

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.06.016

设置接触式加劲肋的剪切连接耗能器 滞回性能试验研究

李宗京, 杨炬龙, 张寅超

(河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对剪切连接耗能器腹板上焊接的加劲肋焊缝处存在较高的焊接残余应力, 在反复荷载作用下容易产生疲劳破坏的问题, 设计了一种设置接触式加劲肋的剪切连接耗能器, 并通过往复加载试验验证了其滞回性能。试验结果表明: 无加劲肋的剪切连接耗能器过早发生腹板面外屈曲, 设置传统焊接式加劲肋的剪切连接耗能器过早发生腹板开裂, 低周疲劳性能和耗能能力均受到较大影响, 而设置接触式加劲肋的剪切连接耗能器能够较好抑制腹板面外屈曲并避免加劲肋焊缝引起的残余应力, 从而有效延缓腹板裂纹的产生和扩展, 使低周疲劳性能和耗能能力得到明显改善。

关键词: 剪切连接耗能器; 加劲肋; 滞回性能; 往复加载试验

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2025)06-0132-06

Experimental study on hysteretic performance of shear link dampers with contact-type stiffeners

LI Zongjing, YANG Julong, ZHANG Yinchao

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Due to high residual stress at the stiffener welds on the web, shear link dampers (SLDs) are prone to fatigue damage under cyclic loading. Therefore, a new SLD with contact-type stiffeners was designed, and cyclic loading experiments were conducted to verify its hysteretic performance. The results indicate that the web shows premature out-of-plane buckling for the SLD without stiffeners, and cracks initiate early for the SLD with conventional welded stiffeners, which are detrimental to the low-cycle fatigue performance and energy dissipation capacity. In contrast, for the SLD with contact-type stiffeners, out-of-plane buckling of the web can be effectively suppressed, and residual stresses in the web caused by stiffener welds can be avoided. Consequently, the initiation and propagation of web cracks can be delayed, which significantly improves the low-cycle fatigue performance and energy dissipation capacity of the SLD.

Key words: shear link damper; stiffener; hysteretic performance; cyclic loading experiment

近年来,我国地震工程研究的发展呈现从抗震、减隔震走向可恢复功能的趋势^[1-2]。传统的结构抗震设计方法依赖主体结构构件的损伤耗散地震输入的能量,结构减隔震设计方法通过在结构中设置主、被动耗能装置耗散地震输入的能量^[3-6],可恢复功能结构则着重于实现震后快速修复。可更换耗能部件是实现可恢复功能结构的一条重要途径^[7],其原理是在结构中合适的位置引入可更换耗能部件,在地震中利用可更换耗能部件耗散地震输入的能量,并使结构损伤集中在可更换耗能部件中,从而在震后只需对可更换耗能部件进行更换即可迅速完成结构修复。剪切连接耗能器(shear link damper, SLD)是一种典型的可更换耗能部件,近年来受到广泛认可并应用于建筑工程、桥梁工程等领域,例如用于偏心支撑框架结构中作为耗能梁段^[8-10],用于剪力墙结构中作为耗能连梁^[11-13],用于框筒结构中作为深梁耗能段^[14-16],以及用于桥梁结构中作为桥墩减震装置^[17-19]等。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52208163);中央高校基本科研业务费专项资金项目(B230201035)

作者简介: 李宗京(1987—),男,副教授,博士,主要从事钢结构及结构减震研究。E-mail: lizongjing@hhu.edu.cn

引用本文: 李宗京,杨炬龙,张寅超. 设置接触式加劲肋的剪切连接耗能器滞回性能试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(6): 132-137.

LI Zongjing, YANG Julong, ZHANG Yinchao. Experimental study on hysteretic performance of shear link dampers with contact-type stiffeners[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(6): 132-137.

SLD 主要由腹板、翼缘、端板焊接而成,在地震中主要依靠腹板的剪切塑性变形耗能。为防止腹板过早发生面外屈曲影响 SLD 的滞回性能,往往需要在腹板上焊接加劲肋,如图 1(a)所示。SLD 的破坏模式通常为腹板在加劲肋焊缝处发生撕裂破坏,其原因是在加劲肋焊缝附近存在较高的焊接残余应力,并且加劲肋焊缝附近存在应力集中,因此在反复荷载作用下,腹板易在加劲肋焊缝处产生疲劳裂纹,导致腹板撕裂破坏。可见,腹板焊接加劲肋制约了 SLD 的低周疲劳性能和耗能能力。为解决上述问题,本文设计了一种设置接触式加劲肋(加劲肋不与腹板直接焊接,改为两侧边与翼缘焊接,且内侧与腹板接触顶紧)的 SLD,如图 1(b)所示,并进一步通过往复加载试验验证了其滞回性能。

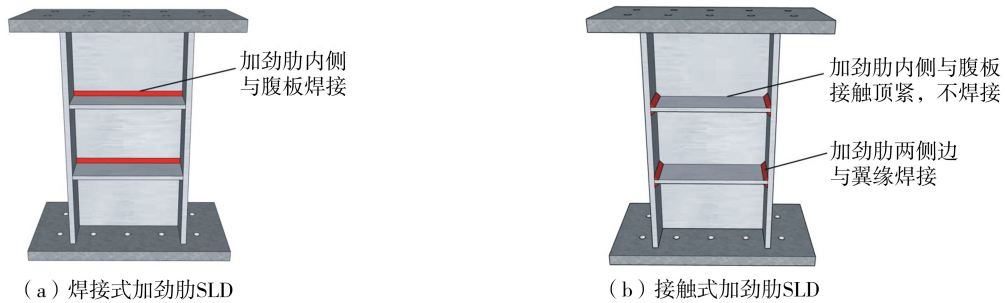


图 1 焊接式加劲肋与接触式加劲肋 SLD 对比

Fig. 1 Comparison of SLDs with welded stiffeners and contact-type stiffeners

1 试验概况

1.1 试件设计

本文对 4 个腹板(长、宽、厚分别为 280、160、5 mm)、翼缘(长、宽、厚分别为 280、90、8 mm)尺寸完全相同的 SLD 进行试验研究,试件照片如图 2 所示。其中,试件 A 为无加劲肋的 SLD;试件 B 为设置传统焊接式加劲肋的 SLD,其加劲肋直接与腹板焊接;试件 C 为设置接触式加劲肋的 SLD,其加劲肋仅与翼缘焊接、不与腹板焊接,且加劲肋内侧与腹板接触顶紧;试件 D 在试件 C 的基础上,在加劲肋内侧与腹板之间设置 2 mm 厚的聚四氟乙烯(PTFE)板,以减小变形过程中加劲肋内侧与腹板之间的摩擦,避免加劲肋与腹板反复刮擦造成腹板损伤。所有试件的腹板均采用 Q235 钢制作,实测屈服强度 253 MPa、极限强度 375 MPa;翼缘均采用 Q355 钢制作,实测屈服强度 344 MPa、极限强度 495 MPa;加劲肋均采用 Q355 钢制作,长、宽、厚分别为 160、43、6 mm,间距为 90 mm,实测屈服强度 398 MPa、极限强度 536 MPa。

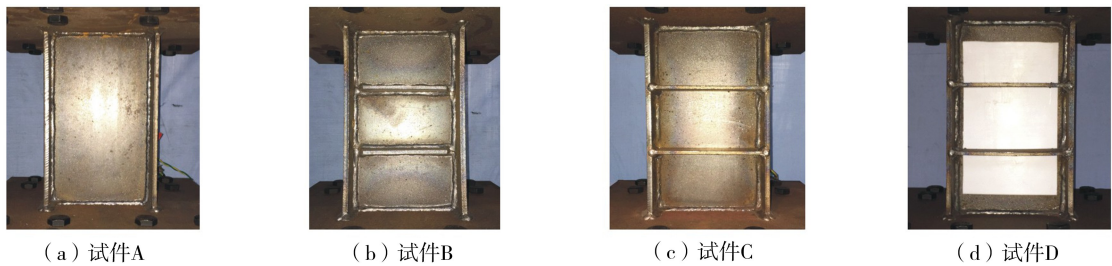


图 2 试件照片

Fig. 2 Pictures of specimens

1.2 加载装置及加载制度

试验采用的加载装置如图 3 所示,该加载装置为一个铰接框架体系,由刚度较大的顶梁、地梁和两根立柱通过销节点连接而成,其中顶梁与作动器相连,地梁与实验室地面固定,SLD 试件通过高强螺栓与上、下基座相连,与基座一并安装到铰接框架中。在试验过程中,作动器推动顶梁做水平低周往复加载,使 SLD 试件上下两端发生水平相对错动,从而模拟 SLD 在地震中的行为。

定义 u 为 SLD 上下两端发生的相对水平位移, h 为 SLD 的高度, $\gamma = u/h$ 为相应的位移角。采用美国钢结构抗震设计规范(AISC341-22 American Institute for Steel Construction)中推荐的加载制度,在加载幅值 $\gamma \leq 0.01$ 的各级加载中,每级循环 6 圈;在加载幅值为 0.015、0.02 的加载中,每级循环 4 圈;在加载幅值为 0.03 的加载中循环 2 圈;在加载幅值为 0.04、0.05 的加载中,每级循环 1 圈;在接下来的各级加载中,位移角每级

递增 0.02 且只循环 1 圈,直至试件破坏。

2 试验现象

试件的变形破坏模式如图 4 所示。试件 A 由于缺乏有效的腹板面外屈曲约束机制,在加载初期即发生腹板面外屈曲,最终发生了明显的面外屈曲,且腹板中心位置发生撕裂破坏,腹板四周焊缝位置未见裂纹。试件 B 腹板上的裂缝在位移角达到 0.15 时产生于加劲肋焊缝端部,然后在腹板上沿加劲肋焊缝方向迅速发展,最终腹板的中间区格发生水平撕裂破坏;试件 B 的腹板始终未发生面外屈曲。试件 C 在位移较小时未出现腹板的面外屈曲,在位移较大时,腹板被加劲肋分隔的各区格内均出现面外屈曲,腹板上的裂缝在位移角达到 0.17 时产生于腹板与翼缘的连接焊缝处,然后在腹板上沿竖向逐渐发展,最终在位移角达到 0.19 时,试件在腹板中间区格的侧边发生竖向撕裂破坏。试件 D 的变形破坏模式与试件 C 类似,其中 PTFE 板也发生了较大的变形。对比采用焊接式加劲肋与接触式加劲肋的 SLD 变形破坏过程可见,当 SLD 采用不同加劲肋时,腹板裂纹的发生位置、扩展方向及扩展速度均存在较大差别,采用接触式加劲肋可以延缓腹板裂纹的产生和扩展,有利于 SLD 的低周疲劳性能。

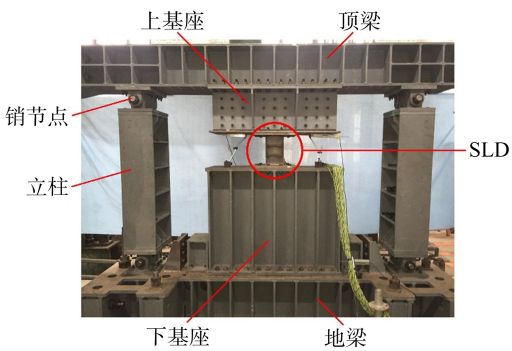


图 3 加载装置
Fig. 3 Loading device

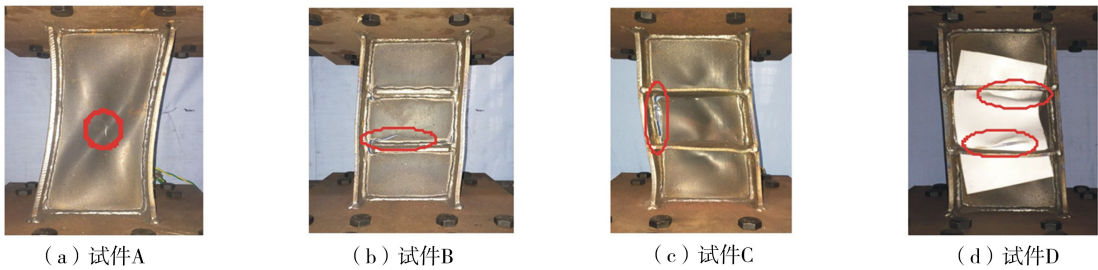


图 4 试件变形破坏模式
Fig. 4 Deformation and failure mode of specimens

在两个采用接触式加劲肋的 SLD 试件中,加劲肋与腹板接触位置的损伤情况如图 5 所示,可见对于试件 C,当加劲肋内侧与腹板直接接触时,在往复加载变形过程中,加劲肋内侧对腹板造成了明显的刮擦损伤;对于试件 D,当在加劲肋内侧与腹板之间设置 PTFE 板时,加劲肋内侧对 PTFE 板造成了明显的刮擦损伤,且最终 PTFE 板几乎被加劲肋内侧棱角割穿。可见 PTFE 板虽然能够在小变形时减小加劲肋内侧与腹板之间的摩擦和损伤,但由于 PTFE 板本身硬度不高,在大变形时易被加劲肋内侧棱角割穿。

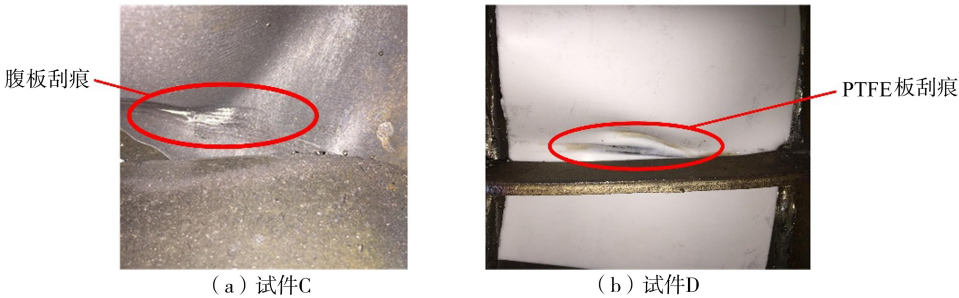


图 5 加劲肋与腹板接触位置的损伤情况
Fig. 5 Damage condition at contact position between stiffener and web

3 试验结果与分析

3.1 滞回性能

试件的滞回曲线如图 6 所示。试件 A 的滞回曲线在位移角 $\gamma \leq 0.05$ 时未出现明显捏缩现象,但在位移角达到 0.07 后开始出现明显捏缩现象,这是由于试件 A 在位移角达到 0.07 后腹板开始发生面外屈曲,且随

着加载位移增大,面外屈曲逐渐变大,捏缩效应也更加明显。试件 A 最终在位移角达到 0.13 时发生破坏。试件 B 在位移角达到 0.13 之前滞回曲线始终较为饱满,未出现明显的捏缩现象及刚度、强度退化现象,但在位移角达到 0.15 时迅速丧失承载力。这是由于试件 B 在位移角达到 0.13 之前未发生明显的腹板屈曲或裂纹,而位移角达到 0.15 之后腹板产生裂纹且迅速开展,导致承载力急剧下降。可见在腹板裂缝产生前,试件 B 的滞回性能一直保持良好的,而裂缝一旦产生,滞回性能会随之出现急剧劣化。试件 C 在位移角达到 0.13 之前滞回曲线始终较为饱满,未出现明显的捏缩现象及刚度、强度退化现象;当位移角达到 0.15 时,由于腹板开始在各区格内发生面外屈曲,导致滞回曲线出现捏缩现象;当位移角达到 0.17 时,腹板侧边开始形成竖向裂缝,导致滞回曲线开始出现刚度和强度退化现象,最终在位移角达到 0.19 时出现了明显的承载力下降。试件 D 的滞回曲线变化规律与试件 C 基本一致。

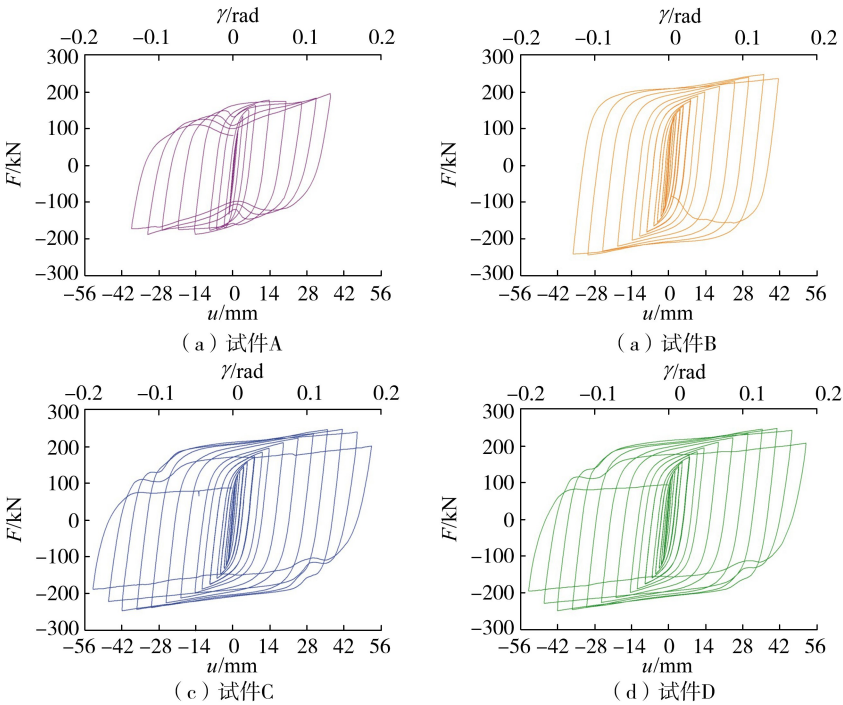


图 6 试件滞回曲线
Fig. 6 Hysteresis curves of specimens

试件的骨架曲线如图 7 所示。在加载位移较小时,4 个试件的骨架曲线基本吻合。随着加载位移的逐渐增大,试件 A 的骨架曲线在位移角达到 0.07 之后与其他试件的骨架曲线发生明显分岔,可见腹板面外屈曲显著降低了 SLD 的强度。当位移角小于 0.15 时,试件 B、C、D 的骨架曲线基本吻合;当位移角达到 0.15 时,试件 B 发生破坏失去承载能力;而试件 C、D 则在位移角达到 0.19 时才出现明显的承载力下降,具有更好的低周疲劳性能。

综上对比可见,无加劲肋 SLD 滞回性能最差,主要制约因素是腹板过早发生面外屈曲;采用传统焊接式加劲肋的 SLD 滞回性能其次,主要制约因素是腹板过早产生裂缝,且裂缝迅速开展导致承载力急剧下降;采用接触式加劲肋的 SLD 滞回性能最优,接触式加劲肋既能够抑制腹板面外屈曲,也能够延缓腹板裂缝的产生和开展,从而有效改善了 SLD 的滞回性能。

3.2 耗能性能

试件在往复加载过程中每一圈所消耗的能量 E 等于该圈滞回环所包络的面积。试件的耗能曲线如图 8 所示,其代表了试件在往复加载过程中各级位移角下所消耗的能量,其中同一级位移角中含有多圈加载时,

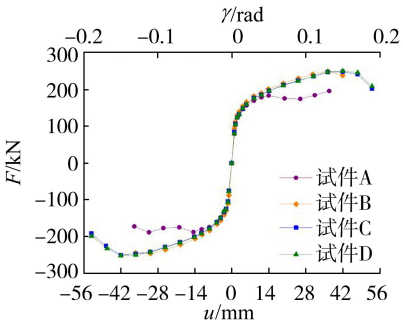


图 7 试件骨架曲线
Fig. 7 Backbone curve of specimens

取各圈耗能量的平均值作为该位移角对应的耗能量。由于在试验初期试件基本为弹性状态,所有试件的耗能量均接近于 0。随着位移角的逐渐增大,各试件的耗能曲线开始出现同步提升。当位移角 $\gamma \leq 0.05$ 时,4 个试件的耗能量几乎一致;当位移角达到 0.07 时,试件 A 的耗能曲线出现分岔,由于腹板面外屈曲引起滞回曲线捏缩,导致其耗能量与其他试件的差距逐渐变大;当位移角达到 0.15 时,试件 B 的耗能曲线出现分岔,由于腹板撕裂引起承载力急剧减小,导致其耗能量骤降;试件 C、D 的耗能曲线直至位移角达到 0.19 时才出现下降,表现出更加稳定的耗能能力,并且试件 C、D 最终的累积耗能量约为试件 A 的 2.5 倍、试件 B 的 1.5 倍,可见采用接触式加劲肋可以显著提高 SLD 的耗能性能。

3.3 分析讨论

无加劲肋的试件由于过早发生腹板面外屈曲,导致滞回曲线捏缩,严重影响其滞回性能,是表现最差的试件,可见加劲肋对于 SLD 的滞回性能至关重要。采用传统焊接式加劲肋的试件,腹板上同时存在翼缘与腹板之间的竖向焊缝和加劲肋与腹板之间的水平焊缝,在焊缝的交接处存在较大的焊接残余应力,容易在低周往复荷载作用下产生疲劳裂纹,且裂纹一旦产生即沿加劲肋焊缝方向迅速扩展,导致承载力骤降,制约了 SLD 滞回性能的稳定发挥。采用接触式加劲肋的试件,加劲肋与腹板之间无需焊缝连接,减小了腹板上的焊接残余应力和应力集中,从而延缓腹板裂纹的产生和开展,且接触式加劲肋也能够有效抑制腹板面外屈曲,因此采用接触式加劲肋的试件表现出最优的滞回性能和低周疲劳性能。

PTFE 板是一种常用的低摩阻材料,常用于减小接触面之间的摩擦,在加劲肋内侧与腹板之间设置 PTFE 板的目的是减小二者之间反复刮擦带来的损伤,但试验中出现 PTFE 板在加载后期被割穿的现象,这是由于 PTFE 板本身材质硬度不足,而加劲肋内侧边缘较为锋利,因此 PTFE 板易被加劲肋内侧边缘棱角割穿。为避免 PTFE 板被割穿,可在加工 SLD 时,对加劲肋内侧进行适当打磨,以去除加劲肋内侧边缘的锋利棱角。

4 结 论

a. 采用接触式加劲肋有利于改善 SLD 的低周疲劳性能。无加劲肋的 SLD 腹板面外屈曲发生早、变形大,采用传统焊接式加劲肋的 SLD 腹板疲劳裂纹发生早、扩展快,均导致 SLD 过早发生破坏。采用接触式加劲肋的 SLD 既能够有效约束腹板面外屈曲,也能够大幅减小腹板焊接残余应力和应力集中,从而延缓疲劳裂纹的产生和扩展,明显改善 SLD 的低周疲劳性能。

b. 采用接触式加劲肋有利于改善 SLD 的滞回性能。无加劲肋的 SLD 滞回曲线捏缩现象明显,采用传统焊接式加劲肋的 SLD 滞回曲线在腹板裂纹产生后迅速丧失承载力,滞回性能受到较大影响。采用接触式加劲肋的 SLD 表现出更加稳定的滞回性能和耗能能力,累积耗能量显著高于无加劲肋的 SLD 和采用传统焊接式加劲肋的 SLD。

c. PTFE 板有利于减小变形过程中加劲肋内侧与腹板之间的刮擦损伤,但易被加劲肋内侧棱角割穿。可对加劲肋内侧进行适当打磨,以去除加劲肋内侧边缘的锋利棱角。

参考文献:

[1] 周颖,吴浩,顾安琪. 地震工程:从抗震、减隔震到可恢复性[J]. 工程力学,2019,36(6):1-12. (ZHOU Ying, WU Hao, GU Anqi. Earthquake engineering: from earthquake resistance, energy dissipation, and isolation, to resilience [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(6): 1-12. (in Chinese))

[2] 周旺旺,刘德稳,招继炳,等. 三维长周期地震动下层间隔震高层建筑结构地震响应分析[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2023,45(2):188-195. (ZHOU Wangwang, LIU Dewen, ZHAO Jibing, et al. Seismic response analysis of mid-story isolation high-rise building structure under three-dimensional long period ground motion [J]. Journal of Nanjing Tech University

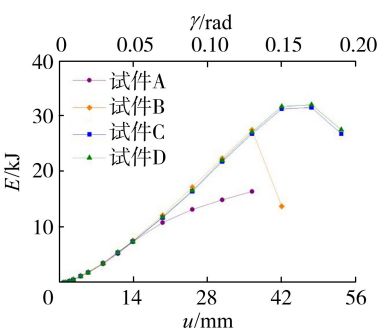


图 8 试件耗能曲线
Fig. 8 Energy dissipation curve of specimens

(Natural Science Edition),2023,45(2):188-195. (in Chinese))

[3] 王远欣,苏雷,孙岳霆,等. 纳米流体阻尼器对高桩码头抗震性能的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(4):85-94. (WANG Yuanxin,SU Lei,SUN Yueting,et al. Influence of nanofluidic dampers on seismic performance of pile-supported wharf [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(4):85-94. (in Chinese))

[4] 方有珍,张志成,黄志豪,等. PEC 柱-钢梁摩擦耗能部分自复位组合框架抗震性能数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):140-147. (FANG Youzhen,ZHANG Zhicheng,HUANG Zhihao,et al. Numerical simulation on seismic performance of PEC column-steel beam composite frame with friction damped self-centering connection [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(2):140-147. (in Chinese))

[5] 冯若愚,刘健,柏洁,等. 基于构件模态应变能比的隔震烟风道结构等效线性化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(4):346-352. (FENG Ruoyu,LIU Jian,BAI Jie,et al. Equivalent linear analysis of isolated gas duct based on the modal potential energy ratio [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(4):346-352. (in Chinese))

[6] 卜阳,陆伟东,查杭飞,等. 多高层木结构建筑抗震性能及设计方法研究进展[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2024,46(4):368-377. (BU Yang,LU Weidong,ZHA Hangfei,et al. Research progress on seismic performance and design methods for multi-storey timber structures[J]. Journal of Nanjing Tech University(Natural Science Edition),2024,46(4):368-377. (in Chinese))

[7] 吕西林,陈聪. 带有可更换构件的结构体系研究进展[J]. 地震工程与工程振动,2014,34(1):27-36. (LYU Xilin,CHEN Cong. Research progress in structural systems with replaceable members[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics,2014,34(1):27-36. (in Chinese))

[8] 殷占忠,李锦铭,董龙光,等. 偏心支撑钢框架可替换剪切连接件试验研究[J]. 建筑结构学报,2019,40(9):157-165. (YIN Zhanzhong,LI Jinming,DONG Longguang,et al. Experimental study of replaceable shear links for eccentrically braced steel frames[J]. Journal of Building Structures,2019,40(9):157-165. (in Chinese))

[9] ZHUANG Liangdong,WANG Jiaji,NIE Xin,et al. Experimental study on seismic behaviour of eccentrically braced composite frame with vertical LYP steel shear link [J]. Engineering Structures,2022,255:113957.

[10] HU Shujun,LIU Shangwen,XU Hongwei,et al. Experimental investigation of an innovative very short shear link with shear slotted bolted connection in eccentrically braced frames [J]. Structures,2024,66:106890.

[11] MALLA N,WIJEYEWICKREMA A C. Direct displacement-based design of coupled walls with steel shear link coupling beams [J]. Structures,2021,34:2746-2764.

[12] LI Guoqiang,PANG Mengde,LI Yanwen,et al. Experimental comparative study of coupled shear wall systems with steel and reinforced concrete link beams [J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings,2019,28(18):e1678

[13] 纪晓东,马琦峰,王彦栋,等. 钢连梁可更换消能梁段抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2014,35(6):1-11. (JI Xiaodong,MA Qifeng,WANG Yandong,et al. Cyclic tests of replaceable shear links in steel coupling beams [J]. Journal of Building Structures,2014,35(6):1-11. (in Chinese))

[14] 连鸣,程倩倩,苏明周,等. 带端板螺栓连接可更换耗能梁段的高强钢框筒结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2021,42(11):29-40. (LIAN Ming,CHENG Qianqian,SU Mingzhou,et al. Experimental study on seismic performance of high-strength steel framed-tube structures with end-plate connected replaceable shear links [J]. Journal of Building Structures,2021,42(11):29-40. (in Chinese))

[15] CHENG Qianqian,LIAN Ming,SU Mingzhou,et al. Experimental and finite element study of high-strength steel framed-tube structures with replaceable shear links under cyclic loading [J]. Structures,2021,29:48-64.

[16] ZHANG Hao,SU Mingzhou,LIAN Ming,et al. Experimental and numerical study on the seismic behavior of high-strength steel framed-tube structures with end-plate-connected replaceable shear links [J]. Engineering Structures,2020,223:111172.

[17] XIE Wen,BAO Yangyang,WANG Jing,et al. Test and simulation on tall reinforced concrete bridge bents with shear links as structural fuses components [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2023,173:108087.

[18] HONG Yangfan,YE Lihao,XIE Wen. Seismic fragility and resilience improvement of conventional bridges supported by double-column piers utilizing shear links [J]. Structures,2023,57:105309.

[19] YE Lihao,WANG Yuan,XIE Wen. Seismic fragility and loss assessment on earthquake-resilient double-column tall piers with shear links subjected to far-field and near-fault ground motions [J]. Structures,2022,45:1774-1787.