

一种面外弯曲阻尼器抗震性能分析

郑泽炜¹, 许立英², 陆剑峰¹, 吴应雄¹, 苏文庭³, 苏文旭⁴

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108;

2. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010;

3. 福建泉大建设有限公司, 福建 厦门 360009;

4. 福建惠东南建设工程有限公司, 福建 厦门 361000)

摘要: 金属弯曲耗能阻尼器是利用菱形孔钢板同厚度处同时屈服的特性, 实现阻尼器高效耗能。工程应用表明: 这类阻尼器传统布置形式的辅助支撑易产生无效位移, 辅助支撑传递给耗能元件的有效位移较少, 进而降低了阻尼器的耗能性能; 阻尼器易对梁产生较大附加弯矩, 对主体结构受力存在不利影响; 辅助支撑相对耗能元件材料消耗量大, 降低了材料利用率。为了解决这个问题, 创新性地提出了一种支撑式面外弯曲阻尼器(简称 ADAS), 并对其进行试验研究。结果表明 ADAS 具有良好的抗震性能, 较大的强化系数有利于提高耗散能量, 其构造保证了菱形孔钢板实现全截面同时屈服耗能状态, 菱形孔钢板裂缝发展充分, 使得阻尼器的菱形孔钢板耗能充分。

关键词: 面外弯曲阻尼器; 菱形孔钢板; 支撑式阻尼器

中图分类号: TU352.12

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)06—0121—07

Seismic Performance Analysis of an Out-of-Plane Bending Damper

ZHENG Zewei¹, XU Liying², LU Jianfeng¹, WU Yingxiong¹, SU Wenting³, SU Wenxu⁴

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China;

3. Fujian Quanda Construction Co., Ltd., Xiamen, Fujian 360009, China;

4. Fujian HuiDongNan Construction Engineering Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361000, China)

Abstract: Metal bending energy dissipation damper is to achieve high energy dissipation by utilizing the characteristics of diamond-shaped hole plates yielding at the same thickness at the same time. The engineering application shows that the traditional auxiliary support of this kind of damper is easy to produce invalid displacement, and the effective displacement transferred by the auxiliary support to the energy dissipation element is less, thus reducing the energy dissipation performance of the damper; the damper is easy to produce large additional bending moment on the beam, which has adverse effects on the main structure; the auxiliary support consumes more materials than the energy dissipation element, which reduces the material utilization rate. In order to solve this problem, out-of-plane bending damper (ADAS) is proposed and tested. The results show that ADAS has good seismic performance, and large strengthening coefficient is conducive to increase the dissipation energy. Its structure ensures that the diamond-shaped hole steel plate achieves a full cross-section and yields at the same time. The crack development of the diamond-shaped hole plate is sufficient, which makes the energy consumption of the diamond hole steel plate of the damper sufficient.

Keywords: out-of-plane bending damper; diamond-shaped hole plates; supporting damper

金属材料耗能阻尼器广泛应用于工程结构的减震设计中。考虑金属材料的剪切和弯曲产生的塑性变形将这类阻尼器分为剪切耗能阻尼器和弯曲耗能阻尼器^[1-3]。剪切耗能阻尼器最初的形状为矩形剪切板,其具有明显的塑性强化效应^[4]。在剪切板上开矩形缝,形成矩形条带,可使阻尼器较早进入耗能状态^[5],合理长细比的矩形条带可避免阻尼器发生屈曲^[6]。将矩形条带的形状优化为变截面的哑铃条带、锥形条带及沙漏条带,阻尼器的应变更加均匀,耗能性能和疲劳性能更好,尤其是抛物线形的沙漏条带^[7-10]。弯曲阻尼器的形状包含三角形、X形、菱形、菱形孔形等^[11-13],都具有应变均匀的特性。为了使金属材料耗能阻尼器在两个方向上的耗能性能相近,Basu 等^[14]设计出实体沙漏形阻尼器。

剪切和弯曲耗能阻尼器在结构中的布置形式主要是墙式和入字支撑式。吕若石等^[15]对装有剪切耗能阻尼器的六层框架结构进行 Pushover 分析,结果表明剪切耗能阻尼器可有效提高结构的抗震能力,但墙式安装阻尼器会对结构梁产生不利影响,可见墙式与人字支撑式布置形式存在一定的缺陷。Iolanda 等^[16]提出变厚度剪切耗能阻尼器,在阻尼器的一端开长槽孔,以便与螺栓之间形成间隙,防止阻尼器剪力传递给结构梁。目前剪切和弯曲耗能阻尼器布置形式的辅助支撑易产生无效位移,辅助支撑传递给耗能元件的有效位移较少,进而降低了阻尼器的耗能性能;阻尼器易对梁产生较大附加弯矩,对主体结构受力存在不利影响;辅助支撑相对耗能元件材料消耗量大,降低了材料利用率。

针对上述问题,本文改进了弯曲耗能阻尼器布置形式,基于菱形孔钢板,提出一种支撑式面外弯曲阻尼器(ADAS)。ADAS 是一种将菱形孔钢板嵌入到斜撑内部形成的支撑型阻尼器,形状和布置方式如图 1 所示。为了研究提出的这种 ADAS 抗震性能,首先设计制作了试验模型,对模型进行了变幅和等幅加载的拟静力试验,然后分析其破坏模式,并通过滞回曲线和应变数据等分析抗震性能,为 ADAS 减震体系研究及应用研究提供参考。

1 试验设计

假定建筑结构层高 $h = 3$ m,根据菱形孔钢板疲劳验算公式 $\frac{H^2}{t} \geq 0.873h$,首先设定菱形孔钢板高度 $H = 150$ mm,厚度 $t = 8$ mm,宽度 $B = 280$ mm。

由文献[17]可得,菱形孔钢板极限剪力 F_p 为:

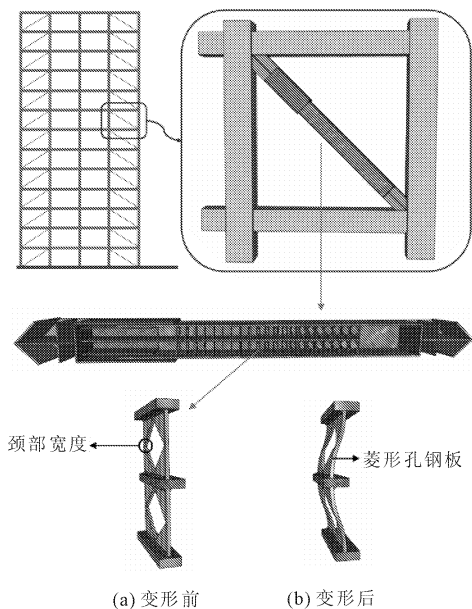


图 1 菱形孔面外弯曲阻尼器(支撑型)

$$F_p = \frac{f_y t^2 B}{2H} \quad (1)$$

为了避免菱形孔钢板颈部剪切破坏,截面应力应满足^[18]:

$$\tau_{\max} \leq f_{vy} \quad (2)$$

式中: $\tau_{\max}$ 为菱形孔钢板受弯时颈部截面的峰值应力; f_{vy} 为钢材的抗剪强度,两个颈部截面面积 $A = 2B_1 t$, B_1 为颈部宽度,得:

$$\tau_{\max} = \frac{3}{2} \frac{F_p}{A} = \frac{3}{2} \frac{1}{2B_1 t} \frac{f_y t^2 B}{2H} = \frac{3f_y t B}{8B_1 H} \quad (3)$$

$$f_{vy} = \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

将式(3)和式(4)代入式(2)得菱形孔钢板颈部宽度 B_1 应满足:

$$B_1 \geq \frac{3\sqrt{3} B t}{8H} = 9.70 \text{ mm} \quad (5)$$

故取颈部宽度 $B_1 = 10$ mm,为了缓解颈部处截面应力突变,颈部采用圆形倒角。菱形孔钢板宽度边的颈部宽度接近焊脚高度 9 mm,为了便于焊接,取此处的颈部高度比焊脚高度多 2 mm,即 11 mm。菱形孔钢板示意图见图 2。试验模型的菱形孔钢板采用 Q235B 制作。

1.1 试验模型和加载装置

将图 2 菱形孔钢板嵌入到斜撑内部,设计的 ADAS 试验模型如图 3 所示,其中菱形孔钢板焊缝探伤检测结果符合规范的 II 级焊缝要求。试验模型加载采用 MTS244.31 型 250 kN 作动器,加载装

置见图 4。作动器竖向上下往复加载,通过核心板使菱形孔钢板产生面外往返变形,进而模拟阻尼器在地震时的往复作用。

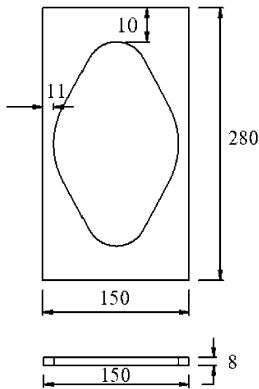


图 2 菱形孔钢板示意图(单位:mm)

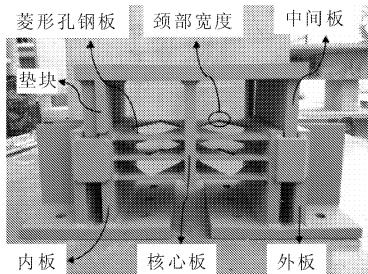


图 3 试验模型

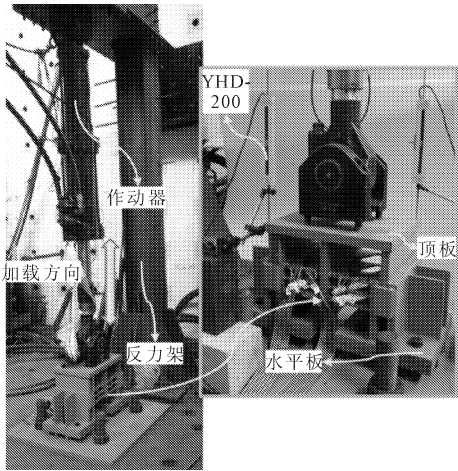


图 4 加载装置

1.2 加载制度和数据采集

(1) 加载制度。加载制度包括变幅加载和等幅加载。变幅加载见图 5,等幅加载为试验模型在位移幅值为 18 mm 下往复加载,直至菱形孔钢板断裂破坏,加载速率采用 0.5 mm/s。

(2) 数据采集。阻尼器的恢复力和位移利用 MTS 加载系统直接读取。阻尼器顶板对角布置 2 个 YHD-200 型位移计用于校核 MTS 读取的位移。

菱形孔钢板应变利用 DH3816 采集系统及其静态应变采集箱记录。在阻尼器试验模型最上面两块菱形孔钢板上下表面单边各粘贴 6 个单轴应变片,应变片编号及布置见图 6。

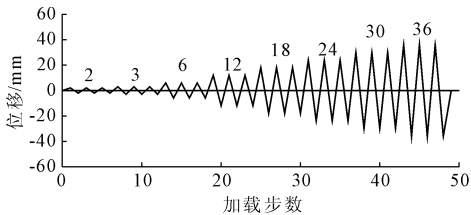
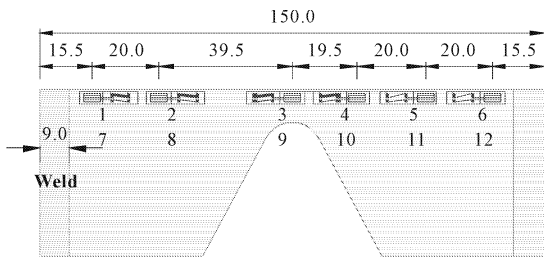
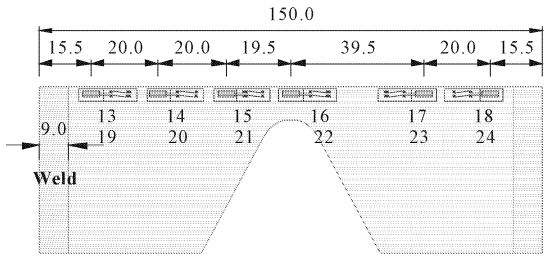


图 5 变幅加载制度



(a) 菱形孔钢板下表面



(b) 菱形孔钢板上表面

图 6 应变片编号及布置(单位:mm)

2 试验破坏模式

2.1 变幅加载

ADAS 试验模型在不同位移幅值下的变形见图 7。

ADAS 位移加载主要经历:①应变片端子脱落(18 mm 第一圈)→②菱形孔钢板底面漆脱落(18 mm 第三圈)→③菱形孔钢板焊脚可视漆裂纹(24 mm 第一圈)→④菱形孔钢板焊脚可视钢板裂缝(36 mm 第三圈)。

大部分端子连续脱落或不脱落,菱形孔钢板底面漆脱落较均匀,表明菱形孔钢板面外弯曲变形均匀。ADAS 位移幅值为 24 mm 第一圈时,菱形孔钢板焊脚出现 3 处漆裂纹,长约 10 mm,宽约 0.5 mm,如图 8(a)所示。ADAS 位移幅值为 36 mm 第三圈时,焊脚出现 5 处钢板裂缝,长约 5 mm~20 mm,宽约 0.3 mm,深约 0.3 mm,如图 8(b)所示。ADAS 在

充分弯曲变形耗能前不会提前失效,耗能稳定性好。菱形孔钢板变形不会集中于颈部或焊脚,焊脚处出

现较少的裂缝,弯曲变形均匀。因此,ADAS 具有更好的耗能性能。

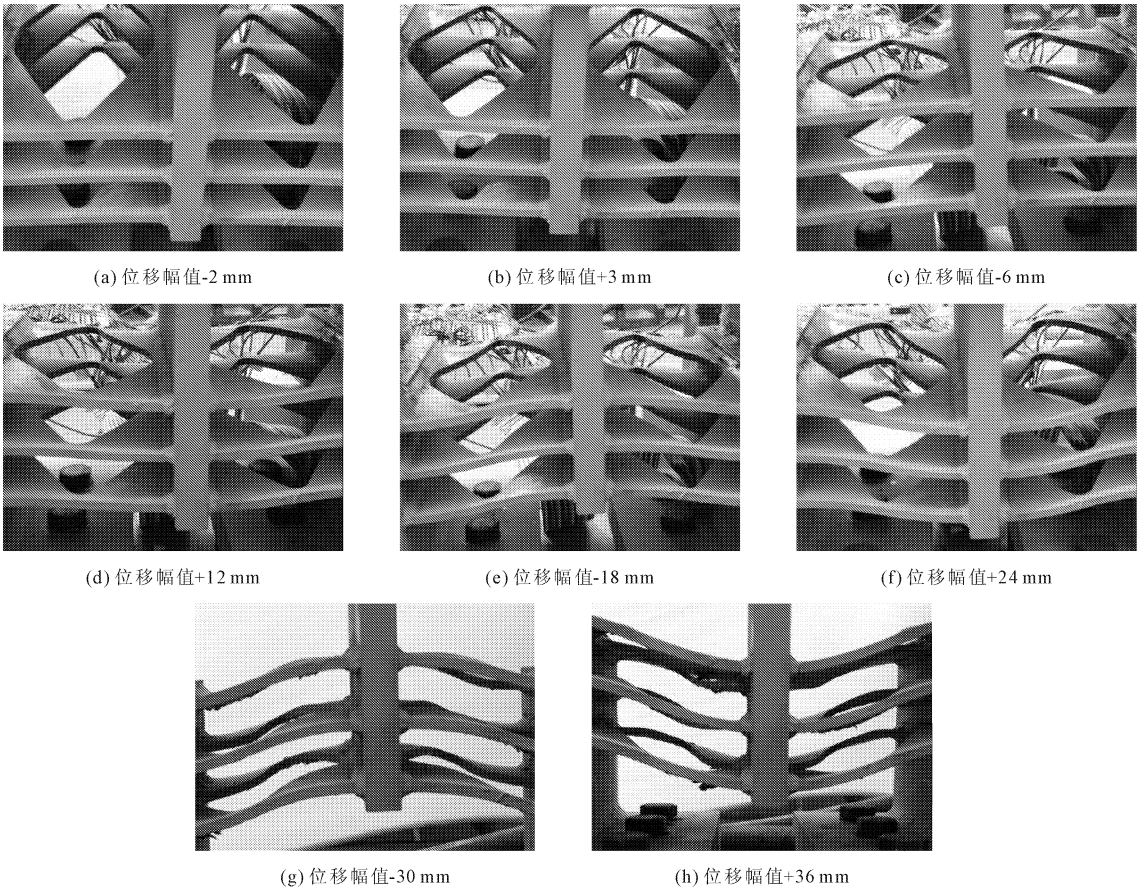


图 7 ADAS 在不同位移幅值下的变形

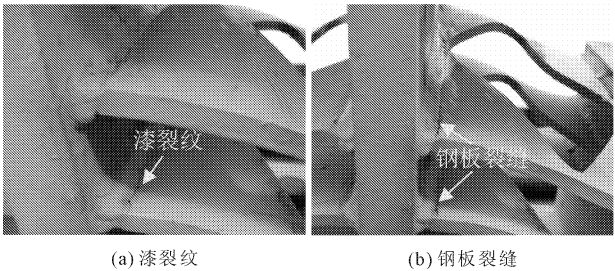


图 8 ADAS 菱形孔钢板裂纹

2.2 等幅加载

随着加载圈数的增加,ADAS 菱形孔钢板焊脚附近裂缝延伸增多,ADAS 位移幅值为 30 圈时,大部分菱形孔钢板焊脚出现裂纹扩展,焊缝深度约为 1.5 mm,且靠近核心板的裂缝居多,如图 9(a)所示。ADAS 位移幅值为 60 圈时,靠近核心板焊脚 1 条裂缝在厚度方向上贯通,如图 9(b)所示,其余焊脚裂缝深度约为 0.0 ~ 4.0 mm,且靠近核心板的裂缝深度较大,同时颈部也出现明显的可视钢板裂缝,如图 9(c)所示。裂缝的出现规律也说明核心板处

的焊缝较容易破坏。

等幅加载至第 86 圈时,在 ADAS 同侧三块菱形孔钢板颈部,间隔约 1 s 连续绷断,如图 9(d)所示。断裂截面粗糙,疲劳断裂现象明显,如图 9(e)所示。2/3 焊脚裂缝在钢板厚度上贯通,裂缝长度 10 mm ~ 30 mm,裂缝宽度 1 mm ~ 2 mm,如图 9(f)所示。5/9 未绷断颈部产生约 0.5 mm 的钢板裂缝。靠近内板未贯通裂缝与靠近核心板未贯通裂缝数量之比为 5: 3,表明核心板处的焊脚更易产生裂缝破坏,建议设计时宜提高核心板焊脚附近菱形孔钢板的局部强度。

从裂缝发展的历程来看,ADAS 先在焊脚出现裂缝,然后在焊脚和颈部同时发展裂缝,最后在颈部发生疲劳断裂。表明 ADAS 疲劳裂缝发展全面、变形耗能充分。

3 试验数据分析

3.1 滞回曲线

ADAS 试验模型的变幅值滞回曲线见图 10。

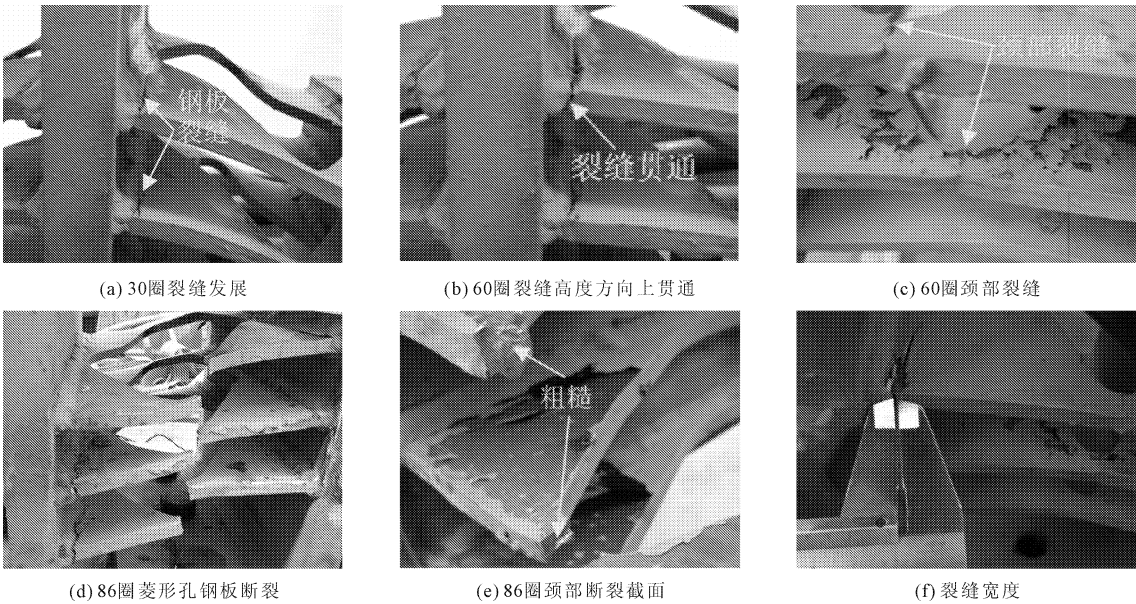


图 9 ADAS 等幅加载试验现象

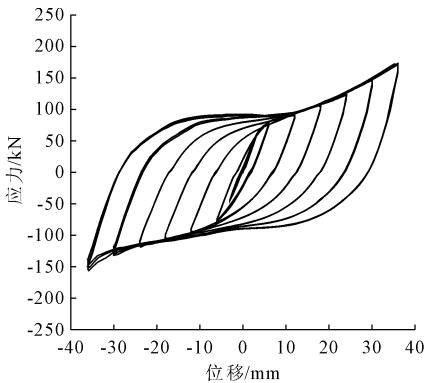


图 10 滞回曲线

(1) 阻尼器位移在 0 ~ 3 mm 左右范围内,滞回曲线基本为直线,说明阻尼器处于弹性阶段。当阻尼器位移大于 3 mm 左右时,滞回曲线开始向位移轴弯曲,说明阻尼器进入弹塑性阶段,滞回曲线变得越来越丰满,滞回曲线包围的面积越来越大,阻尼器消耗能量越来越多,因此 ADAS 阻尼器是一种可靠的耗能减震装置。

(2) 阻尼器滞回环上下力不对称。纵坐标(力)的最大值和最小值的绝对值并不完全相等,总体上最大值的绝对值大于最小值的绝对值。这是可能由于:① 阻尼器水平连接板与底座水平连接板之间的滑移;② 阻尼器先竖向向下位移加载,当菱形孔钢板既有被拉伸也有被压缩至塑性变形阶段的部分后卸载至 0 mm 位移,再竖向向上位移加载,材料反向压缩或拉伸屈服强度比原始状态(即未经预先拉伸塑性变形而直接进行压缩)的屈服极限明显要低(绝对值)。

(3) 阻尼器破坏前可产生较大的变形量,且产生较大的应变硬化。

(4) 位移幅值大于 24 mm 的滞回环开始呈现捏拢效应,“捏拢”现象会导致阻尼器耗能不稳定。分析其原因,这是由于内钢板约束了菱形孔钢板,使菱形孔钢板沿高度方向产生拉力。

3.2 耗能性能

ADAS 试验模型耗散能量和等效阻尼系数见图 11 和图 12。

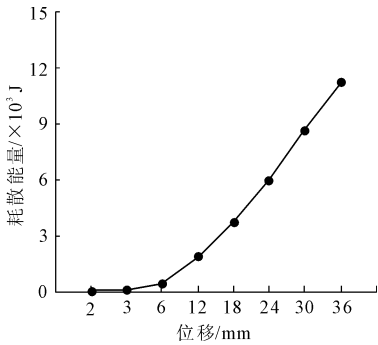


图 11 耗散能量

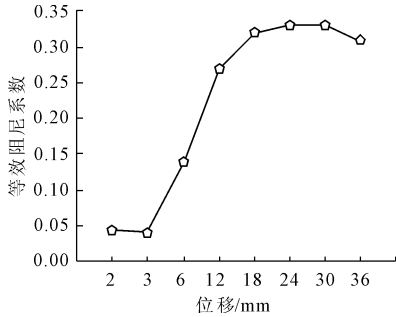


图 12 等效阻尼系数

(1) 阻尼器位移幅值大于屈服位移 2 倍以上时,耗散能量和等效阻尼系数呈线性增长,表明阻尼器可快速进入耗能状态。

(2) 阻尼器等效阻尼系数随着位移幅值的增大而先增大后减小。位移幅值到达 24 mm 时,阻尼器等效阻尼系数达到 0.3 以上,且最佳等效阻尼系数附近保持较长平稳段,表明阻尼器具有可靠的耗能能力和良好的耗能性能。

3.3 强化放大系数

从试验所获得的变幅值滞回曲线可看出,阻尼器出现较强的强化过程,这是由于:(1) 阻尼器由加载前期的受剪控制转变成加载后期的受拉控制(主要原因);(2) 材料应变硬化与循环硬化。强化放大系数的计算公式为:

$$\alpha = F_{\max}/F_y \tag{6}$$

式中: $F_{\max}$ 为阻尼器设计最大阻尼力; F_y 为阻尼器屈服荷载。据此计算阻尼器试验模型的强化放大系数,并计算设计最大位移 36 mm 耗散能量与 18 mm 耗散能量比值 λ ,如表 1 所示。

表 1 阻尼器强化放大效应					
设计最大 阻尼力 $F_{\max}/\text{kN}$	屈服荷 载 F_y /kN	强化 系数 α	$\Delta_{\max}$ 耗散能 量 $\times 10^3/\text{J}$	$\Delta_{\max}/2$ 耗散能 量 $\times 10^3/\text{J}$	耗散能 量比值 λ
173.16	75.04	2.31	11.29	3.73	3.03

阻尼器具有较大的强化系数。一方面,强化系数越大,阻尼器的恢复力越大,对主体结构不利。另一方面,由于强化作用,虽然位移幅值仅增大一倍,但耗散能量增大 3 倍以上,有利于结构的耗能减震。

3.4 骨架曲线

ADAS 模型的骨架曲线见图 13,骨架曲线呈现典型的双线型,因此 ADAS 恢复力模型可简化为双线性模型。

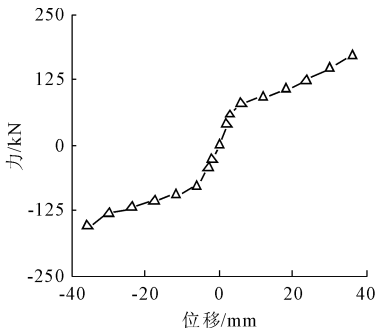


图 13 骨架曲线

3.5 刚度退化

等效割线刚度 k_i 为:

$$k_i = \frac{|F_i^{\text{pull}}| + |F_i^{\text{push}}|}{|\Delta_i^{\text{pull}}| + |\Delta_i^{\text{push}}|} \tag{7}$$

式中: F_i^{pull} 和 F_i^{push} 分别表示滞回加载第 i 周的拉力峰值和压力峰值; Δ_i^{pull} 和 Δ_i^{push} 分别表示滞回加载第 i 周的拉位移峰值和压位移峰值。

刚度退化系数 β_i 为:

$$\beta_i = \frac{k_i}{k_0} \tag{8}$$

式中: β_i 为刚度退化系数, $i = 1, 2, 3 \cdots, k_0$ 为对应本试验位移幅值为 2 mm 时阻尼器等效割线刚度。ADAS 试验模型的等效割线刚度和刚度退化系数见图 14 和图 15。

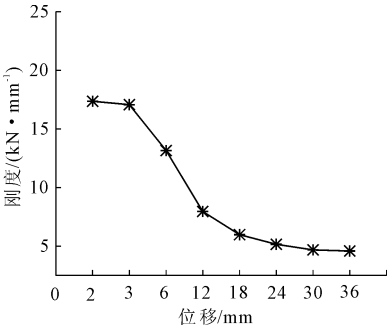


图 14 等效割线刚度

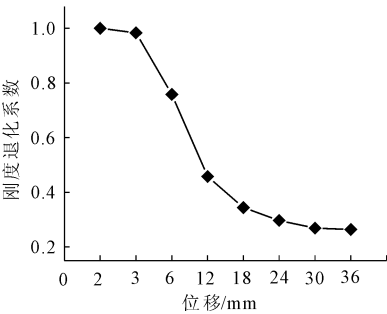


图 15 刚度退化系数

阻尼器呈现较大刚度退化现象,随着位移幅值的增大,阻尼器等效割线刚度先快速降低后趋于平稳;阻尼器进入弹塑性耗能阶段后,刚度退化系数呈线性下降,阻尼器刚度很快降低为原来的 1/2 以下(位移幅值大于 12 mm 时),较小的刚度退化系数有利于保护主体结构。

3.6 菱形孔钢板应变

(1) 菱形孔钢板单边应变和颈部应变。菱形孔钢板单边应变一致性较好,表明菱形孔钢板可较好地符合同时屈服耗能的特性。阻尼器屈服前,菱形孔钢板发生纯弯曲变形,颈部应变较小。菱形孔钢

板屈服后,颈部产生薄膜效应,颈部应变开始加大,但未溢出,因此颈部参与耗能的同时不存在明显应变集中。

(2) 菱形孔钢板上下前后应变和核心板两侧应变。在阻尼器位移小于 6 mm 时,菱形孔钢板沿厚度上下对应位置和沿高度前后对应位置的应变片的时间-应变曲线呈反对称关系,核心板两边的菱形孔钢板对称位置的应变片时间-应变曲线基本重合,且两条重合曲线呈反对称关系。表明 ADAS 的构造设计,菱形孔钢板在弹性阶段可产生较为理想的外弯曲受力状态,保证了阻尼器耗能性能。

4 结 论

本文提出了一种支撑式面外弯曲阻尼器 (ADAS),并通过试验研究其抗震性能,经过分析得到如下结论:

(1) ADAS 菱形孔钢板裂缝发展和变形耗能充分。变幅加载时菱形孔钢板变形不会集中于颈部或焊脚,焊脚处出现较少的裂缝,ADAS 在充分弯曲变形耗能前不会提前失效。等幅加载时先在焊脚出现裂缝,然后在焊脚和颈部同时发展裂缝,最后在颈部发生疲劳断裂。

(2) ADAS 较大的强化系数有利于提高耗散能量。阻尼器具有较大的强化系数,滞回环呈现一定的捏拢效应。虽然强化系数越大,阻尼器的恢复力越大,对主体结构不利。但由于强化作用,阻尼器耗散能量显著增大,有利于结构的耗能减震。

(3) ADAS 具有良好的抗震性能。阻尼器滞回曲线丰满,耗散能量和等效阻尼系数呈线性增长,且最佳等效阻尼系数附近保持较长平稳段,阻尼器等效割线刚度先快速降低后趋于平稳,刚度退化系数呈线性下降,较小的刚度退化系数有利于保护主体结构。

(4) ADAS 的构造保证了菱形孔钢板实现全截面同时屈服耗能状态。菱形孔钢板单边应变一致性较好,菱形孔钢板沿厚度上下对应位置、沿高度前后对应位置及核心板两侧的菱形孔钢板对称位置的应变片的时间-应变曲线呈反对称关系,且两条重合曲线呈反对称关系。

参考文献:

[1] Skinner R I, Kelly J M, Heine A J. Hysteretic dampers for earthquake-resistant structures [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2010,3(3):287-296.
[2] 杨 凯,郭 鑫,孟瑶琳. 基于地震剪力折减系数的减

震主体结构设计方法[J]. *水利与建筑工程学报*, 2018,16(1):48-53.

- [3] 马艳宁. 墙脚可更换 PEC 剪力墙滞回性能研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2020,18(4):123-127.
[4] 杨 琼,郭阳照,吴 体,等. 新型扇形盘式消能器减震性能参数分析[J]. *地震工程学报*, 2018,40(4):643-651.
[5] 赵 祥,刘忠华,王社良,等. 多维地震作用下大跨空间结构的减震控制分析[J]. *地震工程学报*, 2018,40(3):398-405.
[6] Hedayat, Ahmad A. Prediction of the force displacement capacity boundary of an unbuckled steel slit damper[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015,114:30-50.
[7] 徐艳红,李爱群. 抛物线外形软钢阻尼器试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2011,32(12):202-209.
[8] Xu Y H, Li A Q, Zhou X D, et al. Shape optimization study of mild steel slit dampers[J]. *Advanced Materials Research*, 2010,168-170,2434-2368.
[9] Teruna D R, Majid T A, Budiono B. Experimental study of hysteretic steel damper for energy dissipation capacity [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2015:1-12.
[10] Lee C, Ju Y K, Lho S, et al. Non-uniform steel strip dampers subjected to cyclic loadings [J]. *Engineering Structures*, 2015,99:192-204.
[11] 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.
[12] Whittaker A S, Bertero V V, Thompson C L, et al. Seismic testing of steel plate energy dissipation devices [J]. *Earthquake Spectra*, 1991,7(4):563-604.
[13] Shih M H, Sung W P. A model for hysteretic behavior of rhombic low yield strength steel added damping and stiffness [J]. *Computers & Structures*, 2005,83(12/13):895-908.
[14] Basu D, Reddy P R M. A new metallic damper for seismic resilience: analytical feasibility study [J]. *Structures*, 2016,7:165-183.
[15] 吕若石,吕西林. RC 框架结构采用软钢剪切板阻尼器的计算分析及阻尼力对框架梁性能的影响研究[J]. *结构工程师*, 2016,32(4):92-103.
[16] Lolanda N, Daniele L, Nicola C, et al. Experimental and analytical characterization of steel shear links for seismic energy dissipation [J]. *Engineering Structures*, 2018,172:405-418.
[17] 邢书涛,郭 迅. 一种新型软钢阻尼器力学性能和减震效果的研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2003(6):179-186.
[18] 张耀春,周绪红. 钢结构设计原理[M]. 北京:高等教育出版社,2011.