刘云帅,李冰瑞,韩建平,等.自复位单向摩擦阻尼器试验及性能分析[J].地震工程学报,2026,48(5):1073-1082.DOI:10.20000/j.1000-0844.20241108003

LIU Yunshuai,LI Bingrui,HAN Jianping,et al.Testing and performance analysis of a self-centering unidirectional friction damper [J].China Earthquake Engineering Journal,2026,48(5):1073-1082.DOI:10.20000/j.1000-0844.20241108003

自复位单向摩擦阻尼器试验及性能分析

刘云帅[1,2], 李冰瑞[1,2], 韩建平[1,2], 陆文辉[1,2]

(1.兰州理工大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730050;
2.兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室,甘肃 兰州 730050)

摘要:为减小摩擦阻尼器震后的残余变形,提出一种摩擦力可变的自复位单向变摩擦阻尼器(SCUFD),阐述其基本构造和工作原理,并开展试验研究和数值模拟。通过试验数据与模拟结果的对比分析,证明有限元模型的有效性和准确性。基于该模型,对缸体-摩擦块间的摩擦系数、楔形滑块-活塞间的摩擦系数及复位弹簧预加力进行参数分析,研究各设计参数对阻尼器滞回性能的影响。研究表明,提高缸体与摩擦块间的摩擦系数,可提高SCUFD的最大出力和耗能能力,但不影响其自复位能力;增大楔形滑块与活塞间的摩擦系数不影响SCUFD的最大出力,但会使SCUFD的第二阶段刚度增大、第六阶段刚度减小,从而提高耗能能力,降低复位能力;复位弹簧预加力的增大会同时提高SCUFD的最大出力和自复位能力,但不影响其耗能能力。

关键词:自复位单向摩擦阻尼器;滞回性能;数值模拟;参数分析

中图分类号:TU352.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2026)05-1073-10

DOI:10.20000/j.1000-0844.20241108003

Testing and performance analysis of a self-centering unidirectional friction damper

LIU Yunshuai[1,2], LI Bingrui[1,2], HAN Jianping[1,2], LU Wenhui[1,2]

(*1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;*
2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: To reduce residual deformation in friction dampers after earthquakes, a self-centering unidirectional friction damper (SCUFD) with adjustable friction force is proposed. The structure and working principle of the SCUFD are described in detail, and experimental tests and numerical simulations are performed. Comparison of the experimental data with the numerical simulation results confirms the applicability and accuracy of the finite element model. Using this model, parametric studies are conducted on the friction coefficient between the cylinder and friction blocks, the friction coefficient between the wedge-shaped sliders and the piston, and the return spring preload to investigate their

收稿日期:2024-11-08

基金项目:国家自然科学基金(52268075);甘肃省教育厅:青年博士支持项目(2023QB-031)

第一作者简介:刘云帅(1978-),男,博士,副教授,主要研究方向为桥梁减隔震。E-mail:liuys1027@163.com。

effects on the hysteretic performance of the SCUFD. The results indicate that increasing the friction coefficient between the cylinder and friction blocks enhances the maximum output force and energy dissipation capacity of the SCUFD but does not affect its self-centering capacity. Increasing the friction coefficient between the wedge-shaped sliders and the piston does not alter the maximum output force but increases the second-stage stiffness and decreases the sixth-stage stiffness, thereby improving energy dissipation capacity while reducing self-centering capability. Both the maximum output force and self-centering capacity increase with greater return spring preload, whereas the energy dissipation capacity remains unchanged.

Keywords: self-centering unidirectional friction damper; hysteretic performance; numerical simulation; parametric analysis

0 引言

摩擦阻尼器因其结构简单、性能稳定、耗能能力突出[1],在土木工程消能减震领域得到了广泛应用[2]。然而,传统摩擦阻尼器存在两个主要问题:其一,难以适应结构在不同振动强度下的性能需求[3];其二,在耗散后往往产生较大残余变形,缺乏自复位能力,这限制了其工程应用[4]。为此,学者们致力于研发新型摩擦阻尼器以解决上述问题[5],满足更高的抗震需求[6]。

近年来,基于不同的自复位和耗能元件,学者们提出了多种自复位摩擦阻尼器。例如,Wang等[7]采用摩擦复位弹簧实现复位和耗能;Xu等[8]利用组合碟簧作为复位装置,摩擦垫作为耗能装置;刘明明等[9]通过形状记忆合金(Shape Memory Alloys, SMA)丝与复位弹簧组提供复位能力,并采用剪切铅块耗能;屈俊童等[10]则利用复合SMA丝的自复位特性配合摩擦板耗能。这些摩擦阻尼器均展现出典型的旗帜形滞回曲线,体现了其自复位能力。然而,分析其工作原理可知,在卸载阶段,耗能装置产生的摩擦力会阻碍复位;仅当复位力大于该摩擦力时,阻尼器才具有自复位功能。可见,摩擦力的存在削弱了其自复位效能。

现有自复位摩擦阻尼器的摩擦界面多为水平构型,输出摩擦力较为固定;若采用特殊界面设计,则可实现摩擦力变化,使阻尼器适应不同强度振动。因此,一些学者对变摩擦阻尼器开展了研究。李澈等[11]利用坡面摩擦机制提供线性变化的摩擦力;董慧慧等[12]通过独特楔形交界面实现摩擦力的多次变化;屈俊童等[13]采用复合SMA弹簧-坡面机构实现摩擦力分段变化;杜修力等[14]则基于特殊摩擦节点和旋转摩擦特性实现变摩擦功能。上述设计通过特殊摩擦界面减小了卸载阶段的摩擦力,提升了复位能力,但复位过程中摩擦力仍会损耗复位力。

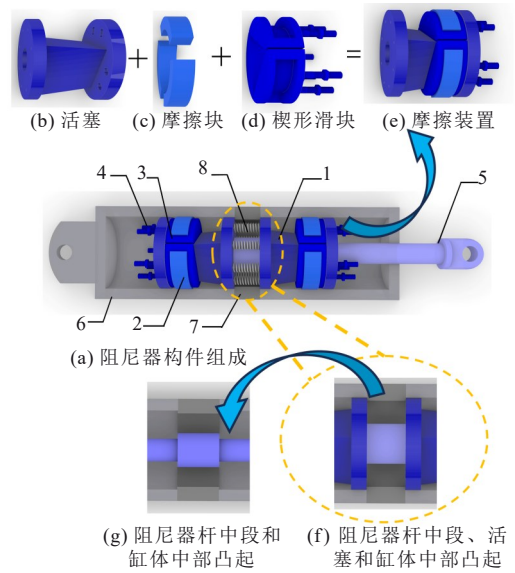
为解决上述问题,本文作者[15]提出了一种复位阶段摩擦力可降至0的自复位单向摩擦阻尼器(Self-Centering Unidirectional Friction Damper, SCUFD)。该摩擦阻尼器可随位移变化调整耗能能力,以应对不同强度地震;同时,复位时无摩擦力损耗复位力,从而增强了复位效能。本文将对SCUFD作进一步研究:采用ABAQUS软件建立其有限元模型,并通过试验验证其滞回性能;对比试验与有限元模型结果,验证有限元模型的准确性和可靠性;基于该模型,分析摩擦系数和弹簧预加力对SCUFD滞回性能的影响规律。

1 自复位单向变摩擦阻尼器介绍

1.1 构造

SCUFD由摩擦系统、复位系统和传力系统三部分构成,其基本结构如图1(a)所示。由图可知,SCUFD的摩擦系统由缸体(6)、活塞(1)、摩擦块(2)、楔形滑块(3)和限位螺杆(4)组成。活塞(1)结构如图1(b)所示,其端面为三棱锥形斜面,倾斜角为α。楔形滑块(3)结构如图1(d)所示,由圆弧面和滑动面构成;其中,滑动面置于活塞斜面上,二者可以发生相对滑动。楔形滑块(3)的圆弧面上设有凹槽,用于嵌入摩擦块(2)。摩擦块(2)形状如图1(c)所示。活塞、楔形滑块与摩擦块共同组成耗能装置,如图1(e)所示。SCUFD的复位系统由复位弹簧(8)和缸体中部凸起(7)构成。缸体(6)为一个中空圆筒,其中部内径较小、两端内径较大,内径较小的部分即为缸体中部凸起(7)。复位弹簧(8)连接于左、右活塞(1)之间。当右侧活塞右移时,左侧活

塞受缸体中部凸起(7)阻挡而静止，从而使复位弹簧(8)受拉；左侧活塞左移时同理，复位弹簧(8)同样被拉伸。SCUFD 的传力系统主要为阻尼器杆(5)。该杆两端直径略小于活塞孔径，可以使活塞(1)穿套其上；中段直径大于活塞孔径，可推动活塞(1)发生位移。阻尼器杆中段的长度与缸体中部凸起(7)的长度一致。阻尼器杆中段、活塞(1)和缸体中部凸起(7)之间的位置关系如图 1(f)和(g)所示。



1-活塞；2-摩擦块；3-楔形滑块；4-限位螺杆；5-阻尼器杆；6-缸体；7-缸体中部凸起；8-复位弹簧

图 1　SCUFD 结构示意图

Fig. 1　Configuration of the SCUFD

1.2　工作原理

当图 1 所示的 SCUFD 所受拉力小于弹簧预加力时，各部件保持初始位置。当拉力超过弹簧预加力后，右侧活塞在阻尼器杆作用下向右滑动，左侧活塞因缸体中部凸起而保持静止；同时，楔形滑块在缸体内壁静摩擦力作用下亦保持静止。随着活塞与楔形滑块之间产生相对位移，楔形滑块发生径向膨胀，使摩擦块与缸壁间的接触压力增大，进而提高活塞与楔形滑块间的动摩擦力。此时，SCUFD 处于如图 2(a)所示的工作状态。

当限位螺杆的螺母接触活塞时，楔形滑块与活塞停止相对运动，摩擦块所受径向压力达到峰值。随着拉力继续增大，限位螺杆承受的拉力也增加，直至摩擦块与缸体间的摩擦力达到最大静摩擦力的临界值。随后，在阻尼器杆的作用下，活塞与摩擦块一同向右移动，摩擦块与缸体间的摩擦力由静摩擦转为动摩擦。此时，SCUFD 的工作状态如图 2(b)所示。

进入卸载阶段后，外力减小使限位螺杆拉力逐渐减至 0，摩擦块与缸体间的摩擦力由动摩擦转为静摩擦，活塞所受静摩擦力先减小后反向增大至最大静摩擦力。外力进一步减小时，若楔形滑块与活塞间摩擦系数较小，楔形滑块对活塞正压力的水平分力大于活塞复位时受到的摩擦力，则活塞可在楔形滑块作用下自行复位，且不消耗复位弹簧的复位力；若楔形滑块与活塞之间的摩擦系数较大，水平分力小于复位摩擦力，则活塞需依靠复位弹簧提供部分复位力才能复位。活塞向初始位置移动过程中，楔形滑块在缸体静摩擦力作用下保持静止，使摩擦块所受正压力逐渐降低，活塞所受滑动摩擦力随之减小。当楔形滑块移至活塞最右端时，摩擦块所受正压力降为 0。此时，SCUFD 工作状态如图 2(c)所示。

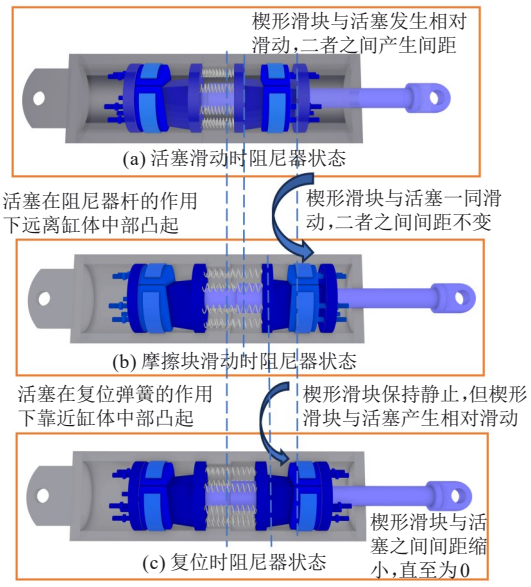


图 2　SCUFD 不同工作状态示意图

Fig. 2　Schematic diagram of different working states of SCUFD

外力继续减小，活塞在复位弹簧作用下带动楔形滑块向左移动，SCUFD 进入无摩擦复位阶段。当外力逐渐低于弹簧预加力时，活塞逐渐与缸体中部凸起接触，弹簧预加力逐渐由阻尼器杆转移到缸体中部凸起。

若 SCUFD 加载位移小于限位螺母与活塞的间距，其工作状态如图 2(a)所示。此时若外力减小进入卸载阶段，活塞所受摩擦力变化与图 2(c)阶段相

似：楔形滑块与活塞间摩擦系数较小时，活塞可自行复位；该系数较大时，活塞需复位弹簧辅助方能复位。因此，SCUFD在摩擦系数较小时具备自复位能力，较大时则需依赖复位弹簧提供恢复力。

若SCUFD承受压力，其工作原理与受拉状态相似。

基于文献[15]对SCUFD力学模型的研究，其受拉时的力-位移曲线如图3所示，受压时的滞回曲线与之相似。该曲线可按刚度差异划分为OA、AB、BC、CD、DE、EF、FA、AO八个阶段，各阶段的输出力与刚度值列于表1。

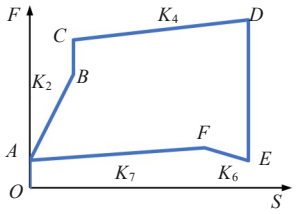


图3 SCUFD的滞回曲线理论模型

Fig. 3 Theoretical hysteretic curve model of SCUFD

表1 SCUFD力学模型

Table 1 Mechanical model of SCUFD

不同阶段	出力	刚度
OA	-	K_1
AB	$(\lambda_1 k_1 + k_2)x + F_p$	K_2
BC	-	K_3
CD	$k_2 x + \mu_{CD} k_1 S_{gap} + F_p$	K_4
DE	-	K_5
EF	$(\lambda_2 k_1 + k_2)x - \lambda_2 k_1 (s_t - S_{gap}) + F_p$	K_6
FA	$k_2 x + F_p$	K_7
AO	-	K_8

注：$\lambda_1 = \dfrac{\sin\alpha + \mu_{AB}\cos\alpha}{\cos\alpha + \mu_{AB}\sin\alpha}$；$k_1 = \dfrac{3E\theta h \tan\alpha}{\ln b - \ln a}$；$\lambda_2 = \dfrac{\sin\alpha - \mu_{AB}\cos\alpha}{\cos\alpha + \mu_{AB}\sin\alpha}$；$\alpha$为活塞倾斜面斜率；$\theta$为摩擦块的弧度；$E$为摩擦块的弹性模量，$b$为摩擦块的外径；$a$为摩擦块的内径；$\mu_{CD}$是缸体与摩擦块之间的摩擦系数；$\mu_{AB}$是活塞与楔形滑块之间的摩擦系数；$k_2$为复位弹簧刚度；$S_{gap}$为限位螺杆螺母与活塞间距离；$s_t$代表限位螺杆的行程；$x$为阻尼器杆的位移值；$F_p$为复位弹簧预加力

由表1可知，μ_{CD}的变化对SCUFD各阶段刚度影响较小，但对其最大出力影响显著。分析表明知，μ_{CD}越大，SCUFD的最大出力越大。μ_{AB}的变化则主要影响力学模型中AB与EF阶段的刚度，对其他阶段影响甚微，即μ_{AB}越大，K_2越大，K_6越小。

为探究活塞面倾斜角α对SCUFD力学模型的影响，依据文献[15]对α范围的规定可知，$\mu_{AB} < \tan\alpha < \mu_{CD} - \mu_{AB}$。同时，根据《机械设计手册》[16]可知，$\mu_{AB}$的最小值为0.05，$\mu_{CD}$的最大值为0.35。据此，计算$\alpha$在3°～17°范围内变化时，SCUFD力学模型在$AB$、$CD$、$EF$及$FA$阶段的刚度，结果如图4所示。

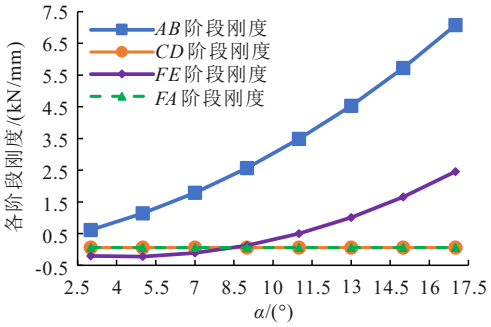


图4 α与SCUFD刚度的关系

Fig. 4 Relationship between α and SCUFD stiffness

由图4可知，当α从3°增大到17°时，AB阶段的刚度K_2与EF阶段的刚度K_6相应增大，而CD阶段的刚度K_4与FA阶段的刚度K_7则基本保持不变。

2 模型试验及有限元模拟

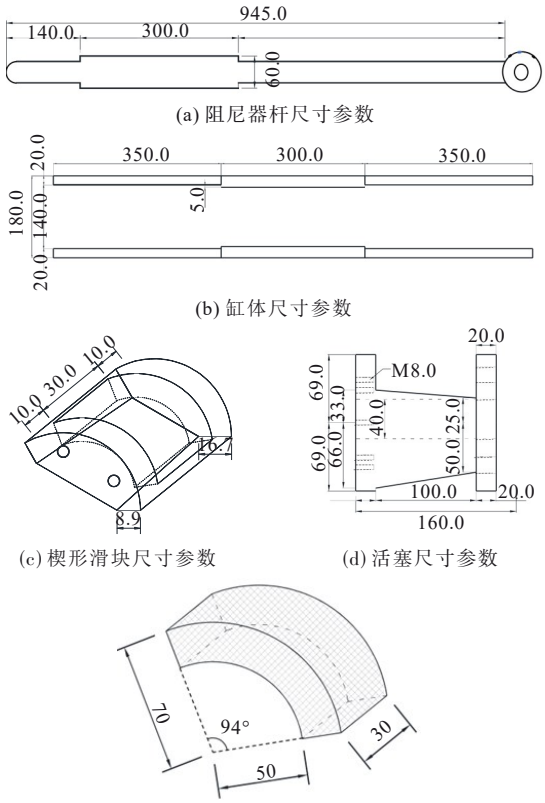
2.1 试验概况

为验证SCUFD的设计合理性及耗能能力，设计并加工了阻尼器试件，试件的最大位移行程为±150 mm。缸体、端板及阻尼器杆采用16Mn高强度钢，活塞和楔形滑块采用Q235低碳钢。摩擦块选用弹性模量较小、与钢材摩擦系数较大的聚氨酯材料。复位弹簧参数为：线径3.5 mm，外径22 mm，长度300 mm；SCUFD共安装8根复位弹簧，其总刚度为0.059 2 kN/mm。主要构件的具体尺寸如图5所示。试验共设置3组试件，各组试件的构造及几何尺寸均相同，具体差异如表2所列。

利用电液伺服作动器，对阻尼器在不同位移幅值和S_{gap}条件下的滞回性能进行测试，试验加载装置如图6所示。作动器内置力和位移传感器，可实时采集SCUFD的出力F和位移x。加载制度如图7所示，加载速率为20 mm/min。

2.2 有限元模拟

为研究SCUFD在加载与卸载过程中恢复力的变化，基于ABAQUS软件建立了试件的有限元模型。模型几何尺寸与试验试件保持一致，各部件均按实际材料属性赋予相应的材料参数。在建立有限元模型时，除复位弹簧外，其余部件均采用三维



(a) 阻尼器杆尺寸参数

(b) 缸体尺寸参数

(c) 楔形滑块尺寸参数　　(d) 活塞尺寸参数

(e) 摩擦块参数

图 5　SCUFD 各构件几何尺寸参数（单位：mm）

Fig. 5　Geometric parameters of SCUFD components (unit: mm)

表 2　试件其余信息

Table 2　Remaining information of specimens

试件	S_{gap}/mm	μ_{CD}	μ_{AB}
SY-1	5.5	0.2	0.1
SY-2	7.8	0.2	0.1
SY-3	10	0.2	0.1

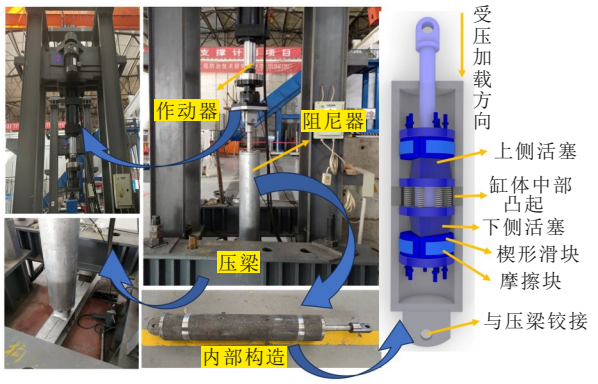


图 6　试验加载装置

Fig. 6　Test loading device

实体单元（C3D8R）。为在保证精度的同时提高计算效率，对摩擦接触区域和非接触区域采用了不同

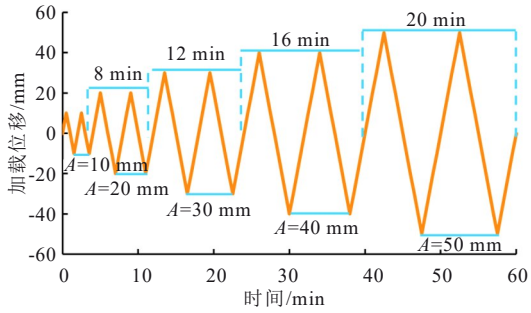


图 7　试验构件加载制度

Fig. 7　Loading protocol of test components

的网格尺寸，分别设置为 3 mm 和 6 mm。

复位弹簧采用连接器单元进行模拟。在左、右活塞端板的中心位置各设置一个参考点，并将对应端板的所有节点“耦合”至该参考点，以确保弹簧作用于活塞的力连续且稳定。各构件接触面之间采用 ABAQUS/Standard 的“面-面”接触对进行定义，法向行为设为无穿透的“硬接触”，切向行为采用“罚函数”公式并定义摩擦系数，以模拟接触面间的摩擦行为。在加载边界条件中，将 SCUFD 的左侧端板节点固定，在右侧端部的耦合参考点上施加位移荷载，并采用与试验相同的加载制度。所建立的有限元模型如图 8 所示。

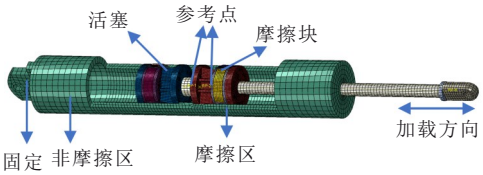


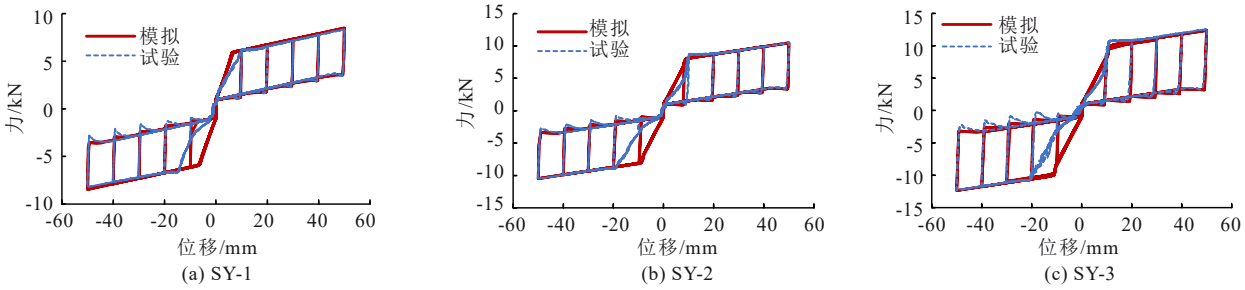
图 8　SCUFD 有限元模型

Fig. 8　Finite element model of SCUFD

2.3　滞回性能分析

滞回曲线反映了 SCUFD 在循环荷载作用下荷载与位移的关系及其耗能能力。通过对 SCUFD 进行低周往复加载试验，得到 3 种不同 S_{gap} 下的滞回曲线，并与有限元模型的计算结果进行对比，结果见图 9 及表 3。图 9 中规定：拉力与向右位移为正，压力与向左位移为负。

由图 9 可知，SCUFD 的滞回曲线呈现显著的旗帜形特征，表明其具备良好的自复位性能。同时，各滞回环形状较为饱满，进一步证实 SCUFD 具有较好的耗能能力。此外，3 个试件的滞回曲线形态基本一致，说明其均处于相同工作状态。而两次加载曲线之间具有极高的相似性，且滞回曲线的各阶



(a) SY-1 (b) SY-2 (c) SY-3

图 9 有限元模拟模型、试验测试的滞回曲线对比

Fig. 9 Comparison of hysteretic curves between finite element simulation and test

表 3 试件的模拟与试验最大出力对比

Table 3 Comparison of simulated and tested maximum output forces of specimens

试件	幅值/mm	最大出力/kN		误差/%
		模拟	试验	
SY-1	10.00	6.17	6.29	2.03
	20.00	6.74	6.58	2.39
	30.00	7.32	7.18	1.94
	40.00	7.90	7.79	1.43
	50.00	8.48	8.38	1.20
SY-2	10.00	8.16	8.66	5.83
	20.00	8.75	8.86	1.19
	30.00	9.32	9.33	0.11
	40.00	9.90	9.95	0.49
	50.00	10.48	10.52	0.40
SY-3	10.00	8.23	8.35	1.44
	20.00	10.40	10.83	4.00
	30.00	10.95	11.42	4.12
	40.00	11.78	12.00	4.08
	50.00	12.37	12.64	4.48

段斜率未因重复加载而发生明显变化，这证明了SCUFD在反复荷载下具有较好的稳定性和可靠性。

图9所示试验滞回曲线呈现出拉、压不对称现象，这与试验采用竖向加载方式有关。在初始阶段，下侧摩擦块与缸体间无摩擦力，楔形滑块由下侧活塞支撑，以防止其因自身重力作用而向下移动。当SCUFD受到压力作用时（加载方向如图6所示），阻尼器杆推动下侧活塞向下移动，楔形滑块在自身重力作用下随活塞一同下移，导致二者之间无相对运动，楔形滑块不发生径向位移。因此，摩擦块与缸体之间始终无正压力，无法产生摩擦力，使得SCUFD在受压时无法正常工作。

为避免此现象，实际测试时在下侧活塞和楔形滑块之间、沿限位螺杆设置了1 mm厚的垫片，使活塞与楔形滑块发生1 mm的相对位移，从而使楔形滑块产生径向位移，并在摩擦块与缸体之间建立较小的正压力。当下侧活塞向下移动时，摩擦块与缸体间的摩擦力可阻止楔形滑块因自重随活塞下移，保证二者之间产生相对位移。

然而，由于阻尼器杆与活塞孔之间存在间隙，活塞向下运动时并非完全居中，导致3个摩擦块的正压力分布不一致，摩擦力大小不稳定。因此在加载初期，楔形滑块在自重作用下仍会发生少量向下位移，使得楔形滑块和活塞之间的相对位移小于活塞位移。而在SCUFD受拉时，上侧活塞向上运动，楔形滑块的自重方向向下，不会出现随活塞向上运动的现象，故二者相对位移等于活塞位移。上述差异是导致SCUFD滞回曲线出现拉压不对称的主要原因。

为解决此问题，可以通过提高活塞孔和阻尼器杆的加工精度，减小二者之间的间隙，从而保证SCUFD受压时3个摩擦块所受摩擦力分布均匀，避免因部分摩擦块初始摩擦力小于自重而随活塞下移。

由图9可知，随着S_{gap}增大，SCUFD的起滑力与最大出力均逐渐增大，表明调节S_{gap}可控制SCUFD的最大静摩擦力，从而影响其最大出力。同时，随着S_{gap}增大，滞回曲线面积逐渐增加，曲线更饱满，说明其耗能能力随S_{gap}增大而逐渐增强。

对比表3数据可见，有限元模型结果与试验结果整体吻合度高，各循环加载工况下最大出力的最大误差约为5.83%，表明所建立的有限元模型具有较高的准确性，可用于SCUFD滞回性能的预测与设计指导。

3 参数分析

为更具体地揭示SCUFD参数对其滞回性能的影响，本节基于有限元模型开展参数分析，重点考虑缸体与摩擦块之间的摩擦系数μ_{CD}、楔形滑块与活塞之间的摩擦系数μ_{AB}和复位弹簧预加力F_p这3个

参数。为明确各参数对SCUFD滞回性能的影响规律，采用控制变量法，即每次只改变一个参数，其余参数保持不变。参数分析共包含7个计算模型，具体如表4所列。

表4　有限元模型信息

Table 4　Information of finite element model

编号	μ_{AB}	μ_{CD}	F_p/kN	S_{gap}/mm
M-1-0.1-0.2-10	0.1	0.2	1	10
M-2-0.1-0.2-10	0.1	0.2	2	10
M-3-0.1-0.2-10	0.1	0.2	3	10
M-1-0.09-0.2-10	0.09	0.2	1	10
M-1-0.11-0.2-10	0.11	0.2	1	10
M-1-0.1-0.25-10	0.1	0.25	1	10
M-1-0.1-0.3-10	0.1	0.3	1	10

有限元模型的命名规则以模型M-1-0.1-0.2-10为例说明，“M”表示模型，1表示弹簧预加力F_p=1 kN，0.1表示楔形滑块与活塞之间的摩擦系数μ_{AB}=0.1，0.2表示缸体与摩擦块之间的摩擦系数μ_{CD}=0.2，10表示限位螺母和活塞之间的间距S_{gap}=10 mm。所有有限元模型均采用与试验相同的加载制度。

为分析SCUFD在上述有限元模拟方案下的力学性能，选取或定义相关力学参数如下：

（1）割线刚度K_S

其计算方法如式(1)所示：

$$K_S=\frac{F_{max}-F_{min}}{x_{max}-x_{min}} \tag{1}$$

式中：F_{max}、F_{min}分别为SCUFD的最大、最小出力；x_{max}、x_{min}分别为阻尼器杆端位移的最大、最小值。

（2）等效黏滞阻尼比ξ

该参数反映SCUFD的耗能能力，ξ越大，耗能能力越强。计算方法如式(2)所示：

$$\xi=\frac{W}{2\pi K_S x_{max}^2} \tag{2}$$

式中：W表示单圈耗能，即一个循环内滞回曲线所围面积。

（3）残余变形率ε

该参数反映SCUFD的自复位能力，ε值越大，自复位能力越弱。计算方法如式(3)所示：

$$\varepsilon=\frac{X_r}{x_{max}} \tag{3}$$

式中：X_r为SCUFD的残余位移。

（4）复位刚度K_R

该参数反映SCUFD复位弹簧的自复位能力，计算方法如式(4)所示：

$$K_R=\frac{F_{fd}}{X_{fd}} \tag{4}$$

式中：F_{fd}为卸载阶段活塞即将滑动时SCUFD的出力；X_{fd}为卸载阶段活塞即将滑动时SCUFD的杆端位移。K_R越大，表明SCUFD的复位能力越强。

3.1　摩擦系数

SCUFD的耗能能力主要由缸体与摩擦块之间的摩擦力和楔形滑块与活塞之间的摩擦力共同提供，因此，这些部件间的摩擦系数直接影响阻尼器的耗能特性。

为探讨缸体与摩擦块之间的摩擦系数μ_{CD}对SCUFD滞回性能的影响，基于ABAQUS建立了模型M-1-0.1-0.25-10、M-1-0.1-0.3-10和M-1-0.1-0.2-10进行分析。不同μ_{CD}下SCUFD的模拟结果见图10及表5。

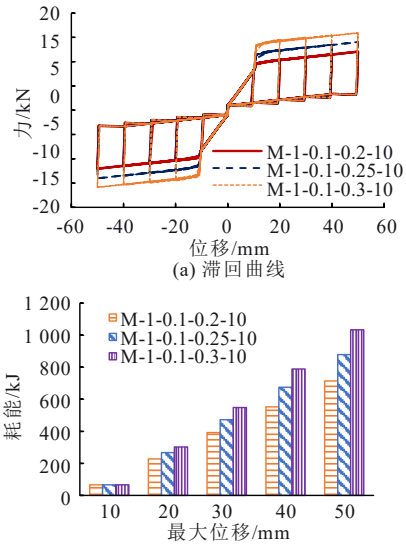


图10　不同μ_{CD}下缸体与摩擦块之间滞回曲线与单圈耗能对比

Fig. 10　Comparison of hysteretic curves and energy dissipation per cycle between cylinder and friction block under different μ_{CD}

由图10(a)可见，当μ_{CD}从0.2增至0.3时，SCUFD的起滑摩擦力和最大出力均有显著提高。μ_{CD}=0.2时，SCUFD最大出力为12.39 kN；μ_{CD}=0.25、0.3时，SCUFD最大出力分别为14.50 kN和16.60 kN，较μ_{CD}=0.2时分别提高17.00%和

表 5 不同 μ_{CD} 下缸体与摩擦块之间各参数对比

Table 5 Comparison of parameters between cylinder and friction block under different μ_{CD}

型号	幅值/mm	K_S/(kN/mm)	ξ/%	K_R/(kN/mm)	ε/%
M-1-0.1-0.2-10	10.00	0.82	12.26	0.09	0.00
	20.00	0.52	17.71	0.07	0.00
	30.00	0.37	18.92	0.07	0.00
	40.00	0.29	19.30	0.07	0.00
	50.00	0.24	19.04	0.07	0.00
M-1-0.1-0.25-10	10.00	0.83	12.26	0.09	0.00
	20.00	0.62	17.62	0.07	0.00
	30.00	0.43	19.63	0.07	0.00
	40.00	0.34	20.13	0.07	0.00
	50.00	0.28	20.07	0.06	0.00
M-1-0.1-0.3-10	10.00	0.83	12.26	0.09	0.00
	20.00	0.73	17.38	0.07	0.00
	30.00	0.50	19.85	0.07	0.00
	40.00	0.39	20.62	0.07	0.00
	50.00	0.32	20.76	0.06	0.00

34.01%。由图 10(b)可知，在同一加载位移下，随着 μ_{CD} 增大，SCUFD 的耗能能力明显增强。

进一步分析表 5 数据发现，在相同位移荷载作用下，随着 μ_{CD} 逐渐增大，K_R 未见明显变化，说明 SCUFD 的自复位能力与 μ_{CD} 基本无关。当 μ_{CD} 由 0.2 增大至 0.3 时，等效黏滞阻尼比呈上升趋势，表明提高 μ_{CD} 可有效提升 SCUFD 的耗能性能。SCUFD 在各级位移荷载作用下的最大等效黏滞阻尼比为 20.76%，残余变形率为 0.00%。证明其在保持良好耗能能力的同时具备完全复位的能力。

综上可知，增大摩擦系数 μ_{CD} 可显著提高 SCUFD 的承载和耗能能力，且对自复位能力无明显影响。

为探讨楔形滑块与活塞之间的摩擦系数 μ_{AB} 对 SCUFD 滞回性能的影响，基于 ABAQUS 建立了模型 M-1-0.09-0.2-10、M-1-0.11-0.25-10 和 M-1-0.1-0.2-10 进行分析。SCUFD 在不同 μ_{AB} 下的模拟结果见图 11 及表 6。

由图 11(a)可知，当 μ_{AB} 从 0.09 增至 0.11 时，起滑摩擦力与 SCUFD 的最大出力未发生明显变化，表明 μ_{AB} 的变化并不影响这两项性能。进一步分析图 11(a)中的滞回曲线可知，当 μ_{AB}=0.09 时，表 1 中所定义的 SCUFD 在 AB 阶段刚度 K_2 为 0.78 kN/mm，EF 阶段刚度 K_6 为 0.017 kN/mm。当 μ_{AB} 为 0.1 和 0.11 时，K_2 分别为 0.82 kN/mm 和 0.87 kN/mm(较

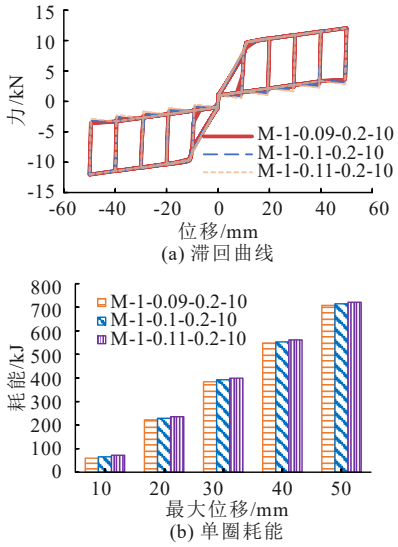


图 11 不同 μ_{AB} 下楔形滑块与活塞之间滞回曲线与单圈耗能对比

Fig. 11 Comparison of hysteretic curves and energy dissipation per cycle between wedge-shaped slider and piston under different μ_{AB}

表 6 不同 μ_{AB} 下楔形滑块与活塞之间各参数对比

Table 6 Comparison of parameters between wedge-shaped slider and piston under different μ_{AB}

型号	幅值/mm	K_S/(kN/mm)	ξ/%	K_R/(kN/mm)	ε/%
M-1-0.09-0.2-10	10.00	0.83	17.32	0.13	0.00
	20.00	0.52	18.92	0.09	0.00
	30.00	0.37	19.17	0.08	0.00
	40.00	0.29	18.93	0.08	0.00
	50.00	0.24	18.79	0.07	0.00
M-1-0.1-0.2-10	10.00	0.82	12.26	0.09	0.00
	20.00	0.52	17.71	0.07	0.00
	30.00	0.37	18.92	0.07	0.00
	40.00	0.29	19.30	0.07	0.00
	50.00	0.24	19.04	0.07	0.00
M-1-0.11-0.2-10	10.00	0.85	13.06	0.06	0.00
	20.00	0.52	18.60	0.05	0.00
	30.00	0.37	19.73	0.06	0.00
	40.00	0.29	19.74	0.06	0.00
	50.00	0.24	19.37	0.06	0.00

μ_{AB}=0.09 时分别提高 5.12% 和 11.54%)，而 K_6 值分别降至 −0.024 kN/mm 和 −0.066 kN/mm(较 μ_{AB}=0.09 时降幅分别为 241.18% 和 488.23%)；K_4 与 K_7 的值则基本保持稳定。这说明 μ_{AB} 的变化主要影响 K_2 和 K_6，对其他阶段刚度的影响相对微弱。K_2 增大和 K_6 减小导致滞回环面积增大，即 SCUFD 耗能能

力提高，该结论在图 11(b)中亦得到直观印证。

表 8 中数据进一步显示，在相同位移荷载作用下，随着 μ_{AB} 逐渐增大，复位刚度 K_R 持续减小，表明 SCUFD 的自复位能力与 μ_{AB} 呈负相关，即 μ_{AB} 越大，自复位能力越弱。当 μ_{AB} 由 0.09 增至 0.11 时，等效黏滞阻尼比呈现上升趋势，说明增大 μ_{AB} 亦可有效提升 SCUFD 耗能性能。SCUFD 在各级位移荷载作用下的最大等效黏滞阻尼比为 19.74%，残余变形率始终为 0.00%。证明其在保持有效耗能的同时仍具备完全复位的能力。

综上可知，增大 μ_{AB} 可提升 SCUFD 的耗能能力，但会削弱其自复位能力；μ_{AB} 的变化对 SCUFD 的起滑摩擦力和最大出力几乎无影响。

3.2　复位弹簧预加力 F_p

为探讨弹簧预加力 F_p 对 SCUFD 滞回性能的影响，基于 ABAQUS 对模型 M-2-0.1-0.2-10、M-3-0.1-0.2-10 与 M-1-0.1-0.2-10 进行对比。SCUFD 在不同 F_p 下的模拟结果见图 12 及表 7。

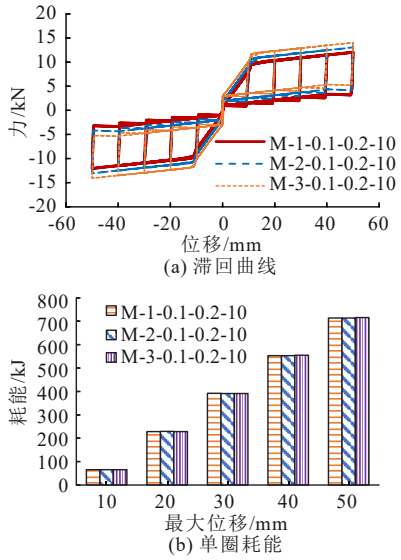


图 12　不同 F_p 下滞回曲线与单圈耗能对比

Fig. 12　Comparison of hysteretic curves and energy dissipation per cycle under different F_p

由图 12(a)可知，当复位弹簧预加力 F_p 从 1 kN 增加到 3 kN 时，SCUFD 的起滑摩擦力和最大出力均呈现增大趋势。而由图 12(b)可知，随着 F_p 增大，SCUFD 的耗能能力基本不变。

由表 9 可知，在相同位移荷载下，随着 F_p 增大，K_R 也增大，表明 SCUFD 的自复位能力与 F_p 呈正相关，即 F_p 越大，自复位能力越强。此外，当 F_p 由 1 kN 增至 3 kN 时，等效黏滞阻尼比 ξ 呈下降趋势。所有工况下残余变形率 ε 均为 0.00%，表明 SCUFD 始终具备完全复位能力。

表 7　不同预加力 F_p 下的各参数对比

Table 7　Comparison of parameters under different F_p

型号	幅值/mm	K_S/(kN/mm)	ξ/%	K_R/(kN/mm)	ε/%
M-1-0.1-0.2-10	10.00	0.82	12.26	0.09	0.00
	20.00	0.52	17.71	0.07	0.00
	30.00	0.37	18.92	0.07	0.00
	40.00	0.29	19.30	0.07	0.00
	50.00	0.24	19.04	0.07	0.00
M-2-0.1-0.2-10	10.00	0.92	11.06	0.20	0.00
	20.00	0.57	16.18	0.13	0.00
	30.00	0.40	17.37	0.10	0.00
	40.00	0.31	17.79	0.09	0.00
	50.00	0.26	17.62	0.08	0.00
M-3-0.1-0.2-10	10.00	1.02	10.08	0.32	0.00
	20.00	0.62	14.90	0.18	0.00
	30.00	0.43	16.06	0.15	0.00
	40.00	0.34	16.50	0.12	0.00
	50.00	0.28	16.39	0.10	0.00

综上，增大 F_p 可显著提高 SCUFD 的最大出力和自复位能力，但会降低其等效黏滞阻尼比(即单位位移下的耗能效率)，对整体耗能能力无影响。

4　结论

为提升传统摩擦阻尼器的自复位性能，本文提出一种自复位单向摩擦阻尼器(SCUFD)，阐述了其构造和工作原理，并通过滞回性能试验和有限元模拟研究其滞回性能；进一步开展参数分析，以深入认识其受力机理。主要结论如下：

(1) SCUFD 的滞回曲线呈现明显的“旗帜形”特征，具备良好的耗能和自复位能力。试验结果与有限元结果吻合良好，所建有限元模型能够准确模拟 SCUFD 的实际工作状态。

(2) 增大缸体与摩擦块之间的摩擦系数(μ_{CD})或提高弹簧预加力(F_p)，均会提高 SCUFD 的最大出力。增大缸体与摩擦块之间的摩擦系数可提升 SCUFD 的耗能能力，但对自复位能力无影响；增大弹簧预加力会降低 SCUFD 的等效黏滞阻尼比，对整体耗能能力影响不大，同时可显著增强 SCUFD 的自复位能力。

(3) 增大楔形滑块与活塞之间的摩擦系数(μ_{AB})会使 SCUFD 的 K_2 增大、K_6 减小，从而提升耗

能能力，但会削弱自复位能力；μ_{AB}的变化对最大出力无明显影响。

参考文献(References)

[1] LI D B, ZHOU Y. A force-resisting rotary friction damper (RFD): verification and comparison with traditional RFD[J]. Engineering Structures, 2022, 273: 115015.

[2] MA R S, CHENG Z P, ZHANG X H, et al. Mechanical behaviors and seismic performance of a novel rotary amplification friction damper (RAFD): experimental and analytical studies[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 223: 109051.

[3] ZHU L H, LIU T, LI Z J, et al. Development, verification, and simulation analysis of variable friction self-centering energy dissipative brace[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, 179: 108537.

[4] 周云，邓雪松，吴从晓. 高层建筑耗能减震新体系概念与实现[J]. 工程抗震与加固改造，2007，29(6)：1-9.
ZHOU Yun, DENG Xuesong, WU Congxiao. The concept and realization of the new systems of tall building with dissipated devices[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2007, 29(6): 1-9.

[5] 石文龙，张浩波. 摩擦阻尼器的研究进展[J]. 地震工程学报，2022，44(1)：1-16.
SHI Wenlong, ZHANG Haobo. Research progress of friction dampers[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(1): 1-16.

[6] FANG C, QIU C X, WANG W, et al. Self-centering structures against earthquakes: a critical review[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2023, 27(15): 4354-4389.

[7] WANG W, FANG C, ZHAO Y S, et al. Self-centering friction spring dampers for seismic resilience[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2019, 48(9): 1045-1065.

[8] XU L H, LIN Z C, XIE X S. Assembled self-centering energy dissipation braces and a force method-based model[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 190: 107121.

[9] 刘明明，李宏男，付兴. 一种新型自复位SMA-剪切型铅阻尼器的试验及其数值分析[J]. 工程力学，2018，35(6)：52-57，67.
LIU Mingming, LI Hongnan, FU Xing. Experimental and numerical analysis of an innovative re-centering shape memory alloys-shearing lead damper[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(6): 52-57, 67.

[10] 屈俊童，卢飞. 一种板式SMA-摩擦复合阻尼器滞回性能试验研究[J]. 结构工程师，2020，36(5)：108-112.
QU Juntong, LU Fei. Experimental study on hysteretic behaviour of a slab SMA-friction damper[J]. Structural Engineers, 2020, 36(5): 108-112.

[11] 李澈，张健豪，王兵，等. U-T坡面变摩擦阻尼器力学性能及减震效果研究[J]. 建筑结构学报，2024，45(6)：97-106.
LI Che, ZHANG Jianhao, WANG Bing, et al. Research on mechanical performance and seismic energy dissipation effect of U-T slope variable friction damper[J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(6): 97-106.

[12] 董慧慧，胡潇，韩强，等. 新型自复位变摩擦耗能支撑及其在桥墩抗震中的应用[J]. 中国公路学报，2024，37(1)：66-80.
DONG Huihui, HU Xiao, HAN Qiang, et al. Novel self-centering variable friction energy dissipation brace and its application in seismic resistance of bridge piers[J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(1): 66-80.

[13] 屈俊童，张超，张翔，等. 新型自复位变摩擦阻尼器试验研究[J]. 地震工程学报，2023，45(1)：20-26.
QU Juntong, ZHANG Chao, ZHANG Xiang, et al. Experimental study on a new self-centering variable friction damper [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(1): 20-26.

[14] 杜修力，王宇迪，董慧慧，等. 旋转式摩擦阻尼器滞回性能及其在多阶段抗震中的应用[J]. 中国公路学报，2023，36(7)：31-46.
DU Xiuli, WANG Yudi, DONG Huihui, et al. Hysteretic performance of the rotational friction damper and its application in multi-stage seismic design[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(7): 31-46.

[15] 刘云帅. 附加新型自复位摩擦阻尼器的桥梁抗震性能分析与试验研究[D]. 兰州：兰州理工大学，2020.
LIU Yunshuai. Analysis and experimental study on seismic performance of bridges with new self-resetting friction dampers [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020.

[16] 成大先. 机械设计手册[M]. 6版. 北京：化学工业出版社，2017.
CHENG Daxian. Handbook of mechanical design[M]. 6th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2017.

(本文编辑：张向红)