

S 型钢板阻尼器滞回模型及参数识别研究

翟治鹏^{1 2 3} 国 巍^{1 2 3} 余志武^{1 2 3}

(1. 中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075; 2. 中南大学高速铁路建造技术国家工程实验室, 湖南长沙 410075;
3. 湖南省装配式建筑工程技术研究中心, 湖南长沙 410075)

摘要: 提出一种易制作、易安装、易更换的 S 型钢板阻尼器, 设计制作 3 组试件, 通过开展拟静力试验, 对其变形和破坏模式、滞回特性及耗能能力进行研究。基于试验结果提出一种改进的 BWBN 滞回模型, 建立 Simulink 模型并开展试件参数识别研究。结果表明: S 型钢板阻尼器的滞回曲线饱满, 具有较大的变形能力, 良好稳定的耗能能力, 较高的延性系数和超强系数; 阻尼器通过弯曲和轴向变形耗能, 变形包括弯曲弹性段、弯曲屈服段及弯-拉屈服段, 由于弯-拉强化效应, 第三段刚度和强度逐渐增大, 可提高结构承载能力并降低残余变形; 所提出的滞回模型可以反映 S 型钢板阻尼器的弯-拉强化效应, 能够较精确地模拟阻尼器的滞回曲线、恢复力变化以及累积能量耗散。

关键词: S 型钢板阻尼器; 拟静力试验; 弯-拉强化效应; 滞回模型; 参数识别

中图分类号: TU352.1 TU317⁺.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-131X(2020)S2-0101-08

DOI:10.15951/j.tmgcxb.2020.s2.016

Research on the hysteretic model and parameter identification of S-shaped steel plate damper

Zhai Zhipeng^{1 2 3} Guo Wei^{1 2 3} Yu Zhiwu^{1 2 3}

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. National Engineering Laboratory for High Speed Railway Construction, Central South University, Changsha 410075, China; 3. Engineering Technology Research Center for Prefabricated Construction Industrialization of Hunan Province, Changsha 410075, China)

Abstract: A new type of S-shaped steel plate damper was proposed. To investigate the deformation and failure mode, hysteretic characteristics and energy dissipation capacity, three test specimens were designed for quasi-static tests. Based on the test results, an improved BWBN hysteretic model was proposed to simulate the damper's hysteretic behavior. Then the Simulink model was established and the parameter identifications were conducted. Analysis results show that the damper has pump hysteretic loops, large deformation capacity, stable energy dissipation capacity, high ductility coefficient and over-strength coefficient. It consumes energy through bending and axial deformation. The force-displacement relationship includes bending elastic stage, bending yield stage and bending-tension yield stage. Due to the bending-tension hardening effect, the bearing capacity and stiffness at the third stage increase gradually, which can enlarge the bearing capacity and reduce the residual deformation of structures. The presented hysteretic model can perform the damper's bending-tension hardening effect, and can accurately predict the hysteretic curve, restoring force variation and cumulative energy dissipation of the damper.

Keywords: S-shaped steel plate damper; quasi-static test; bending-tension hardening effect; hysteretic model; parameter identification

E-mail: guowei@csu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(51878674)、中南大学中央高校基本科研业务费专项资金(2018zzts182)

作者简介: 翟治鹏, 博士研究生

通讯作者: 国巍, 博士, 教授

收稿日期: 2020-08-19

引 言

近年来,世界范围内发生的地震事件对社会造成了巨大的经济损失。例如,2008年中国汶川地震造成约1383.3亿美元损失,2011年东日本大地震导致约300亿美元的损失,2015年尼泊尔地震损失约60亿美元^[1-2]。地震下功能可恢复结构和韧性城市发展逐渐成为地震工程领域的研究热点^[3]。为控制强震下结构的损伤,实现震后功能可恢复的目标,一种直接有效的方法是安装可更换耗能减震装置。目前,工程中常用的减震装置包括黏滞阻尼器、黏弹性阻尼器、摩擦阻尼器及金属阻尼器等。其中,钢阻尼器因塑性变形能力好、耐久性好、成本低、易制作、性能稳定等优点而被广泛使用^[4]。

常用的钢阻尼器根据其受力型式可分为剪切屈服型、弯曲屈服型及拉压屈服型。Chan等^[5]提出了一种由薄板焊接于方形空心钢管而形成的剪切板耗能器,该装置通过钢板剪切变形耗能;林煜等^[6]设计了一种双拼工字型剪切型屈曲约束钢板阻尼器,其通过槽型钢腹板剪切变形耗能,拟静力试验结果表明该阻尼器可以有效限制耗能腹板的平面外变形。考虑到剪切型阻尼器的变形性能和抗疲劳性能弱于弯曲型阻尼器,很多学者对弯曲型阻尼器进行了研究^[7];陈云等^[7]对环形钢板阻尼器力学性能进行了试验研究,结果表明:该阻尼器承载力退化小,具有大变形能力、稳定饱满的滞回环和优良的抗疲劳性能。类似地,Zheng等^[8]对弯曲金属板阻尼器力学性能开展了试验研究,结果表明阻尼器的初始刚度较大,滞回环饱满。为研究开缝对剪切钢板阻尼器的影响,孔子昂等^[9]对弯曲单元宽厚比小于5的带缝钢板阻尼器进行了试验研究,结果表明:阻尼器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。对于拉压型钢阻尼器,其典型代表为屈曲约束支撑。另外,也有学者提出采用多种耗能机制共同耗能,如周云等^[10]提出了钢管与铅协同工作的钢管铅阻尼器,Li等^[11]改进了一种弯-剪组合耗能的钢板阻尼器。

阻尼器滞回模型是描述阻尼器滞回耗能特性、建立阻尼器数值模型的关键。朱旭东等^[12]基于Bouc-Wen模型对软钢阻尼器进行了参数识别研究;朱奇云等^[13]基于Bouc-Wen模型建立了考虑应变硬化的软钢阻尼器滞回模型。为了考虑阻尼器的剪切捏缩效应和时滞效应,Hossain等^[14-15]、Nithyadharan等^[16]和Peng等^[17]基于Bouc-Wen-Baber-Noori(BWBN)模

型分别对剪切板阻尼器、钢板墙和磁流变阻尼器进行了参数识别研究。研究表明,Bouc-Wen模型和BWBN模型具有良好的适用性。

目前,对于弯-拉型钢阻尼器的研究较少。本文提出一种新型S型钢板阻尼器,其在加载初期通过弯曲变形耗能,加载位移较大时转变为轴向变形耗能。因为轴向刚度较大,故该阻尼器在较大位移时具有刚度增大现象,从而可以提高结构抗大震能力,减小结构残余变形。该阻尼器构造简单、制作方便,且损伤后容易替换,可满足功能可恢复设计的要求。同时,本文提出一种改进的BWBN滞回模型,并进行参数识别研究,随后通过拟静力试验验证模型的准确性。

1 S型钢板阻尼器构造及工作机理

如图1(a)所示,S型钢板包括S型圆弧段和端板,其由钢板切割弯折成型,耗能集中于圆弧段。由于在变形较大时,S型钢板会出现轴向变形,考虑到拉压不对称性,因此S型钢板阻尼器通过两个S型钢板元件组成。图1(b)所示为S型钢板阻尼器示意图,阻尼器的厚度、尺寸,螺栓的孔径及数量可根据实际情况进行设计。当荷载作用时,阻尼器上、下端板产生相对剪切位移,S型圆弧段首先出现弯曲变形,当荷载较大时,阻尼器由弯曲变形转变为轴向变形。阻尼器的力-位移关系可由图2描述,包括弯曲弹性段、弯曲屈服段及弯-拉屈服段。S型钢板阻尼器具有以下特点:成本低、易制作、免焊接,与结构或支撑采用螺栓连接,易安装、易更换,损伤易观测;结合了弯曲及轴向变形耗能,充分利用材料,阻尼器弯-拉耗能机制使其力-位移关系的第三段刚度及承载力明显增大,当结构遭受强地震作用时,可为结构提供更大的侧向刚度,减小结构残余变形。

2 试验研究

2.1 试件设计

试验共设计3组不同厚度的阻尼器试件,编号分别为S1、S2和S3,厚度分别为4mm、5mm和6mm。为保证加载时作动器受力的对称性,每组试验由2个相同的阻尼器组成(见图4)。阻尼器外形与图1(b)相同,采用Q235钢板制作,阻尼器宽度、端板长度、螺栓孔径等参数如表1所示,表中各项参数在图1(b)中已标明。

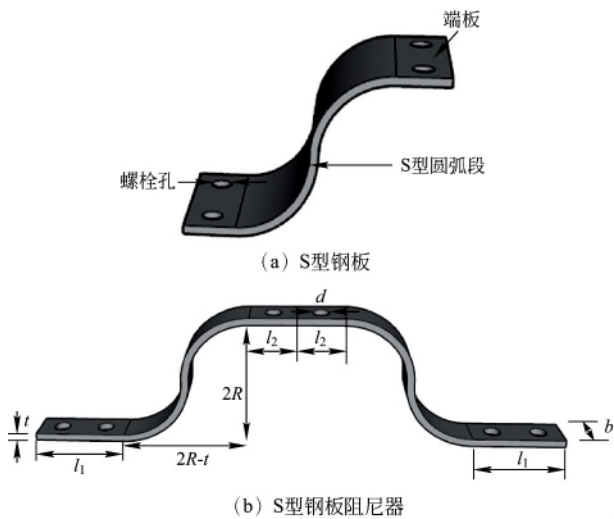


图 1 S 型钢板阻尼器示意图

Fig. 1 Schematic of S-shaped steel plate damper (SSPD)

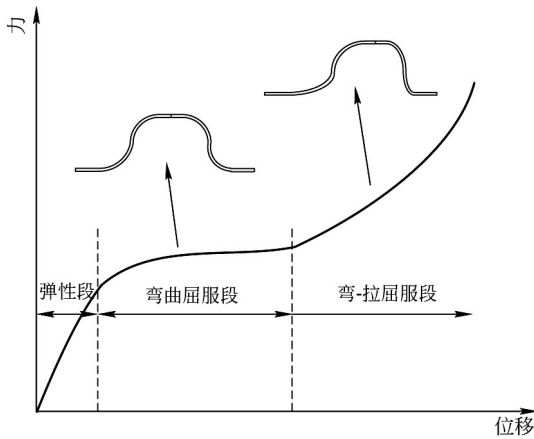


图 2 S 型钢板阻尼力-位移关系

Fig. 2 Force-displacement relationship of SSPD

表 1 试件主要参数

Table 1 Main parameters of test specimen (mm)

试验编号	宽度 b	直径 $2R$	厚度 t	端板长度 l_1	端板长度 l_2	螺孔直径 d
S1	40	133	4	100	50	18
S2	40	133	5	100	50	18
S3	40	133	6	100	50	18

2.2 加载及测量方案

试验在中南大学高性能单轴液压振动台上进行，液压作动器最大出力 70kN。阻尼器拟静力试验采用位移加载控制，加载速率为 1~2mm/s。根据 FEMA 461^[18] 的规定，循环加载的位移幅值按 1.4 倍递增，直到达到单调加载极限位移 Δ_m ，每级荷载加载 2 圈。达到极限位移后若试件没有失效，按 0.3 Δ_m 增幅加载，

每级荷载加载 2 圈，直至试件失效。本文预估 Δ_m 为 30mm，第一级位移荷载为 1.04mm，其余各级位移荷载根据 FEMA 461^[18] 规定计算。

试验加载装置如图 3 所示，阻尼器上端板通过钢板与螺栓与作动器相连，下端板由 4 个钢支座与台面固定。试验共布置 5 个激光位移计，其中 4 个用于监测固定底座的滑动位移，1 个用于测量作动器的位移。作动器前端安装力传感器，实时测量其反力。

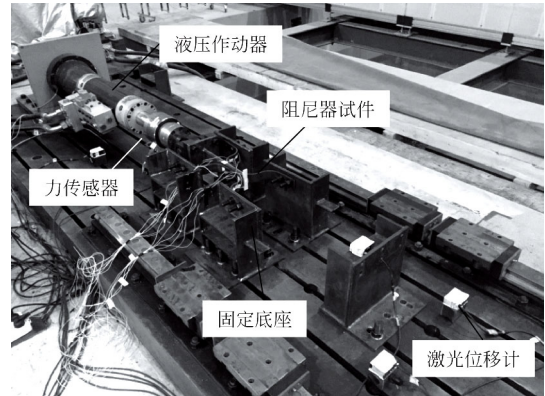


图 3 试验装置

Fig. 3 Test setup

2.3 试验现象

图 4 所示为试件 S1 的变形及破坏模式。当位移较小时，阻尼器以弯曲变形为主。图 4(a) 为加载至 7.81mm 时，试件的变形状态，可以看出阻尼器圆弧段曲率明显改变，说明阻尼器圆弧段出现由弯向拉的转变趋势。当位移加至 +30mm 时，如图 4(b) 所示，阻尼器一侧圆弧段基本上被拉直，另一侧圆弧段因压弯出现屈曲，尽管出现屈曲，但阻尼器未出面拉裂、断裂等损伤现象。当位移加至 +57mm 时，如图 4(c) 所示，阻尼器一侧圆弧段被拉直，未发现明显的开裂现象，阻尼器最终因螺栓孔处端板拉断而失效。当达到作动器最大出力 70kN 时，试件 S2 和 S3 没有失效，故只给出试件在最大位移时 (± 48 mm) 的变形状态，如图 4(d) 和图 4(e) 所示。与试件 1 类似，阻尼器一侧圆弧段基本上被拉直，另一侧圆弧段因压弯出现屈曲，可以发现阻尼器圆弧段上出现不平整的凹凸面，说明在循环加载作用下，阻尼器的屈曲模态为多波高阶屈曲，该屈曲现象是一种较为理想的屈曲模式。根据试验现象可知，S 型钢板阻尼器具有较大的变形能力，尽管试件 S1 因端承失效而破坏，其上下端板相对剪切变形仍达到 43%，建议改进阻尼器的端板连接，进一步提高阻尼器的变形能力，更加充分地利用材料。

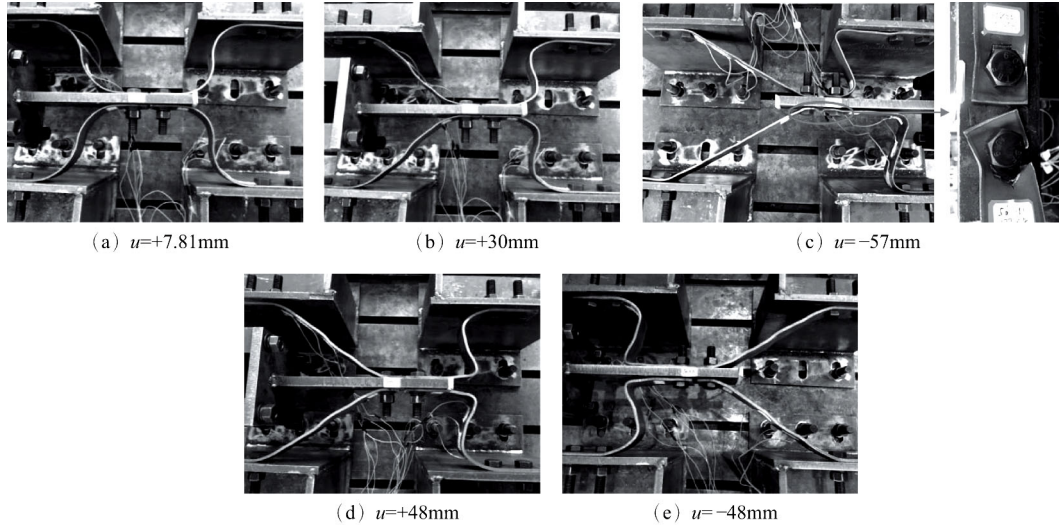


图 4 试件 S1 变形及破坏模式

Fig. 4 Deformation and failure mode

2.4 滞回特性

图 5 描述了各试件的滞回曲线及骨架曲线。观察图可知，当位移小于 15.31mm 时，滞回曲线与一般屈服型软钢阻尼器大致相同，呈现饱满的纺锤体形状。当位移达到 21.43mm 时，阻尼器屈服后刚度有增大现象，随着位移的增大，刚度逐渐增大，滞回曲线呈现两对角凸起的四边形形状，曲线饱满。当位移小于 21.43mm 时，试件第二圈加载未出现明显的强度和刚度退化现象，随着位移增大，强度和刚度退化现象逐渐明显，且滞回曲线出现滑移现象，这主要是因为阻尼器由弯曲变形状态逐渐向轴向变

形状态转变。分析图可知，S 型钢板厚度对阻尼器的抗震性能有较大的影响。随着厚度的增大，阻尼器等效初始刚度及承载力明显增大，试件 S1、S2 和 S3 的等效初始刚度分别为 1.76kN/mm、4.67kN/mm 和 6.0kN/mm，试件 S1 破坏时的最大承载力为 56.8kN，试件 S2 和 S3 在 48mm 时的承载力已达到 70kN。另外可以发现，试件具有较长的弯曲屈服段和弯-拉屈服段，具有较大的延性系数和超强系数。综上分析，S 型钢板阻尼器滞回曲线饱满，性能稳定，具有良好的抗震延性性能和较高的超强性能。

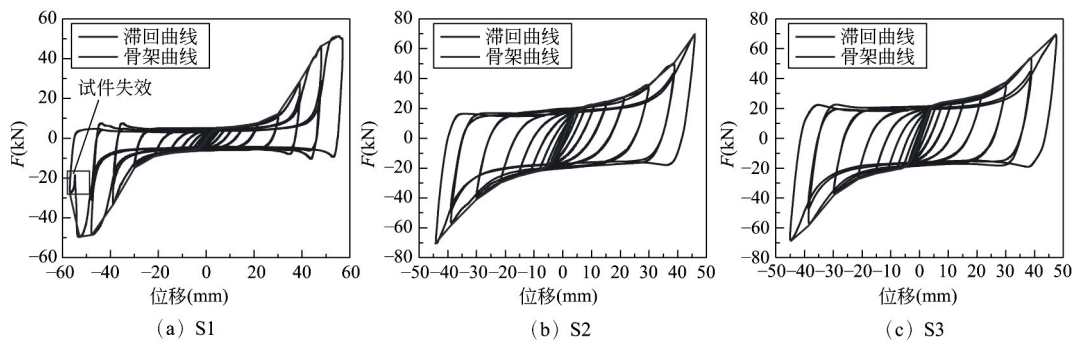


图 5 试件滞回曲线及骨架曲线

Fig. 5 Hysteretic and backbone curve of specimens

3 滞回模型研究

3.1 理论模型

Bouc-Wen 模型常用于建立弯曲型和剪切型钢阻尼器的滞回模型，为了考虑剪切引起的捏缩效应，

学者们通过对 Bouc-Wen 模型引入捏缩函数，建立 BWBN 滞回模型^[14-16]。本文所提 S 型钢板阻尼器为弯-拉型阻尼器，其力-位移关系为三段型，进入弯-拉屈服阶段，阻尼器刚度和承载力随着位移逐渐增大，采用 BWBN 难以模拟其滞回耗能性能。因此，本文提出一种改进的 BWBN 模型，以模拟 S 型钢板

阻尼器的滞回耗能特性。滞回模型需考虑阻尼器的弯曲耗能特性以及第三段刚度强化效应。由试验结果可知，第三段强度和刚度与位移呈现指数函数关系，故阻尼器的恢复力按式(1)计算：

$$F = \alpha k_e u + (1 - \alpha) k_e z_1 + \Delta u^m \zeta k_e z_2 \quad (1)$$

$$\Delta u = \begin{cases} 0 & (|u| \leq u_p) \\ |u| - u_p & (|u| > u_p) \end{cases} \quad (2)$$

式(1)中：前 2 项为 Bouc-Wen 模型，模拟阻尼器的弯曲耗能特性，第 3 项为考虑阻尼器弯-拉屈服段强度和刚度增大的修正项； u 为位移； k_e 为初始刚度； α 为弯曲屈服后刚度比； u_p 为屈服后刚度开始增大时的位移； ζ 和 m 为修正系数和指数； z_1 和 z_2 为滞变位移。根据试验结果分析，当位移较小时，阻尼器类似于弯曲型阻尼器，且刚度和强度没有明显退化现象，当位移较大时存在刚度和强度退化以及捏缩滑移，故：

$$\dot{z}_1 = \dot{u} \{ A_1 - [\gamma_1 + \beta_1 \operatorname{sgn}(\dot{z}_1)] |z_1|^n \} \quad (3)$$

$$\dot{z}_2 = \dot{u} h(z) \left\{ \frac{A_2 - v [\gamma_2 + \beta_2 \operatorname{sgn}(\dot{z}_2)] |z_2|^n}{\eta} \right\} \quad (4)$$

式中： A_i 、 β_i 、 γ_i 、 n_i 为滞回形状参数； v 、 η 为强度和刚度退化参数； $h(z)$ 为捏缩控制函数，当 $h(z) = 1$ 时模型没有捏缩特性， $h(z)$ 由式(5)计算：

$$h(z) = 1 - \zeta_1 e^{-[\zeta_2 \operatorname{sgn}(\dot{z}_2) - q z_2]^2 / \zeta_3^2} \quad (5)$$

$$z_u = \left[\frac{A_2}{v(\beta_2 + \gamma_2)} \right]^{1/n_2} \quad (6)$$

$$\zeta_1 = \zeta_{10} (1 - e^{-p \varepsilon}) \quad (7)$$

$$\zeta_2 = (\psi_0 + \delta_\psi \varepsilon) (\lambda + \zeta_1) \quad (8)$$

式中： z_u 为 z_2 的极限值； q 、 p 、 ζ_{10} 、 ψ_0 、 δ_ψ 和 λ 为捏缩参数； ε 为滞回耗能，由式(9)计算：

$$\dot{\varepsilon} = (1 - \alpha) k_e z_1 \dot{u} + \Delta u^m \zeta k_e z_2 \dot{u} \quad (9)$$

3.2 模型参数识别及预测结果

第 3.1 节提出的改进 BWBN 模型中，需要确定的滞回形状参数和捏缩参数较多，因此本节利用 Simulink Design and Optimization 工具箱对这些参数进行识别。图 6 所示为改进 BWBN 模型的 Simulink 建模框架，子系统 Subsystem1 为式(1)的第 3 项，即考虑强化作用的修正项，其余部分为式(1)前 2 项的建模，即 Bouc-Wen 模型。限于篇幅，此处不逐一列出各公式的建模框图。各参数确定步骤如下：

- (1) 根据试验曲线初步确定试件的初始刚度 k_e 、 α 和 u_p 。
- (2) 从试件滞回曲线中选取弯曲变形为主的部分，对参数 A_1 、 β_1 、 γ_1 、 n_1 、 k_e 和 α 进行初步估计。
- (3) 根据试件完整滞回曲线对所有参数进行识别。
- (4) 对参数进行微调，使模型能更加准确的模拟试验曲线。

根据上述识别方法和 Simulink 模型，最终识别的各参数如表 2 所示。

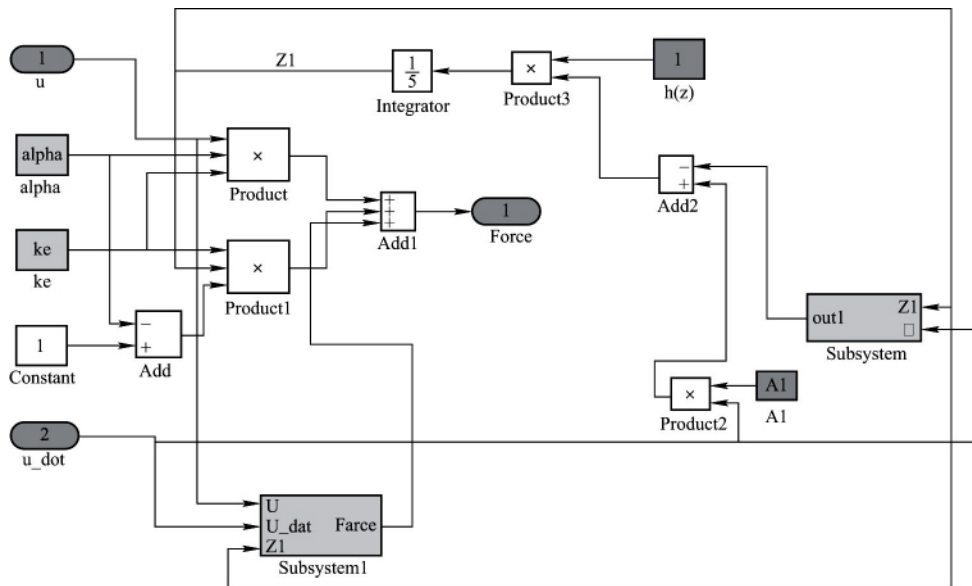


图 6 改进 BWBN 模型 Simulink 建模
Fig. 6 Simulink model of the modified BWBN

表 2 改进 BWBN 模型参数识别结果

Table 2 Identification parameters of the modified BWBN model

试验编号	k_e	α	A_1	β_1	γ_1	n_1	A_2	β_2	γ_2	n_2	δ_v
S1	2.0084	0.0369	0.7595	0.1447	0.0869	1.2241	1.0893	0.4830	-0.3636	0.8612	0.2667
S2	4.7347	0.0687	0.9060	0.0471	0.0084	1.9601	0.3229	1.2249	-0.6017	1.0655	0.1806
S3	6.1614	0.0376	0.8256	0.0109	0.0080	3.2586	0.6950	1.7056	-0.7611	1.458	0.3098
试验编号	δ_η	p	q	ξ_{10}	ψ_0	δ_ψ	λ	u_p	ξ	m	
S1	0.0455	2.4457	0.1	0.947	0.005	0.0024	33.9974	20.76	1.2734	2.5662	
S2	0.0440	11.731	15.87	0.8332	5.9661	0.6387	31.904	15.407	3.0572	2.6435	
S3	0.0133	0.8073	99.441	0.7952	0.2511	9.4057	0.0685	15.321	1.3215	2.2093	

图 7 给出了改进模型预测的滞回曲线与试验曲线的对比, 图 8 给出了模型预测的恢复力与试验结果的对比, 图 9 给出了各滞回环累积耗能的对比。从图中可以看出, 改进模型可以较好地模拟 S 型钢板阻尼器三段型的力-位移关系, 能够合理地反映弯-拉屈服段刚度及强度增大的强化效应。总体上看, 改进模型预测的滞回曲线与试验结果吻合较好。试件 1 的预测误差相对较大, 其原因包括: 试件存在加工误差, 滞回曲线正反向不完全对称; 在最后一级荷载下, 试件因端承失效破坏, 模型难以识别阻尼器失效所引起的影

响。图 8 中可以看出, 恢复力随时间的变化大致相同, 模型预测的峰值荷载与试验结果也较为相近。观察图 9 可知, 预测模型的累积耗能曲线与试验结果吻合较好, 试件 S2 和 S3 的累积耗能曲线与试验曲线基本重合, 试件 S1 的累积耗能曲线在最后一个滞回环之前与试验曲线基本重合, 最后一个滞回环时, 累积耗能的相对误差为 8.8%。由此可知, 提出的改进模型可以较好地模拟 S 型钢板阻尼器的耗能特性。另外, 由图 9 可发现, 随着荷载的增大, 耗能曲线的斜率稳定增大, 说明 S 型钢板阻尼器具有稳定的、良好的耗能能力。

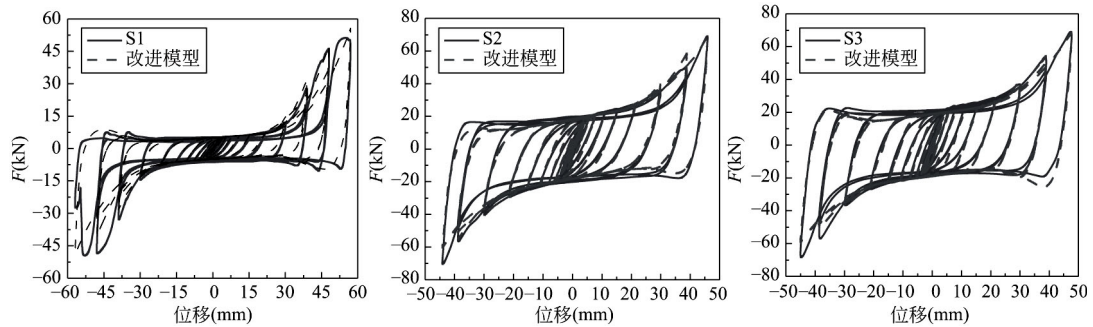


图 7 试验与模型滞回曲线对比

Fig. 7 Comparison of hysteretic curves between experiment and model prediction

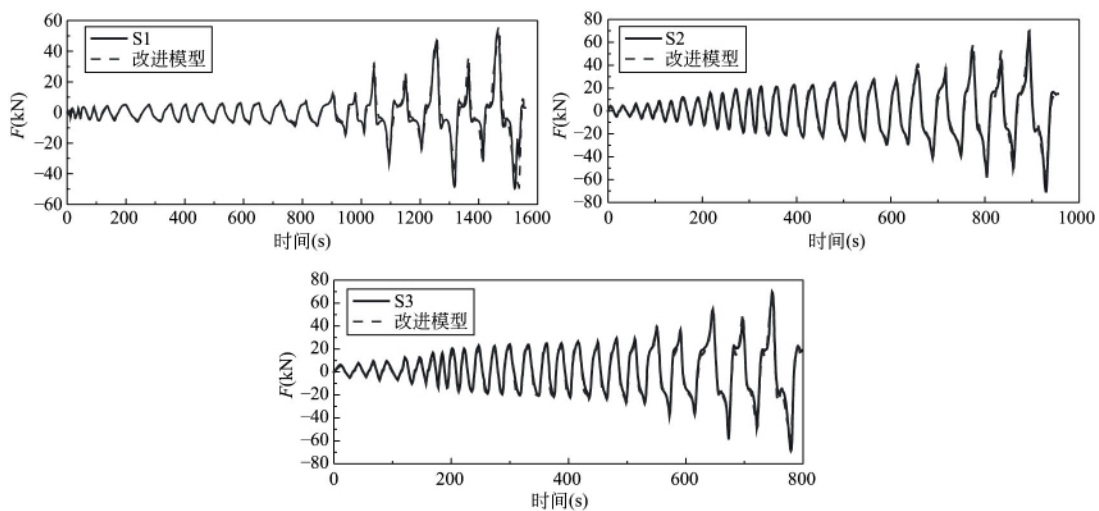


图 8 试验与模型恢复力对比

Fig. 8 Force comparisons between experiment and model prediction

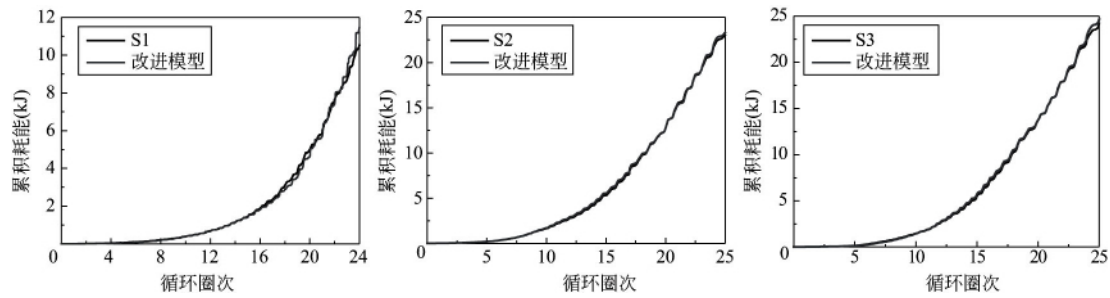


图 9 试验与模型累积耗能对比

Fig. 9 Comparison of cumulative energy dissipation between experiment and model prediction

4 结 论

本文对 S 型钢板阻尼器的构造和工作机理进行了介绍,并对阻尼器进行了试验研究。基于试验结果,建立了适用于 S 型钢板阻尼器的理论滞回模型,并进行了参数识别研究。主要结论如下:

(1) S 型钢板阻尼器的变形模式为:位移较小时,弯曲变形;随着位移的增大,弯曲变形逐渐向拉压变形转变。受压时,S 型圆弧段因压弯出现屈曲,该屈曲呈现为多波高阶屈曲模式。试件 S1 因端板螺栓孔处被拉断而失效,此时端板相对剪切变形达到 43%,可见该阻尼器具有较大的变形能力。对阻尼器端板连接进行改进,可进一步提高其变形能力和材料利用率。

(2) 阻尼器的骨架曲线为三段型:弯曲弹性段、弯曲屈服段及弯-拉屈服段。由于弯-拉强化效应,阻尼器刚度及承载力逐渐提高,这可以减小结构在强震下的残余变形。

(3) 在弯曲耗能阶段,试件滞回曲线饱满,呈现纺锤体形状,循环加载时试件强度及刚度没有明显退化;在弯-拉耗能阶段,循环加载时试件强度及刚度退化逐渐明显,且有捏缩滑移现象,滞回曲线呈现两对角凸起的四边形形状,曲线仍然较为饱满。由骨架曲线可知,S 型钢板阻尼器具有较高的延性系数和超强系数。

(4) 基于试验现象和结果,建立了 S 型钢板阻尼器的理论滞回模型,利用 Simulink 模型对试验曲线进行了参数识别,分析结果表明:该模型可以较精确地模拟阻尼器的滞回曲线、恢复力变化以及累积能量耗散。

参 考 文 献

[1] Zhai Z P, Guo W, Li Y Z, et al. An improved performance-based plastic design method for seismic resilient fused high-rise buildings [J]. Engineering

Structures, 2019, 199: 109650

- [2] Guo W, Zhai Z P, Cui Y, et al. Seismic performance assessment of low-rise precast wall panel structure with bolt connections [J]. Engineering Structures, 2019, 181: 562-578
- [3] Domaneschi M, Martinelli L, Cimellaro G P, et al. Immediate seismic resilience of a controlled cable-stayed bridge [C]// 16th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE2017). Santiago: Chilean Association on Seismology and Earthquake Engineering, 2017
- [4] 陈书娴,周鑫,谢旭. 钢阻尼器考虑水平 2 方向变形的简化滞回模型研究 [J]. 振动与冲击, 2019, 38(3): 214-221, 251 (Chen Shuxian, Zhou Xin, Xie Xu. A simplified hysteretic model for steel dampers considering horizontal bidirectional deformations [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(3): 214-221, 251 (in Chinese))
- [5] Chan R W K, Albermani F, Williams M S. Evaluation of yielding shear panel device for passive energy dissipation [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(2): 260-268
- [6] 林煜,杨森,郭正兴,等. 双拼工字型钢板阻尼器滞回性能试验研究 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2019, 49(5): 911-917 (Lin Yu, Yang Sen, Guo Zhengxing, et al. Experimental study on hysteretic behaviors of duplex assembled I-shaped steel panel dampers [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2019, 49(5): 911-917 (in Chinese))
- [7] 陈云,刘涛,蒋欢军,等. 环形 Q235 钢板阻尼器力学性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2018, 39(11): 139-147 (Chen Yun, Liu Tao, Jiang Huanjun, et al. Experimental study on mechanical properties of annular Q235 steel dampers [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(11): 139-147 (in Chinese))
- [8] Zheng J, Zhang C W, Li A Q. Experimental investigation on the mechanical properties of curved metallic plate dampers [J]. Applied Sciences, 2020, 10(1). DOI: 10.3390/app10010269
- [9] 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 Zi-ang, 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))
- [10] 周云,卢德辉,张敏. 钢管铅阻尼器的性能试验研究

- [J]. 土木工程学报, 2017, 50(1): 46-52 (Zhou Yun, Lu Dehui, Zhang Min. Study on mechanical properties of lead-filled steel tube damper [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(1): 46-52 (in Chinese))
- [11] Li Z J, Shu G P, Huang Z. Development and cyclic testing of an innovative shear-bending combined metallic damper [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 158: 28-40
- [12] 朱旭东, 吕西林, 徐崇恩. 软钢阻尼器基于 Bouc-Wen 模型的参数识别研究 [J]. 结构工程师, 2011, 27(5): 124-128 (Zhu Xudong, Lv Xilin, Xu Chongen. Parametric identification of mild steel damper based on Bouc-Wen model [J]. Structural Engineers, 2011, 27(5): 124-128 (in Chinese))
- [13] 朱奇云, 吕西林. 考虑应变硬化的软钢阻尼器滞回模型及应用 [J]. 结构工程师, 2017, 33(6): 65-73 (Zhu Qiyun, Lv Xilin. Hysteretic modeling of steel dampers considering strain hardening and its application [J]. Structural Engineers, 2017, 33(6): 65-73 (in Chinese))
- [14] Hossain M R, Ashraf M. Mathematical modelling of yielding shear panel device [J]. Thin-Walled Structures, 2012, 59: 153-161
- [15] Hossain M R, Ashraf M, Padgett J E. Risk-based seismic performance assessment of yielding shear panel device [J]. Engineering Structures, 2013, 56: 1570-1579
- [16] Nithyadharan M, Kalyanaraman V. Modelling hysteretic behaviour of cold-formed steel wall panels [J]. Engineering Structures, 2013, 46: 643-652
- [17] Peng G R, Li W H, Du H, et al. Modelling and identifying the parameters of a magneto-rheological damper with a force-lag phenomenon [J]. Applied Mathematical Modelling, 2014, 38(15/16): 3763-3773
- [18] FEMA 461 Interim testing protocols for determining the seismic performance characteristics of structural and nonstructural components [S]. Washington, D.C.: Applied Technology Council, 2007

翟治鹏(1990—) 男, 博士研究生。主要从事工程结构抗震研究。

国 巍(1982—) 男, 博士, 教授。主要从事复杂结构抗震、混合试验技术等研究。

余志武(1955—) 男, 硕士, 教授。主要从事混凝土结构、钢-混凝土组合结构、装配式结构、高速铁路建造技术等研究。

(上接第 73 页)

- [9] 张会会. 三维体外预应力自复位 RC 框架抗震性能数值分析研究 [D]. 上海: 同济大学, 2018 (Zhang Huihui. Numerical analysis of seismic performance of a 3D external prestressed self-centering RC frame [D]. Shanghai: Tongji University, 2018 (in Chinese))
- [10] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015 (GB 50010—2010 Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015 (in Chinese))
- [11] 代桂霞, 鲁亮, 徐颖超. 体外预应力自复位结构预应力筋布置方案优化分析 [J]. 结构工程师, 2017, 33(2): 26-33 (Dai Guixia, Lu Liang, Xu Yingchao. Location optimization of prestressed tendons for an external prestressed self-centering RC frame [J]. Structural Engineers, 2017, 33(2): 26-33 (in Chinese))
- [12] 张思海, 梁兴文, 邓明科. 被动耗能减震结构基于能力谱法的抗震设计方法研究 [J]. 土木工程学报, 2006, 39(7): 26-32 (Zhang Sihai, Liang Xingwen, Deng Mingke. A study on the capacity-spectrum seismic design method for buildings equipped with passive energy dissipation systems [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(7): 26-32 (in Chinese))
- [13] 吴晓涵. NosaCAD 与 ABAQUS 和 PERFORM-3D 弹塑性模型转换及分析应用 [J]. 建筑结构, 2012, 42(增 2): 207-212 (Wu Xiaohan. Model transformation from NosaCAD to ABAQUS and PERFORM-3D and nonlinear structure analysis by these software [J]. Building Structure, 2012, 42(S2): 207-212 (in Chinese))

鲁 亮(1969—) 男, 博士, 副教授。主要从事工程结构抗震方面的研究。

叶雨立(1995—) 男, 硕士研究生。主要从事工程结构抗震方面的研究。

夏婉秋(1995—) 女, 硕士研究生。主要从事工程结构抗震方面的研究。

黄子恒(1993—) 男, 硕士研究生, 工程师。主要从事结构抗震方面的研究。