

低屈服点钢剪切耗能板抗震性能试验

陈周熠^{1*}, 麦成林¹, 许志旭¹, 代堂珍¹, 黄 炜²

(1. 厦门大学建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005; 2. 厦门科思泰建筑科技有限公司, 福建 厦门 361000)

摘要: 鉴于目前对国产低屈服点钢材生产剪切板阻尼器的研究和应用还没有系统开展, 采用宝山钢铁股份有限公司自主研发生产的低屈服点钢 LYP160, 设计制作了 3 种不同尺寸的剪切板阻尼器, 开展其低周往复循环荷载试验, 并在试验基础上, 对影响剪切板耗能性能的因素进行了分析. 研究表明: 由国产 LYP160 制成的剪切耗能板在低周反复荷载作用下, 滞回曲线饱满, 具有良好的耗能性能; 经过合理设计和施工, 该剪切板可以作为消能阻尼器应用于实际工程.

关键词: 低屈服点钢; 剪切板; 耗能

中图分类号: TU 391

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2019)06-0916-06

近几十年来迅速发展的结构耗能减震技术, 通过在结构物的某些部位设置耗能装置所产生的各种弹塑性变形来耗散或吸收地震输入结构中的能量, 以减小主体结构地震反应, 达到减震制震的目的. 与传统的结构抗震设计方法相比, 结构耗能减震技术具有减震机理明确、减震效果显著、安全可靠、经济合理等优点^[1].

耗能减震装置是结构耗能减震技术的核心, 采用低屈服点钢板制作的剪切板阻尼器是诸多耗能减震装置中的一种. 剪切板阻尼器构造简单, 它是以低屈服点钢板为主体, 焊接左右翼缘板、上下端板及加劲肋板构成. 实际应用时, 将阻尼器安装在支撑系统上, 如图 1 所示, 在水平地震作用下, 通过支撑的作用将楼层的位移传给剪切板, 剪切板就会发生相对位移消耗地震输入的能量^[2-3]. 在设计地震荷载和风荷载作用时, 由于低屈服点钢具有屈服强度低、强度稳定、变形能力强的特点, 采用低屈服点钢制作的剪切板阻尼器会在主体结构发生塑性变形前首先进入屈服, 通过反复的剪切塑性滞回变形来耗散输入结构中的能量, 从而达到减震制振和保护主体结构的目的^[4-6].

剪切钢板阻尼器最早在 1988 年由日本的 Seki 等^[3]开始研制. 之后不少日本学者对低屈服点钢剪切板

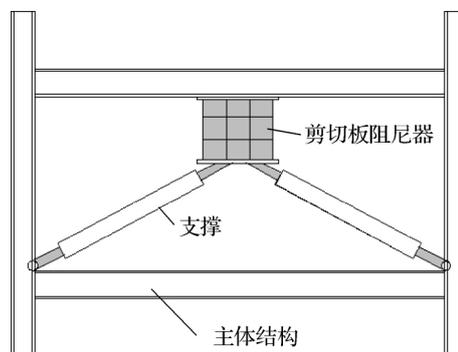


图 1 建筑结构中剪切板阻尼器示意图

Fig. 1 Application of shear plate damper in building structure

阻尼器开展了大量的试验和研究工作, 得出许多值得借鉴的结论和试验数据^[4-5], 并且成功应用到多层及高层结构中, 取得了良好的经济和社会效益. 在欧美一些发达国家, 对低屈服点钢剪切板阻尼器的研究和应用在 2000 年前后也逐步开展起来^[6]. 但在我国, 由于在 2008 年才由宝钢研制生产出低屈服点钢, 利用国产低屈服点钢材生产剪切板阻尼器的研究还没有系统开展, 已有的研究也主要集中在对低屈服点钢剪切板阻尼器开展相应的理论研究和有限元分析, 试验研究还开展得较

收稿日期: 2018-06-07 录用日期: 2018-07-17

* 通信作者: chenzy@xmu.edu.cn

引文格式: 陈周熠, 麦成林, 许志旭, 等. 低屈服点钢剪切耗能板抗震性能试验[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2019, 58(6): 916-921.

Citation: CHEN Z Y, MAI C L, XU Z X, et al. Experimental research on seismic performance of shear plate damper made by low yield point steel[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2019, 58(6): 916-921. (in Chinese)



<http://jxmu.xmu.edu.cn>

少^[7-9]. 因此,开展利用国产低屈服点钢材开发剪切板阻尼器的理论和试验研究,对于促进低屈服点钢剪切板阻尼器在我国的推广应用有重要意义.

本文中采用宝山钢铁股份有限公司自主研发生产的低屈服点钢 LYP160,设计制作了 3 种不同尺寸的剪切板阻尼器,开展其低周往复循环荷载试验,初步探讨了剪切板阻尼器的耗能减震性能.在试验基础上,对影响剪切板耗能性能的因素进行了分析,试图为国产低屈服点钢剪切板阻尼器的设计和工程应用提供一定的参考.

1 试验概况

1.1 试件设计

试件是以低屈服点钢板为主体,采用全熔透焊接法在其左右侧焊接翼缘板、上下侧焊接端板构成.为了便于与作动器进行连接,在上端板上部还加焊了一块钢板,共设计了 3 个试件(D1,D2,D3),具体构造如图 2 所示.左右翼缘和上下端板所使用的钢材为普通钢板 Q345B,核心腹板采用低屈服点钢 LYP160,试件钢材材料性能参数见表 1.试件设计主要考察剪切板的高宽比,具体试件尺寸及参数见表 2 和图 2.

1.2 试验加载装置

试验在厦门大学建筑与土木工程学院结构工程实验室完成,试件加载装置如图 3(a)所示.试件上方通过焊接在试件上端连接板上的连杆与安装在反力墙上的电液伺服作动器相连,实现其水平反复加载.试件下方由螺栓与加载底座相连,为尽量实现试件下端的完全固接,加载底座除通过地锚固定在实验室箱式试验台座上外,一端还延伸至加载作动器所在的反力墙,与该反力墙通过螺栓紧固连接.此外,为了确保试件在加载过程中不出现过大的平面外侧移,如图 3(b)所示,在试件上端的两侧还设置了侧向支撑,侧向支撑通过侧向滚轴与试件接触,可以减小和消除侧向支撑对试件在加载方向移动的影响.

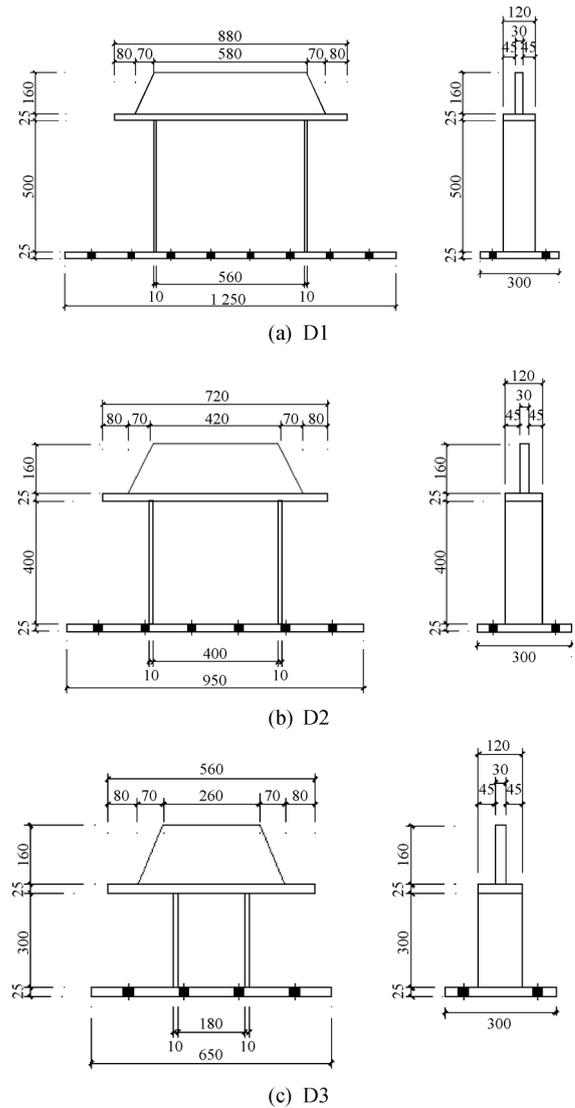


图 2 试件详图(单位:mm)

Fig. 2 Construction detail of specimens(unit:mm)

表 1 试件所用钢材的基本材料力学性能参数

Tab. 1 Mechanical properties of steel used for specimens

钢号	弹性模量/ 10 ⁵ MPa	屈服强 度/MPa	极限强 度/MPa	延伸率/ %
BLY160	1.9	123	262	56.8
Q345-B	2.1	365	556	29.8

表 2 试件主要参数及屈服荷载

Tab. 2 Main parameters and yield load of specimens

试件编号	核心板尺寸(高× 宽×厚)/mm	高宽比	屈服荷载计算值 F_{yc}/kN	屈服荷载试验值 F_{yT}/kN	F_{yc}/F_{yT}
D1	500×560×10	0.9	398	346	1.15
D2	400×400×10	1.0	284	223	1.27
D3	300×180×10	1.7	128	104	1.23

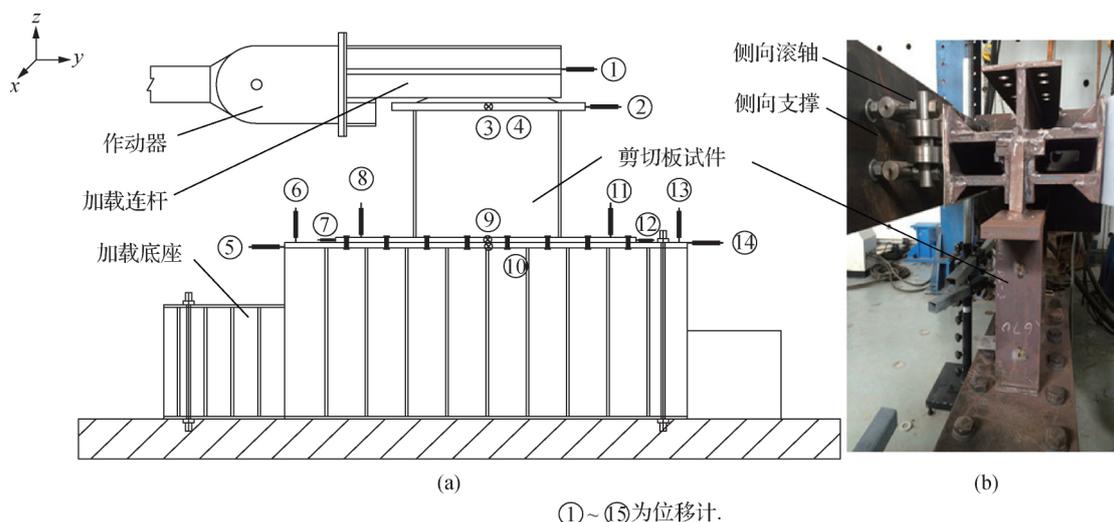


图 3 试件加载测试装置示意图(a)和实物照片(b)

Fig. 3 Diagrammatic sketch (a) and picture (b) of load and test setup

1.3 试验测试方案

试验中位移计的布置如图 3(a)所示,主要用于测量试件、加载连杆以及加载底座等的位移情况. 其中,位移计②用于监测试件上下端板的水平(y)相对位移;位移计⑧和⑪用于监测试件上下端板两端的竖向(z)相对位移;位移计③和④用于监测试件核心钢板顶部的平面外(x)位移;位移计⑨用于监测试件核心钢板底部的平面外位移;位移计⑦和⑫用于监测试件下端板的水平绝对位移;位移计①用于监测加载连杆的水平绝对位移;位移计⑥和⑬、⑤和⑭以及⑩则分别用于监测加载底座在竖向、水平及平面外等 3 个方向的位移. 试件加载的荷载值则直接选用电液伺服加载作动器的测试荷载值,由加载系统控制器将该作动器的实时荷载和位移的信号一并输出,与前述各位移计数值一道,由 DH3820 高速应变测试采集系统同步采集.

1.4 试验加载制度

试验中 3 个试件均采用力-位移混合控制的水平反复加载制度. 试件屈服之前,根据估算屈服荷载,采用荷载控制并分级加载. 屈服位移主要通过实时观测采集系统测试得到的荷载—试件上下端板相对位移曲线确定,结合预估屈服荷载,将曲线斜率变化的控制点选取为试件屈服点.

试件屈服之后采用位移控制,根据前述方法确定的屈服位移 δ ,每级位移加载幅值按 $\pm 1\delta$ 、 $\pm 2\delta$ 、 $\pm 4\delta$ 、 $\pm 6\delta$ 、 $\pm 8\delta$ 进行,每级加载反复 2 次;此后,位移加载幅值在 $\pm 10\delta$ 下反复循环 30 次直至试件破坏.

2 试验结果及分析

2.1 试验滞回曲线及试件破坏形态

D1 试件的滞回曲线如图 4(a)所示,纵坐标为作动器输出荷载值,横坐标为试件上下端板相对位移值. 图中坐标以作动器水平推方向为正,水平拉为负. 在荷载控制加载阶段,初步确定试件 D1 的屈服位移 δ 为 1.5 mm;此后,在以 2δ 、 4δ 、 6δ 、 8δ 位移控制逐级加载的过程中,水平荷载随位移的增大稳定增长,核心板没有发生明显可见的鼓曲和变形;之后加载到 10δ ,计划在此位移下循环 30 圈,当进行到第 3 圈水平推方向加载时核心板对角线的中部位置开始呈现轻微的鼓曲变形; 10δ 位移的加载前期,从滞回曲线可知试件还处于循环硬化阶段,滞回曲线饱满;此后,随着循环圈数的增加,鼓曲变形逐渐加大,并沿着对角线扩展延伸,到第 10 圈时对角线中部鼓曲已趋严重,对角线相邻两侧则出现反方向鼓曲;循环到第 11 圈时,远离作动器一侧的翼缘中部开始明显向内弯曲,到第 15 圈时趋于严重;此时,峰值水平承载力开始下降,相应的滞回曲线开始出现一定的捏缩现象;对应加载到第 29 圈时,核心板的鼓曲变形已非常严重,但此时的峰值荷载下降值还不是很大;最后在 30 圈加载到水平拉方向 10δ 位移时,峰值荷载由 700 kN 急速跌落至 473 kN,卸载后试验终止(在图 4(a)中,为了清晰展示试件在加载到 10δ 位移第 30 圈破坏时的曲线特征,特意隐去了试件在 10δ 位移此前 1~27 圈大部重叠的曲线). D1 试件最后的破坏形态如图 4(b)所示.

D2 试件的滞回曲线如图 5(a)所示. 在初始荷载

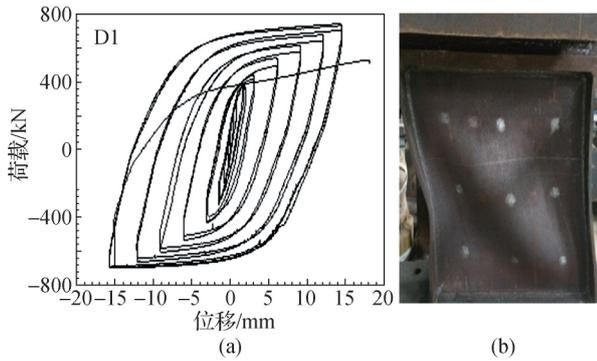


图 4 D1 试件滞回曲线(a)及破坏形态(b)
Fig. 4 Hysteresis curve (a) and failure pattern (b) of specimen D1

控制加载阶段确定屈服位移 δ 为 1.4 mm; 在 10δ 位移的第 4 圈循环加载前, 核心板都没有出现可见鼓曲和变形, 承载力随加载位移增大也持续上升; 在 10δ 位移第 5 圈开始出现轻微鼓曲现象; 此后, 随着循环圈数的增加, 鼓曲变形逐渐加大, 并沿着对角线扩展延伸, 加载至第 14 圈时, 核心板鼓曲范围已延伸至大半个核心板, 向外鼓曲最大值达到 5 cm; 加载至第 16 圈末时, 两边翼缘出现轻微弯曲变形; 至第 19 圈末时, 左侧翼缘底部出现明显的弯曲, 并在左侧翼缘底部与核心板连接的地方出现一个小孔; 这一圈反向荷载峰值较之前一圈下降较多, 约为 45 kN; 在此之前的 10δ 位移加载, 每圈荷载峰值较上一圈均下降不多; 到达 21 圈反向加载时, 刚度减小较快, 荷载峰值也较上一圈下降 70 kN, 观察试件后发现左侧翼缘底部已经开裂, 卸载后试验终止。整个试验阶段, 滞回曲线形状呈饱满的梭形。同一级别位移幅值循环中的两圈滞回曲线形状基本上重合, 试件在破坏前呈现出非常稳定的耗能性能。D2 试件的最终破坏形态如图 5(b) 所示。

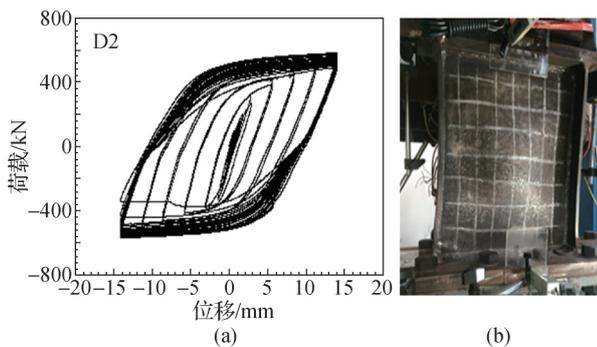


图 5 D2 试件滞回曲线(a)及破坏形态(b)
Fig. 5 Hysteresis curve (a) and failure pattern (b) of specimen D2

试件 D3 的滞回曲线如图 6(a) 所示。初始以荷载控制加载, 屈服位移 δ 判定为 1.2 mm; 之后以屈服位移 δ 的倍数逐级增加循环加载, 加载至 10δ 时, 荷载持续增长, 试件稳定, 无可见变形; 根据试验现场情况, 之后的加载调整为每级循环增加 2δ 继续加载, 到达 20δ 时, 远离作动器端的翼缘开始出现比较大的弯曲, 但核心板仍无可见鼓曲变形, 荷载继续上升; 直到进入 26δ 第一圈反向加载时, 试件左侧翼缘下部断裂, 试验结束, 此时观测到试件核心板中部有轻微鼓曲。从试验曲线看, 该试件滞回环丰满, 无捏缩。试件的最终破坏形态如图 6(b) 所示。

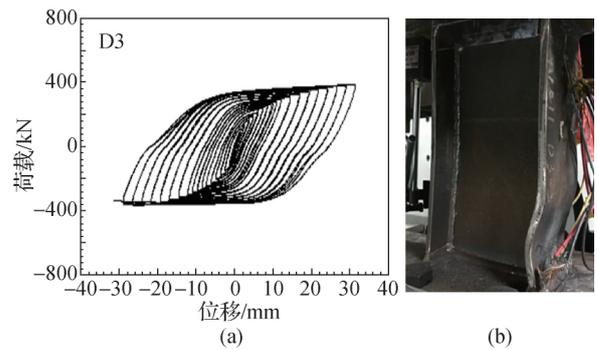


图 6 D3 试件滞回曲线(a)及破坏形态形态(b)
Fig. 6 Hysteresis curve (a) and failure pattern (b) of specimen D3

从上述 3 个试件的结果可知, D1 的水平承载力值最高, 耗能性能好; 在 $\pm 10\delta$ 下反复循环次数达到 30, 能满足实际应用对抗疲劳性能的需求; 但由于其面积大, 且高宽比较小, 核心板较易发生大的面外屈曲变形。D2 高宽比为 1, 试件在 10δ 循环下的滞回环丰满, 耗能稳定, 只是由于翼缘焊缝开裂, 导致其在 21 圈过早破坏退出工作。D3 的高宽比很大, 试件虽然在破坏前的水平位移很大, 达到了 24δ , 但试件承载力较低, 耗能小, 其破坏形态实质上属于弯曲破坏的类型。

应用板壳稳定理论对理想纯剪切矩形薄板的屈曲分析, 给出了其临界剪应力的表达式^[10-11]一般为:

$$\tau_{cr} = k \frac{\pi^2 D}{h^2 t}, \quad (1)$$

式中: k 为剪切屈曲系数, D 为弯曲刚度, h 为板高, t 为板厚。采用不同方法计算给出的 k 值虽略有不同, 但其大小都是随着板的高宽比的增大而增大。因此本次试验中 3 个剪切板试件的稳定性随高宽比的增大而增强, 与板壳理论关于理想矩形薄板的屈曲分析结果得出的变化趋势一致。结合本次试验 3 个试件的试验结果, 科思泰建筑科技公司将生产的第一批剪切板阻尼器的高宽比选取为 1, 如图 7 所示。

<http://jxmu.xmu.edu.cn>



图 7 低屈服点钢剪切板阻尼器

Fig. 7 Low yield point steel shear plate damper

2.2 骨架曲线

D1、D2 和 D3 试件的骨架曲线如图 8 所示. 由图可知, 3 个试件的骨架曲线均由弹性、弹塑性和塑性强化 3 个阶段构成. 依照 D1、D2 和 D3 的顺序, 试件的初始刚度依次递减, 承载能力(阻尼力)逐次降低, 塑性强化程度逐渐减弱. 说明在厚度相同的情况下, 高宽比越小, 试件的初始刚度越大, 承载能力越强, 塑性强化程度越高.

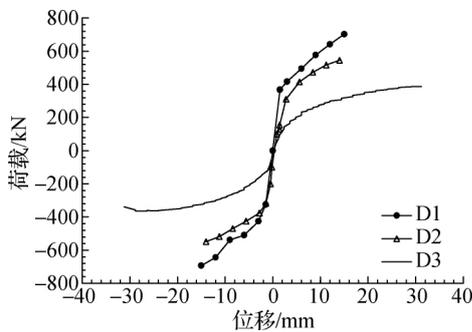


图 8 骨架曲线

Fig. 8 Skeleton curves

2.3 等效黏滞系数

等效黏滞阻尼系数 h_e 反映了滞回曲线的饱满程度, h_e 值越大, 滞回曲线越饱满, 试件的耗能能力就越强. 等效黏滞阻尼系数按下式计算:

$$h_e = \frac{E_{DS}}{2\pi E_s}, \tag{2}$$

式中: E_s 表示最大的应变能, 具体计算方法为各级反复荷载下最大位移处的位移与对应的力的乘积除以 2; E_{DS} 表示滞回阻尼的耗能大小, 即各级反复荷载滞回曲线所包围的面积.

图 9 为各试件在不同荷载等级时的等效黏滞阻尼系数曲线, 横坐标采用各级荷载最大位移所对应的剪切角 γ , 各荷载等级循环均取同一级别的第二圈滞回曲线来计算. 由图 9 的 $h_e-\gamma$ 曲线可知, 各试件随着 γ 的增加, h_e 增大, 构件的耗能能力持续增强. 在相同的

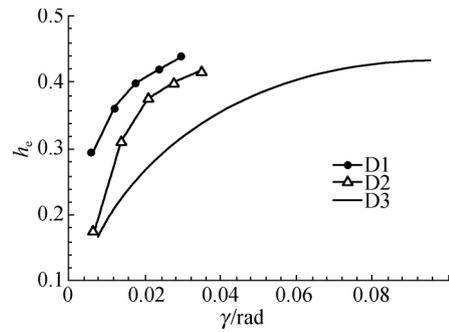


图 9 各试件等效黏滞系数曲线

Fig. 9 Equivalent viscosity coefficient curves of each specimen

剪切角下, 各试件的 h_e 大小为 $h_{eD1} > h_{eD2} > h_{eD3}$, 表明各试件的耗能能力依次降低. 现行抗震规范规定钢筋混凝土框架结构和多高层钢结构的弹性层间位移角限值分别为 1/550 和 1/250, 因此, 为了充分发挥剪切板阻尼器的减震效果, 应该使其在剪切变形接近剪切角 0.02~0.04 rad 时就需具备较强的耗能能力. 由图 9 可知, 试件 D1 和试件 D2 能够满足该项要求, 但试件 D3 的耗能能力要在较大的剪切角下才得到提升, 说明高宽比很大的剪切板不适合作为阻尼器.

2.4 剪切屈服荷载

如果忽略弯曲应力影响, 剪切板处于纯剪状态, 则由 Mises 屈服准则可以得到剪切耗能板平面内的剪切屈服力为:

$$F_y = \frac{f_y}{\sqrt{3}}tb, \tag{3}$$

式中, b 为耗能核心板的宽度, t 为厚度, f_y 为低屈服点钢的屈服强度. 据此计算出试件的剪切屈服荷载, 一并与对应的试验值填写在表 2 中, 各试件的计算值与试验值的误差在 20% 左右, 误差产生的主要原因应该是计算中忽略了弯曲应力的影响, 并且试验中对剪切板试件的水平加载也很难实现完全的纯剪方式加载.

3 结 论

本文中采用宝钢集团研发的低屈服点钢 LYP160, 制作了 3 个剪切板试件开展其低周反复荷载试验, 得出以下结论:

1) 由国产 LYP160 制成的剪切耗能板在低周反复荷载作用下, 滞回曲线饱满, 具有良好的耗能性能. 试验结果表明, 经过合理设计和施工, 由国产 LYP160 制成的剪切耗能板可以作为消能阻尼器应用于实际工程.

2) 试件在厚度相同的情况下, 高宽比是影响构件

性能的重要参数.高宽比接近1的构件具有稳定的耗能性能,滞回性能良好;高宽比过大时构件则转为受弯破坏,不能有效地发挥阻尼器的抗剪性能.

3)当试验核心板的高宽比小于1时,容易发生较大的面外屈曲从而使其耗能性能降低,在进行此类阻尼器的设计时应设置加劲肋;同时试验中部分试件出现由于焊缝的质量及翼缘的强度不足导致的破坏,在今后设计中也应该进一步加强.

参考文献:

- [1] 周云.金属耗能减震结构设计[M].武汉:武汉理工大学出版社,2006:1-14.
- [2] 陈之毅,葛汉彬,宇佐美勉,等.反复荷载作用下剪切板阻尼器的抗剪极限强度[J].沈阳工业大学学报,2011,33(2):219-225.
- [3] SEKI M, KATSUMATA J, UCHIDA H, et al. Study of earthquake response of two-storied steel frame with y-shaped braces [C] // The 9th World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo-Kyoto: WCEE, 1988: 4.
- [4] NAKASHIMA M. Strain-hardening behavior of shear panels made of low-yield steel. I: test[J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(12): 1742-1749.
- [5] NAKASHIMA M, IWAI S, IWATA M, et al. Energy dissipation behaviour of shear panels made of low yield steel [J]. Earthquake Eng Struct Dyn, 1994, 23(12): 1299-1313.
- [6] DE MATTEIS G, LANDOLFO R, MAZZOLANI F M. Seismic response of MR steel frames with low-yield steel shear panels [J]. Eng Struct, 2003, 25(2): 155-168.
- [7] 陈之毅,葛汉彬,宇佐美勉,等.剪切板阻尼器的滞回性能参数研究[J].土木工程学报,2008,41(11):13-17.
- [8] 宋中霜.低屈服点钢剪切板阻尼器耗能性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013:13-29.
- [9] 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.
- [10] 黄克智,夏之熙,薛明德,等.板壳理论[M].北京:清华大学出版社,1987:336-339.
- [11] 陈熠周,郭耀杰.纯剪切矩形薄板屈曲理论分析及有限元计算[J].重庆建筑大学学报,2008,30(1):54-57.

Experimental research on seismic performance of shear plate damper made by low yield point steel

CHEN Zhouyi^{1*}, MAI Chenglin¹, XU Zhixu¹, DAI Tangzhen¹, HUANG Wei²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Xiamen Keshitai Construction Technology Co., Ltd., Xiamen 361000, China)

Abstract: The research and its applications of shear plate dampers made by home-made low yield-point steel in China has not yet been carried out systematically. Three types of shear plate dampers with different sizes are designed using the low yield-point steel LYP160 developed by Baoshan Iron & Steel Co., Ltd. And low cycle reversed loading tests on these dampers were carried out. Based on test results, factors affecting the energy dissipation performance of the shear plate damper are analyzed. The research indicates that those hysteresis curves of shear plate dampers made by domestic LYP160 were full and round under low cycle reversed loading, suggesting that shear plate dampers display good energy dissipation performance. Through reasonable design and construction, the shear plate can be used as an energy-dissipation damper in practical engineering.

Keywords: low yield point steel; shear plate; energy dissipation