

X形软钢阻尼器试验研究及损伤分析

谢丽宇¹, 仝运佳¹, 薛松涛^{1,2}, 王兵³

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 日本东北工业大学工学部建筑学科, 日本 仙台 982-8577; 3. 重庆市建筑科学研究院有限公司, 重庆 400016)

摘要: 通过试验探究一种X形软钢阻尼器的耗能性能, 并采用构件层次的损伤模型进行损伤退化分析。对6组X形软钢阻尼器单片进行了拟静力试验研究, 结果表明该阻尼器能实现全截面同时屈服, 试件滞回曲线饱满, 具有良好的塑性变形能力, 但在大位移作用下, 阻尼器局部影响区具有较明显的损伤退化; 对比研究了3种适用于钢构件的构件层次损伤模拟, 利用预测结果与试验结果最为吻合的损伤模型对阻尼器试件进行损伤预测, 建立损伤指数与损伤程度对应关系, 为阻尼器震后损伤评估及更换提供依据。

关键词: 软钢阻尼器; 拟静力试验; 滞回性能; 损伤模型; 损伤预测

中图分类号: TU 352.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2022)05-0059-06

DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.05.007

Experimental Study and Damage Analysis of X-shaped Mild Steel Damper

XIE Liyu¹, TONG Yunjia¹, XUE Songtao^{1,2}, WANG Bing³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Architecture, Tohoku Institute of Technology, Sendai 982-8577, Japan; 3. Chongqing Construction Science Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400016, China)
XIE Liyu: liyuxie@tongji.edu.cn

Abstract: An experimental study of energy dissipation property of an X-shaped mild steel damper is presented in this paper. Meanwhile, a damage analysis is carried out based on a component level fracture model. Quasi-static tests on six groups of X-shaped mild steel dampers are conducted. The results indicate that the dampers can achieve simultaneous yielding of all the cross-sections and have sufficient plastic deformation capacity. But in large displacement, the damper has an obvious damage degradation. A comparison research for three types of damage simulation of steel members in component level is conducted. Based on the damage model, the predicted results are mostly consistent with the test results, the damage prediction of damper specimen is made. The corresponding relation of damage index and damage degree is established, which provides a theoretical support for component-level damage assessment as well as replacing the damper.

Keywords: mild steel damper; pseudo-static test; hysteretic property; damage model; damage prediction

基于性能化设计和震后阻尼器损伤评估的需求, 量化软钢阻尼器结构损伤十分有必要。一般认为只要消能器满

足了设计位移要求, 其就能在设防地震或罕遇地震作用下按设计时的工作性能正常工作; 但实际上在罕遇地震或超

收稿日期: 2021-07-09; 收到修改稿日期: 2021-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(51778490), 上海市自然科学基金(20ZR1461800)

作者简介:

谢丽宇(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事结构抗震与防灾方面的研究。E-mail: liyuxie@tongji.edu.cn。

仝运佳(1989—), 女, 博士研究生, 主要从事结构振动控制方面的研究。

通信作者:

薛松涛(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事结构抗震与防灾方面的研究。E-mail: xue@tongji.edu.cn。

罕遇地震作用下,消能器可能遭到破坏;在中震作用下,位移型耗能器也可能由于累积塑性变形而产生一定损伤。

目前,国内外对结构和构件破坏准则的研究仅限于结构的抗震分析,很少研究阻尼器的破坏准则。目前提出的破坏模型有:(1)基于变形的破坏模型:Newmark损伤模型^[1],突出了最大塑性变形对损伤的贡献;沈祖炎等提出的损伤模型^[2],突出了最大塑性变形的重要性,一定程度上考虑了首次超越破坏;(2)基于变形与能量的破坏模型:Park-Ang损伤模型^[3],PARK和ANG根据大量混凝土柱循环加载试验结果,提出了最大塑性变形与累积滞回耗能的双参数模型,该模型既能考虑首次超越破坏,又能反映地震累积损伤,但是该模型最初是基于混凝土构件提出,是否适用于高延性软钢阻尼器的损伤评估值得探究;Usami改进损伤模型^[4],位移与能量项采用非线性组合,能够反映大塑性变形较小塑性变形对结构损伤影响更大的试验结果,对于描述钢结构损伤具有较强的适应性;欧进萍损伤模型^[5],能够反映大塑性变形较小塑性变形对结构损伤影响更大的试验结果;(3)基于低周疲劳的损伤模型:Krawinkler-Zhorei模型^[6],KRAWINKLER等根据钢构件常幅加载破坏试验结果,提出了一种基于低周疲劳失效的损伤破坏模型,对于非等幅加载的试件,利用Miner线性叠加准则^[7]将不同位移幅值所引起的损伤叠加起来,但该模型是基于低周疲劳而提出,是否适用于超低周疲劳破坏的软钢阻尼器的损伤评估也非常值得探讨。

另外,现有的损伤模型研究仅关注构件最终的破坏时刻,没有建立起软钢阻尼器各个阶段的损伤程度及破坏现象与损伤指数的对应关系。本文拟通过软钢阻尼器试验的破坏现象、滞回曲线及试验过程中的应变分布,建立从完好到破坏的各个损伤程度与对应的损伤指数之间的关系。

1 试验研究

1.1 试验方案

X形软钢阻尼器采用进口LY225低屈服点钢材。依据《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)^[8]及《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》(GB/T 2975—1998)^[9]的要求制备试件。材性试件与试验阻尼器试件均取自同一块大钢板,试件的切割方向为钢板的轧制方向。

表1 钢材力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of steel

编号	应变速率/ ($\mu\text{e}\cdot\text{s}^{-1}$)	下屈服 强度/MPa	抗拉 强度/MPa	屈服 比/%	伸长 率/%
1	167	266.60	454.41	58.67	41.85
2	333	263.49	449.88	60.45	38.41

试验在同济大学防灾减灾国家重点实验室进行,为避免由于作动器与平行四边形加载框架连接部位螺栓滑移对阻尼器记录位移产生的误差,在阻尼器端部设置了水平拉线位移计记录阻尼器的水平方向位移,另设置竖向拉线位移计监测由于平行四边形加载框架水平变位后上下平行边相对移动引起的阻尼器竖向变形。试验装置如图1所示。

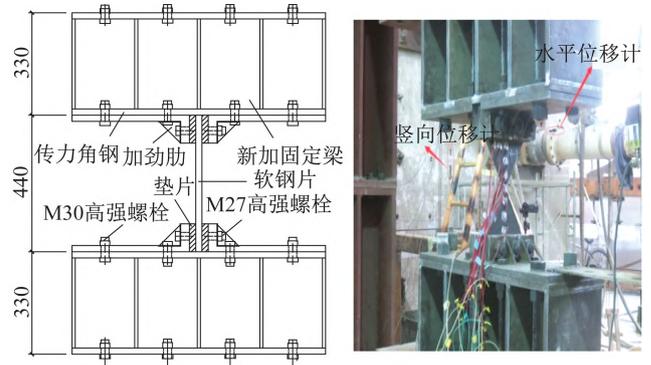


图1 试验装置(单位:mm)

Fig. 1 Test setup (Unit: mm)

试验时共有6组试件:1组单调加载试件(M-1);1组常幅(45 mm)加载试件(C-1),加载制度为幅值45 mm往复加载30圈,幅值55 mm往复加载7圈,变幅加载直至试件破坏;其余4组试件为变幅加载,每级幅值循环 n 次($n=1,3,5,7$),试件编号分别为V-1($n=1$)、V-2($n=3$)、V-3($n=5$)、V-4($n=7$)。所有试件均加载至破坏。变幅加载初始幅值为20 mm,70 mm及其以下每级幅值增量为10 mm,超过70 mm,每级幅值增量为5 mm。

在试件M-1、V-1、V-2、V-3的中间部位各布置7个应变测点(测点①~⑦),如图2所示。其中颈部区域的测点③、④、⑤采用1 mm×1 mm三轴45°应变花,其余测点采用单轴应变片(图2)。

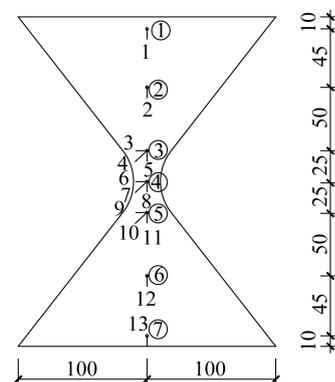


图2 应变片测点布置(单位:mm)

Fig. 2 Layout of strain gauges (Unit: mm)

1.2 试验结果及分析

1.2.1 滞回分析

采用水平拉线位移计记录的位移数据与试验仪器自

动记录的荷载数据绘制荷载-位移曲线。6组试件的荷载-位移曲线分别如图3~8所示。

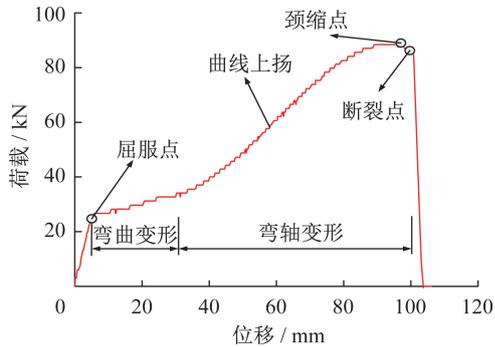


图3 试件M-1荷载-位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curve of specimen M-1

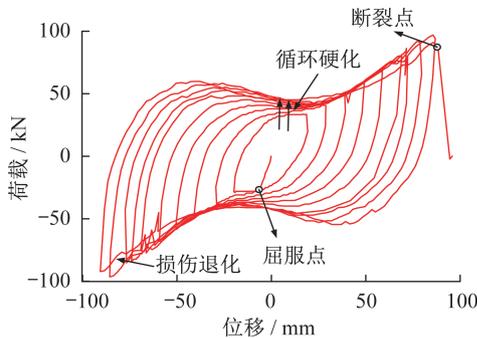


图4 试件V-1荷载-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curve of specimen V-1

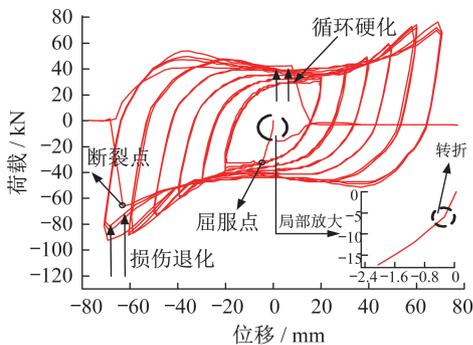


图5 试件V-2荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curve of specimen V-2

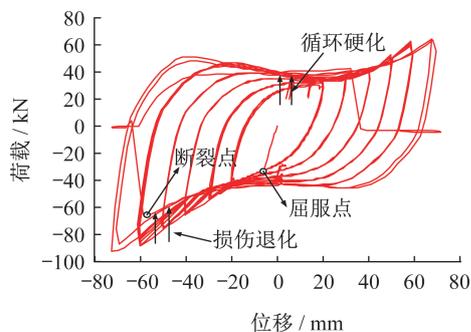


图6 试件V-3荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curve of specimen V-3

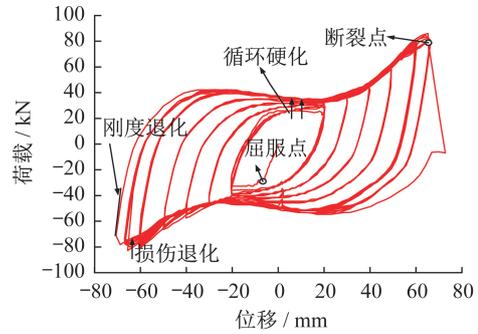


图7 试件V-4荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curve of specimen V-4

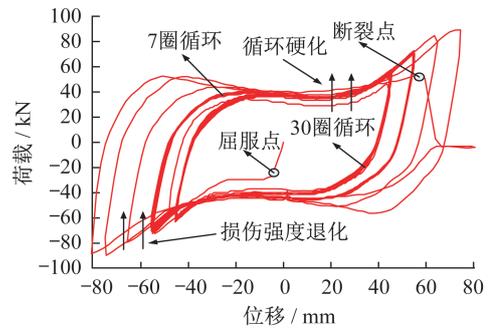


图8 试件C-1荷载-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curve of specimen C-1

(1) 试件C-1前30圈滞回曲线承载力及滞回环面积均变化不大,满足《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[10]对于在位移型消能器设计位移幅值下往复循环30圈后,消能器主要设计指标误差和衰减量不应超过15%、且不应有明显疲劳现象的要求;(2)在7圈幅值为55 mm(层间位移角1/55)的位移作用下,阻尼器滞回曲线承载力及滞回环面积依旧较为稳定,损伤退化发展较小;(3)试件在第2圈变幅加载过程中,表现出明显的损伤退化现象。

根据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)^[11]的相关规定,采用能量耗散系数E来表征阻尼器的能量耗散能力。由表2可知:(1)试件的延性系数超过15时,其能量耗散系数均超过2,试件滞回曲线较为稳定,没有明显的刚度退化;(2)试件C-1的能量耗散系数较变幅加载试件的能量耗散系数要小,这是由于试件C-1经历了30圈幅值为45 mm的循环加载,轴向变形的影响较为突出。

1.2.2 应变分析

应变测点以测点④为中心对称分布(图2),试验结果也显示出应变的对称分布,故仅取测点①~④进行应变分析。试件M-1在位移加载至60 mm时,测点④处的拉应变(即8号应变片,如图2所示)过大,导致测量结果溢出,因此仅取溢出前数据进行分析。以下同理:试件V-1上测点①的应变数据在50 mm循环加载时溢出;试件V-2上测点①、④的应变数据在第1个50 mm循环加载时溢出;试件V-3上测

表2 阻尼器试件的延性系数及能量耗散系数

Tab.2 Ductility coefficient and energy dissipation coefficient of damper specimens

试件编号	屈服位移/ mm	加载位移/ mm	延性系数 μ	能量耗散 系数 E
V-1	3.00	50	16.67	2.32
V-2	3.23	50	15.48	2.36
V-3	3.06	50	16.34	2.12
V-4	3.34	50	14.97	2.18
C-1	3.14	55	17.52	2.04

点①、④的应变数据在第2个40 mm循环加载时溢出。各试件应变随加载位移的变化情况如图9~12所示。

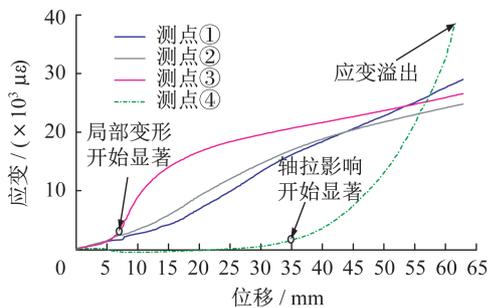


图9 试件M-1应变-位移曲线

Fig. 9 Strain-displacement curves of specimen M-1

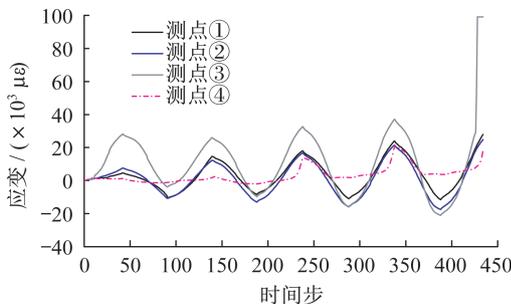


图10 试件V-1应变-时间步曲线

Fig. 10 Strain-time step curves of specimen V-1

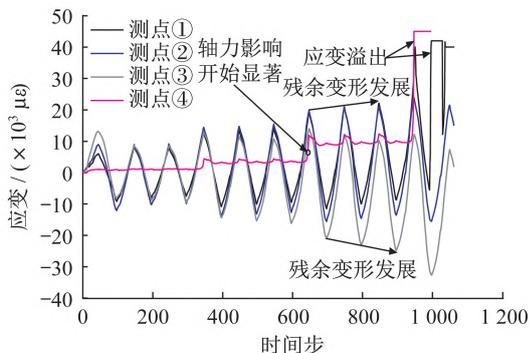


图11 试件V-2应变-时间步曲线

Fig. 11 Strain-time step curves of specimen V-2

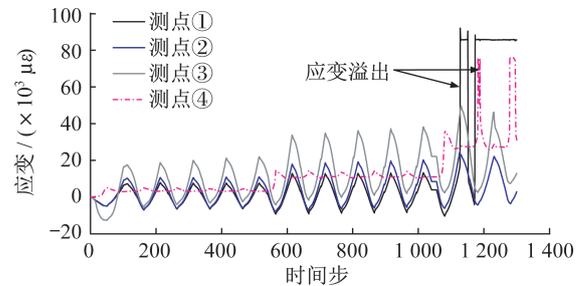


图12 试件V-3应变-时间步曲线

Fig. 12 Strain-time step curves of specimen V-3

(1) 试件M-1应变分析

在小位移(<7 mm)作用下,测点①~③的应变几乎重合,测点④的实测应变几乎接近于零,说明沿构件长度方向相同截面厚度处的材料同时屈服,这与设计理论吻合较好;在7~35 mm(弯曲变形影响区与弯轴变形影响区交界点)位移作用下,测点①、②的应变较为接近,但测点③的应变显著高于测点①、②的应变,这是由于测点③位于颈部过渡区,截面较小,在传递剪力以及安装过程中发生了局部变形;在超过35 mm(交界点)位移作用下,测点①~③的应变较为接近,表明阻尼器端部、中部以及颈部过渡区在大位移作用下仍然能够很好地共同工作,颈部测点④的应变急速增加,这是由于位移加载超过交界点后,轴向变形的影响开始显著;位移加载超过60 mm后,测点④由于应变过大导致数据溢出,表明颈部为阻尼器的薄弱位置,在设计时应予以加强。

(2) 试件V-1~V-3应变分析

在位移幅值20 mm作用下,测点①与测点②的应变基本重合,测点④的应变接近于零,与计算理论吻合较好;测点③的应变高于测点①、②的应变,且表现为拉压应变不对称,表明颈部过渡区此时存在局部变形及残余变形。在位移幅值30 mm作用下,测点①与测点②的应变仍基本重合,表明设计的阻尼器性能较为稳定;试件V-3上测点④具有较小的拉应变,且不反复,表明循环作用加速了阻尼器颈部发展残余变形。在位移幅值40 mm作用下,测点①与测点②的应变总体上仍较为重合,但测点①已表现出一定的拉压应变不对称现象,表明阻尼器端部开始发展残余变形;测点③的拉压应变不对称现象加剧(图11),表明阻尼器颈部过渡区的残余变形加剧;变幅加载试件上测点④的应变均不存在拉压反复现象,且应变值均超过屈服应变,表明阻尼器颈部受轴向变形影响显著,发展残余变形;试件V-3上测点①及测点④的应变溢出,这是由于试件V-3较其余变幅加载试件循环次数多,累积塑性变形大,残余变形发展深。在位移幅值50 mm作用下,各变幅加载试件上测点①及测点④的应变均溢出,说明阻尼器端部中央及颈部区域为应力较集中的薄弱位置。

2 损伤分析

分别用 Park-Ang 损伤模型^[3], Usami 改进损伤模型^[4]和 Krawinkler-Zhorei 模型^[6]对试件进行损伤退化预测,结果如图 13~15 所示。

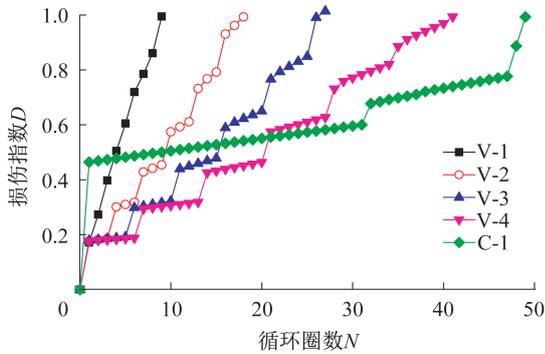


图 13 Park-Ang 模型对各试件的损伤预测
Fig. 13 Damage prediction of each specimen by Park-Ang model

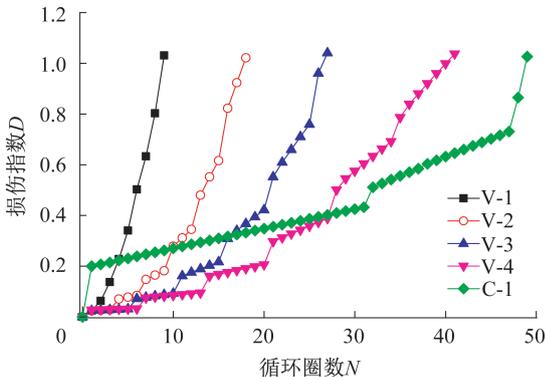


图 14 Usami 模型对各试件的损伤预测
Fig. 14 Damage prediction of each specimen by Usami model

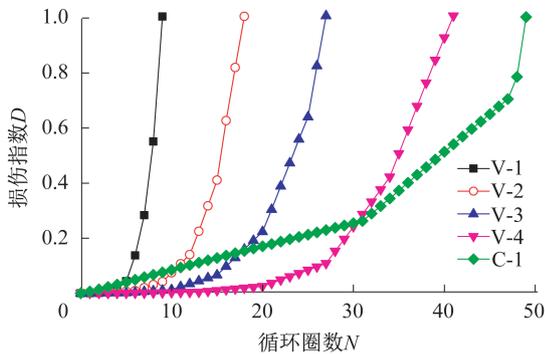


图 15 Krawinkler-Zhorei 模型对各试件的损伤预测
Fig. 15 Damage prediction of each specimen by Krawinkler-Zhorei model

Usami 模型对于逐级加载试件能够进行很好的预测,并且对常幅加载试件的损伤预测也具有较强的适用

性。因此本文选用 Usami 模型计算各组软钢阻尼器试件不同损伤程度对应的损伤指数,然后求得各损伤程度对应的损伤指数范围与均值,如表 3 所示。再综合表 3 的计算结果,并参考国内外学者^[12-13]针对损伤程度与损伤指数对应关系的划分,提出了 X 形软钢阻尼器损伤程度与损伤指数的对应关系,具体如表 4 所示。

表 3 试件不同损伤程度对应的损伤指数

Tab. 3 Damage indexes corresponding to different damage degree of specimens

试件编号	基本完好	轻度破坏	中度破坏	严重破坏	失效破坏
V-1	0.137	0.228	0.425	0.803	1.031
V-2	0.148	0.312	0.552	0.823	1.022
V-3	0.095	0.217	0.422	0.759	1.041
V-4	0.091	0.373	0.692	0.880	1.037
C-1	—	0.302	0.584	0.865	1.026
平均值	0.118	0.286	0.535	0.826	1.031
变异系数	0.246	0.225	0.213	0.059	0.007

表 4 阻尼器试件不同损伤程度对应的损伤指数

Tab. 4 Damage indexes corresponding to different damage degree of damper specimens

损伤程度	基本完好	轻度破坏	中度破坏	严重破坏	失效破坏
损伤指数	0~0.15	0.15~0.35	0.35~0.70	0.70~0.85	0.85~1.00

参考《建筑消能减震技术规程》(JGJ 297—2013)^[14]对金属屈服型阻尼器的性能要求,金属阻尼器震后出现较为明显的累积变形、累积损伤及局部变形时应更换阻尼器,即对应于表 4 的中度及其以上破坏程度时,应及时更换阻尼器。

3 结论

(1) 6 组 X 形软钢阻尼器均经历了表面氧化皮剥落、残余变形累积、颈部过渡区域局部屈曲、颈缩、断裂等 5 个阶段。

(2) X 形软钢阻尼器的实际耗能能力良好,在规范要求的疲劳加载条件下,没有出现低周疲劳现象,是一种性能较为稳定的耗能阻尼器。

(3) 软钢阻尼器在位移加载超过交界点(35 mm)时,轴向变形的影响开始显著,试件的滞回曲线上扬,颈部区域应变显著增大,颈部区域为阻尼器的薄弱部位。

(4) 对比研究了 3 种构件损伤模型(适用于钢结构),选择了损伤预测效果最好的 Usami 模型作为本文的损伤预测模型,并根据 Usami 模型的预测结果提出了 X 形软

钢阻尼器损伤程度与损伤指数的对应关系,为震后阻尼器的损伤评估及阻尼器更换提供了依据。

参考文献:

- [1] CASTIGLIONI C A, PUCINOTTI R. Failure criteria and cumulative damage models for steel components under cyclic loading [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2009, 65(4): 751-765. DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.12.007.
- [2] 沈祖炎,董宝,曹文衍. 结构损伤累积分析的研究现状和存在的问题[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 1997, 25(2): 135-140.
SHEN Zuyan, DONG Bao, CAO Wenxian. Development and evaluation of researches on damage cumulation analysis for building structures [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 1997, 25(2): 135-140. (in Chinese)
- [3] PARK Y J, ANG A H. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1985, 111(4): 722-739. DOI: 10.1061/(ASCE) 0733-9445 (1985)111:4(722).
- [4] KUMAR S, USAMI T. A note on the evaluation of damage in steel structures under cyclic loading [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1994, 40: 177-188.
- [5] 欧进萍,牛荻涛,王光远. 多层非线性抗震钢结构的模糊动力可靠性分析与设计[J]. *地震工程与工程振动*, 1990, 10(4): 27-37. DOI: 10.13197/j.eeev.1990.04.004.
OU Jinping, NIU Ditao, WANG Guangyuan. Fuzzy dynamic reliability analysis and design of multi-story nonlinear seismic steel structures [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1990, 10(4): 27-37. DOI: 10.13197/j.eeev.1990.04.004. (in Chinese)
- [6] KRAWINKLER H, ZOHREI M. Cumulative damage in steel structures subjected to earthquake ground motions [J]. *Computers & Structures*, 1983, 16(1/2/3/4): 531-541. DOI: 10.1016/0045-7949(83)90193-1.
- [7] MINER M A. Cumulative damage in fatigue [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1945, 12(3): 159-164. DOI: 10.1115/1.4009458.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 金属材料拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. *Metallic Materials—Tensile Testing—Part 1: Method of Test at Room Temperature: GB/T 228.1—2010* [S]. Beijing: China Standards Press, 2010. (in Chinese)
- [9] 国家质量技术监督局. 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备: GB/T 2975—1998[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
The State Bureau of Quality and Technical Supervision. *Steel and Steel products—Location and Preparation of Test Pieces for Mechanical Testing: GB/T 2975—1998* [S]. Beijing: China Standards Press, 1998. (in Chinese)
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 2016版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. *Code for Seismic Design of Buildings: GB 50011—2010* [S]. 2016 ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. *Specification for Seismic Test of Buildings: JGJ/T 101—2015* [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [12] 徐强, 郑山锁, 程洋, 等. 基于结构损伤的在役钢框架地震易损性研究[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(6): 162-167. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2015.06.031.
XU Qiang, ZHENG Shansuo, CHENG Yang, et al. Seismic vulnerability of steel framework in service based on structural damage [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(6): 162-167. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2015.06.031. (in Chinese)
- [13] 吴轶, 黄照棉, LEE V W, 等. 基于刚度退化和滞回耗能的圆钢管混凝土柱损伤模型[J]. *地震工程与工程振动*, 2014, 34(5): 172-179. DOI: 10.13197/j.eeev.2014.05.172.wuy.022.
WU Yi, HUANG Zhaomian, LEE V W, et al. Damage model of concrete-filled circular steel tube columns based on stiffness degradation and hysteretic energy [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2014, 34(5): 172-179. DOI: 10.13197/j.eeev.2014.05.172.wuy.022. (in Chinese)
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑消能减震技术规程: JGJ 297—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. *Technical Specification for Seismic Energy Dissipation of Buildings: JGJ 297—2013* [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)