4 多次循环承载力退化

如图 15 所示, 多次循环承载力退化是在某级荷载位移下, 峰值荷载随循环次数的增加而降低的现象, 可用多次循环承载力退化系数来表示, 其计算公式为:

$$\lambda_{i,n} = \frac{P_i^n}{P_i^1} \quad (2)$$

式中: $\lambda_{i,n}$ 为第 i 级位移荷载下第 n 次荷载循环的承载力退化系数; P_i^1 和 P_i^n 分别为第 i 级位移荷载下第 1 次和第 n 次循环曲线上的峰值点荷载。

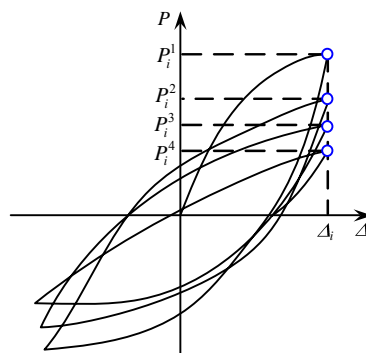
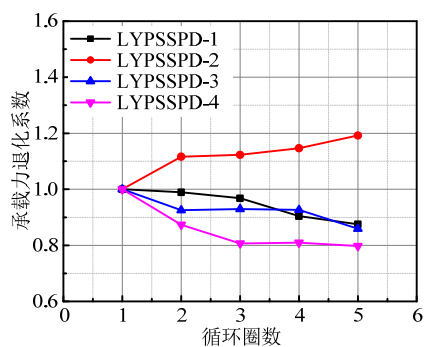


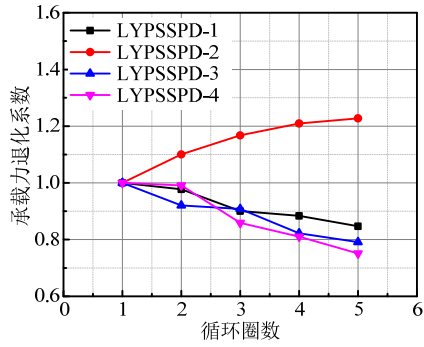
图 15 多次循环承载力退化的定义

Fig.15 Definition of degradation of multiple-cycle bearing capacity

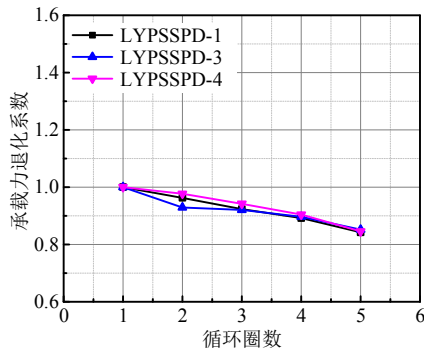
图 16 所示为不同位移荷载的多次循环承载力退化系数变化规律, 从图中可以看出, 在同一剪切角荷载等级下, 试件 LYPSSPD-2 的承载力随循环圈数的增加而增大, 表明试件的承载力一直处于强化状态, 但强化程度逐渐趋于稳定。试件 LYPSSPD-1、LYPSSPD-3 和 LYPSSPD-4 的承载力



(a) 剪切角 1/60



(b) 剪切角 1/20



(c) 剪切角 1/15

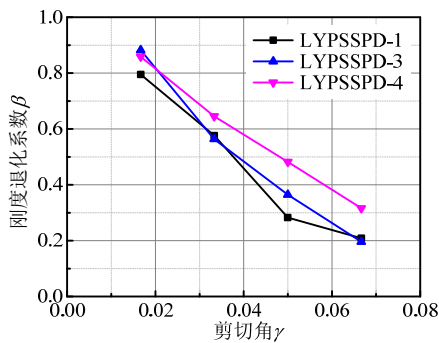
图 16 试件多次循环承载力退化系数变化规律

Fig.16 Variation of degradation coefficient of multiple-cycle bearing capacity

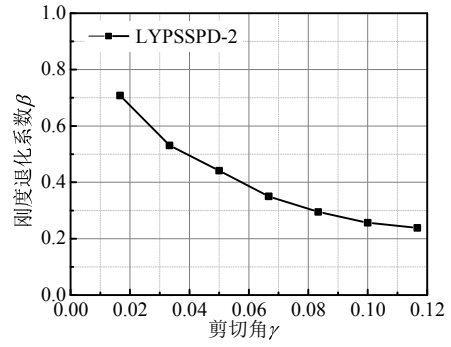
退化系数随循环圈数的增加而逐渐减小,表明试件在同一剪切角荷载等级下,整体扭转失稳变形逐渐增大,承载力逐渐降低。

3.5 刚度退化

循环荷载下的刚度退化一般采用割线刚度 K_i 与初始弹性刚度 K_0 的比值来表示,定义为刚度退化系数 β ,其值越小表示刚度退化越严重。图 17 给出了试件刚度退化系数随剪切角的变化规律,从图中可以看出,剪切板耗能元件的刚度退化曲线随着加载位移的加大而逐渐变缓,带有翼缘板约束的试件 LYPSSPD-2 的刚度退化曲线较为平缓,表明加劲肋和侧向翼缘板在一定程度上可以减缓耗能元件的刚度退化。



(a)



(b)

图 17 各试件的刚度退化曲线

Fig.17 Stiffness degradation curves of specimens

4 优化建议

从试验现象和结果分析中可以看出:试件 LYPSSPD-2 由于设置了翼缘板,加载过程中未发生整体扭转失稳,因而具有较好的耗能能力,但由于腹板两侧未设置钢筋混凝土约束板,腹板剪切屈服后发生了面外局部失稳,从一定程度上削弱了试件的承载力、刚度和耗能能力;试件 LYPSSPD-1 为纯钢板剪切板,缺少翼缘板和钢筋混凝土约束板,加载过程中同时发生了整体扭转失稳和面外局部失稳,在剪切板耗能元件两侧设置钢筋混凝土约束板的试件 LYPSSPD-3 和 LYPSSPD-4 在加载过程中发生了整体扭转失稳,但未发生面外局部失稳,耗能能力相比纯钢板剪切板试件 LYPSSPD-1 有所提高。因此,翼缘板可以防止剪切板耗能元件的整体失稳,钢筋混凝土约束板可以防止剪切板耗能元件的局部失稳。

将剪切板耗能元件应用于实际工程时,应同时设置翼缘板和钢筋混凝土约束板,同时为了节省材料用量和减少焊接工作量,可在剪切板压应力较大的端部局部设置翼缘板,如图 18 所示。

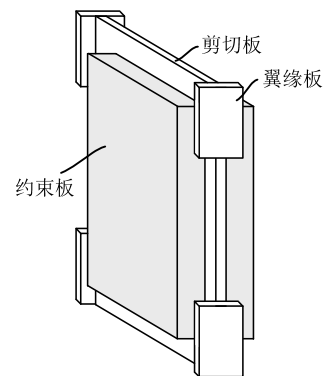


图 18 剪切板耗能元件的优化构造形式

Fig.18 Optimization form of shear panel energy-dissipation components

5 结论

本文对具有面外初始缺陷的低屈服点钢剪切板耗能元件开展了低周往复加载试验,通过试验现象及结果分析,可以得到以下结论:

(1) 面外初始缺陷的存在将明显降低剪切板屈服后的稳定性,导致剪切板耗能元件的承载力和延性大大降低,强度退化和刚度退化较为明显,在实际设计时应重点考虑面外初始缺陷对剪切板耗能元件耗能能力的不利影响。

(2) 设置加劲肋和翼缘板可以有效的防止剪切板面外屈曲变形和侧向扭转变形,提高剪切板的耗能性能;设置钢筋混凝土约束板可以约束整个约束板内钢板的变形,改变钢板屈曲的位置,有效减小滞回曲线的捏拢效应,提高剪切板的耗能性能;适当加大剪切板宽度可使滞回曲线更加饱满,有利于提高剪切板的耗能性能。

(3) 剪切板耗能元件随着加载位移的加大,其刚度呈现逐渐退化的趋势,在弹性阶段刚度退化较快,在弹塑性变形阶段刚度退化趋势逐渐变缓,加劲肋和翼缘板约束可以有效缓解刚度退化。在小位移循环加载时,剪切板耗能元件承载力逐渐增大。当加载位移逐渐加大后,剪切板耗能元件的承载力退化较为明显。

(4) 传统加劲肋只能约束钢板局部的变形,而钢筋混凝土约束板可以约束了整个约束板内钢板的变形,改变了钢板屈曲的位置,具有钢筋混凝土约束板的剪切板耗能元件在腹板角部易发生扭转屈曲,传统工字型钢具有通长的翼缘板可有效抑制剪切板的整体扭转屈曲,但较为浪费材料,可采用在剪切板两侧设置钢筋混凝土约束板和在剪切板角部局部设置翼缘板的方式来防止剪切板的耗能元件整体失稳和局部失稳,从而有效提高其屈服后承载力、延性和耗能能力,保证剪切板耗能元件在屈服后承载力能够持续强化,且耗能能力不断增加。

参考文献:

[1] 孔子昂,王涛,施唯.带缝钢板阻尼器受力性能试验研究[J].土木工程学报,2015,48(9):11-22.
Kong Ziang, Wang Tao, Shi Wei. Experimental study on mechanical properties of steel dampers with slits [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(9): 11-22. (in Chinese)

[2] 邓开来,潘鹏.变截面软钢剪切阻尼器试验研究[J].工程力学,2016,33(5):82-88.
Deng Kailai, Pan Peng. Experimental study of steel shear panel dampers with varying cross-sections [J]. Engineering

Mechanics, 2016, 33(5): 82-88. (in Chinese)

[3] Deng Kailai, Pan Peng. Shape optimization design of steel shear panel dampers [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 99(7): 187-193.

[4] 邓开来,潘鹏,苏宇坤,等.开槽U型金属屈服阻尼器横向性能试验研究[J].振动与冲击,2015,34(12):157-163.
Deng Kailai, Pan Peng, Shu Yukun. Experimental study on lateral performance of slotted U-shaped steel damper [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(12): 157-163. (in Chinese)

[5] 周云,吴从晓,邓雪松.铅粘弹性阻尼器的开发、研究与应用[J].工程力学,2009,26(12):80-90.
Zhou Yun, Wu Congxiao, Deng Xuesong. Development, research and application of lead viscoelastic damper [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(12): 80-90. (in Chinese)

[6] Yohei Koike, Toshihisa Yanaka, Tsutomu Usalill. An experimental study on developing high performance stiffened shear panel dampers [J]. Journal of Structure Engineering, 2008, 54(2): 73-82.

[7] 李玉顺,沈世钊.钢框架结构软钢阻尼器振动控制的试验及理论研究[J].建筑结构学报,2004,25(2):1-7.
Li Yushun, Shen Shizhao. Experimental and theoretical study on vibration control of steel frame attached with hysteretic dampers [J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(2): 1-7. (in Chinese)

[8] 吴斌.滞变型耗能减震体系的试验、分析和设计方法[D].哈尔滨:哈尔滨建筑大学,1998.
Wu Bin. Testing, analysis and design approaches of hysteretic energy dissipation systems [D]. Harbin: Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1998. (in Chinese)

[9] Yamaguchi Tanemi, Takeuchi Toru, Nagao Toshimichi. Seismic control devices using low-yield-point steel [R]. Nippon Steel Technical Report, 1998(77/78): 65-72.

[10] Masayoshi Nakashima. Strain-hardening behavior of shear panels made of low-yield steel: I-test [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 201(12): 1742-1749.

[11] Masayoshi Nakashima. Strain-hardening behavior of shear panels made of low-yield steel: I-model [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 201(12): 1750-1757.

[12] Matteis G D, Landolfo R, Mazzolani F M. Seismic response of MR steel frames with low yield steel shear panels [J]. Engineering Structures, 2003, 25(2): 155-168.

[13] 温东辉,宋凤明.低屈服点钢在建筑抗震设计中的应用[J].宝钢技术,2007(2):9-12.
Wen Donghui, Song Fengming. Application of low yield point steel in design of earthquake resistant buildings [J]. Technology of Baogang, 2007(2): 9-12. (in Chinese)

[14] Peter D, Ahmad M I, Ian G B. Cyclic response of plate steels under large inelastic strains [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(2): 156-164

[15] Chen S J, Jhang C. Cyclic behavior of low yield point steel shear walls [J]. Thin-Walled Structures, 2006, 44(7): 730-738.

[16] 王威,吕西林.低屈服点钢在结构振动控制中的应用研究[J].结构工程师,2007,23(6):84-93.
Wang Wei, Lü Xilin. Application of low yield point steel in control of structural vibration [J]. Structural Engineer, 2007, 23(6): 84-93. (in Chinese)

[17] 郭彦林,周明.非加劲钢板剪力墙结构分析等代模型研究[J].工程力学,2011,28(4):63-75.
Guo Yanlin, Zhou Ming. Research on analytical models for unstiffened steel plate shear walls [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(4): 63-75. (in Chinese)