

# 带可替换剪切耗能梁段的防屈曲偏心支撑 钢框架动力试验研究

殷占忠<sup>1,2\*</sup>, 李星<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 甘肃土木工程防灾减灾重点实验室, 兰州 730050)

**摘要:** 可替换剪切耗能梁段作为与偏心支撑钢框架分离设计的独立耗能部件, 不仅能在大震发生时将结构的塑性变形局限在耗能梁段区域内, 更重要的是可以方便震后对结构的修复。文中制作了3榀该钢框架结构的缩尺模型, 并对其进行了单向振动台试验, 得到了结构的动力特性、塑性发展情况及破坏机理, 并对模型的应力分布、位移响应、加速度响应等进行了分析研究。结果表明: 该模型具备良好的耗能性能, 剪切耗能梁段与防屈曲支撑构件分批耗能使得结构在地震作用下有较好的抗震性; 带有可替换剪切耗能梁段的防屈曲偏心支撑钢框架构件的最大层间位移角符合规范要求, 并且拥有良好的安全和强度储备; 结构的变形以剪切变形为主, 各层间剪力增幅相对均衡, 且结构具有优良的抗震性能, 大震下可降低多层结构的加速度放大系数, 有效减小结构的动力响应。

**关键词:** 可替换剪切耗能梁段; 偏心支撑; 防屈曲支撑; 振动台试验; 位移响应; 应力分布; 加速度放大系数

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)05-0057-11

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20231108001

## Dynamic Test of Steel Eccentrically Buckling-Restrained Braced Frames with Replaceable Shear Links

YIN Zhanzhong<sup>1,2\*</sup>, LI Xing<sup>1</sup>

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

\*Corresponding author: yinzhanzhong@lut.edu.cn

**Abstract:** As an independent energy-dissipating component designed separately from the eccentrically braced steel frame, the replaceable shear links not only confine the plastic deformation of the structure to the region of the energy-dissipating links during large earthquakes, but also, more importantly, facilitate the repair of the structure after the earthquake. In this paper, three scaled models of this steel frame structure were fabricated and unidirectional shaking table tests were conducted to obtain the dynamic characteristics, plastic development and damage mechanism of the structure, and the stress distribution, displacement response and acceleration response of the model were analysed and studied. The results show that the specimen has good energy dissipation performance,

收稿日期: 2023-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(51368037, 51968044), 甘肃省住房和城乡建设厅科研项目(JK2022-06)

作者简介:

殷占忠(1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事钢结构、钢-混凝土组合结构性能的研究。

E-mail: yinzhanzhong@lut.edu.cn。(通信作者)

李星(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事钢结构方向的研究。

and the sequential energy dissipation of shear links and buckling-restrained brace members makes the structure have good seismic performance under earthquake. The maximum inter-story drift angle of the buckling-restrained eccentrically braced steel frame specimen with replaceable shear links meets the requirements of the code, and it has a good safety as well as strength reserve. The structural deformation is mainly dominated by shear deformation, and the increase of shear force in each layer is relatively balanced, and it has excellent seismic performance. The acceleration amplification factor of the multi-story structure can be reduced under large earthquakes to effectively reduce the dynamic response of the structure.

**Keywords:** replaceable shear link; eccentric brace; buckling-restrained brace; shaking table test; displacement response; stress distribution; acceleration amplification factor

研究表明,偏心支撑钢框架作为高层建筑中最常用的结构体系,可以为建筑提供更优良的抗震性能,对比带中心支撑的钢框架,偏心支撑钢框架能有效避免由于钢支撑失稳所导致的结构承载力迅速下降和位移急剧增大的问题。与传统抗弯框架相比,偏心支撑钢框架不仅增大了结构的抗侧刚度和极限承载力,还具备与纯框架相似的良好延性。FUJIMOTO<sup>[1]</sup>及其团队对抗弯钢框架进行了研究分析,提出一种新型的偏心支撑框架。经过试验得出:该偏心支撑钢框架在结构和性能上都表现出了显著的特点。苏明周等<sup>[2-4]</sup>对带Y形偏心支撑钢框架结构进行了振动试验,基于相关实验设计与数据分析,得出结论:Y形偏心支撑框架在地震作用下具有良好的抗震性能,进一步探讨了当构件的设计参数变化时对结构耗能性能的影响,为后续的研究提供了有价值的参考。田小红等<sup>[5]</sup>对两榀单跨高强钢组合K形偏心支撑钢框架结构进行了缩尺振动台试验,并推导出原型结构的地震反应现象,结果表明该钢框架具有较好的抗震性能。IOAN等<sup>[6]</sup>将可拆卸耗能梁段偏心支撑钢框架结构进行振动台试验,验证了在地震作用下结构的塑性变形均集中于可拆卸耗能梁段处的结论。殷占忠等<sup>[7]</sup>设计了一种装配式防屈曲支撑钢框架结构的试验,其端部配置延性铸造件,并通过螺栓与框架结构进行连接,该支撑试验结果显示,延性铸造件可以取代传统的节点板,有效预防框架节点板在地震后易出现脆性断裂的问题。

刘虢等<sup>[8]</sup>对模型进行了数值分析,揭示了带可替换耗能梁段结构在各种外力作用下的表现,从而突显出这种结构相较于传统结构在稳定性和安全性上的显著优势。BALUT和GIONCU<sup>[9]</sup>提出了一种可替换的耗能梁段,耗能梁段采用螺栓分离连接的方式连接,以便使耗能梁段更容易发生非弹性形变,从而起到保护框架梁柱和支撑结构的目的。吕西林等<sup>[10]</sup>将耗能可更换连梁比作安全保险丝,这种设计有助于在地震等极端条件下,大幅度地耗散由外部施加的震动能量,使得结构在整体上具备强大的耗能潜力以及平滑的刚度退化特性。YIN等<sup>[11]</sup>对多榀剪切连接件构件进行了加载试验,研

究该构件屈曲后的性能和极限承载力,并依据试验参数推导了该类型剪切连接件的恢复力模型,该模型可准确计算剪切连接件的抗剪强度。MANSOUR<sup>[12]</sup>通过对带可替换耗能梁段的偏心支撑钢框架结构进行了非线性分析,发现耗能梁段具有出色的抗剪切性能和优异的塑性特性。李通等<sup>[13]</sup>对损坏或老化的耗能梁段进行了更换,并进行了一系列的性能试验。通过这些试验得出结论:更换新的耗能梁段后,结构的抗震和耐久性能并没有受到影响,证明该类耗能梁段框架结构具有很高的重复使用价值。殷占忠等<sup>[14]</sup>使用自行设计的纯剪切试验加载架,将耗能梁段单独从框架中分离出来后进行试验研究,得到了更精确的可替换独立耗能梁段恢复力模型。

在现有的研究基础上,学者们设计了一种带可替换剪切耗能梁段的防屈曲偏心支撑钢框架,该框架将传统的剪切耗能梁段与框架进行了分离,设计并加工成独立的剪切耗能元件,使得可替换剪切耗能梁段能够承担结构的主要塑性变形,从而最大限度地发挥其耗能性能。为了研究地震作用下该钢框架结构的动力特性和应变响应等,设计了不同层数的3榀试件,选取El Centro波、Taft波和兰州波对试件进行了振动台试验,观察试件的破坏现象,研究结构的破坏模式,分析对比模型结构的动力特性变化和地震响应规律。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

研究学者们选取了3榀钢框架试件进行单向振动台试验,其缩尺比例分别为1/15、1/20、1/25,在原型结构中剪切耗能梁段与框架梁的连接采用端板螺栓连接,由于试件的缩尺比例较大,为实现剪切耗能梁段的稳固连接,故将连接形式改为端板-端板的焊接连接形式,防屈曲支撑基本构造如图1所示,其中将内核管与接触环焊接为一体,外套管与接触环之间紧密接触。

试件主要物理相似关系如表1所示,各缩尺试件的几何参数如表2所示。根据抗震规范要求,将地震设计

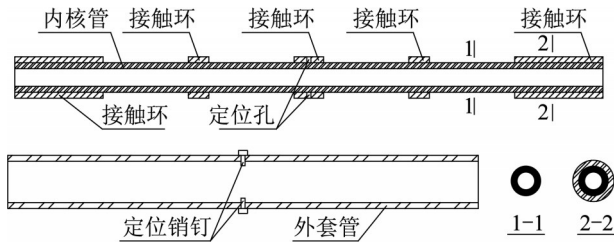


图1 防屈曲支撑基本构造

Fig. 1 Basic construction of buckling-restrained brace

分组分为第3组,设计烈度为8度(0.2g),属于II类场地,几何尺寸及构造如图2所示。

所有试件均采用Q235钢材,各个部件之间连接均采用焊接从而组成整体结构,并进行钢材材性试验,钢材力学性能如表3所示。试验在WS-Z30小型振动台中进行,根据模型结构的质量相似比计算得出:试件EBF-1结构配重为27.35 kg;试件EBF-2结构配重为21.26 kg;试件EBF-3结构配重为15.10 kg。

表1 试件主要物理量相似关系

Table 1 Similarity relationship of main variables of specimens

类型	相似常数符号	试件 EBF-1	试件 EBF-2	试件 EBF-3
长度/mm	$S_l$	0.040	0.050	0.067
弹性模量/GPa	$S_E$	1	1	1
加速度/g	$S_a$	1.82	1.54	1.22
应力/MPa	$S_\sigma$	1	1	1
密度/( $\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3}$ )	$S_\rho$	12.70	12.99	13.01
质量/kg	$S_m$	$1.02\times 10^{-3}$	$1.62\times 10^{-3}$	$3.25\times 10^{-3}$
线位移/mm	$S_\delta$	0.040	0.050	0.067
频率/ $\text{s}^{-1}$	$S_f$	6.53	5.51	4.44
速度/( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$S_v$	0.280	0.277	0.271
时间/s	$S_t$	0.15	0.18	0.23

表2 缩尺试件的几何参数

Table 2 The geometric parameters of the scaled specimens

试件编号	构件	截面尺寸/mm
试件 EBF-1	钢框架柱	H12×10×0.9×0.9
	钢框架梁	H10×8×0.9×0.9
	可替换剪切耗能梁段	H7×5×0.9×0.9
	防屈曲支撑内核管	6×0.9
	防屈曲支撑约束构件	Φ8×0.9
试件 EBF-2	钢框架柱	H20×20×0.9×0.9
	钢框架梁	H20×10×0.9×0.9
	可替换剪切耗能梁段	H15×7×0.9×0.9
	防屈曲支撑内核管	7×0.9
	防屈曲支撑约束构件	Φ9×0.9
试件 EBF-3	钢框架柱	H30×30×0.9×0.9
	钢框架梁	H30×15×0.9×0.9
	可替换剪切耗能梁段	H25×15×0.9×0.9
	防屈曲支撑内核管	9×0.9
	防屈曲支撑约束构件	Φ10×0.9

1.2 测点布置

为测定结构各层的层间位移和位移反应,学者们分

别将拉线位移计布置在钢框架每层钢梁的水平轴线及柱脚处;将加速度传感器布置在振动台面板和梁柱节点处;

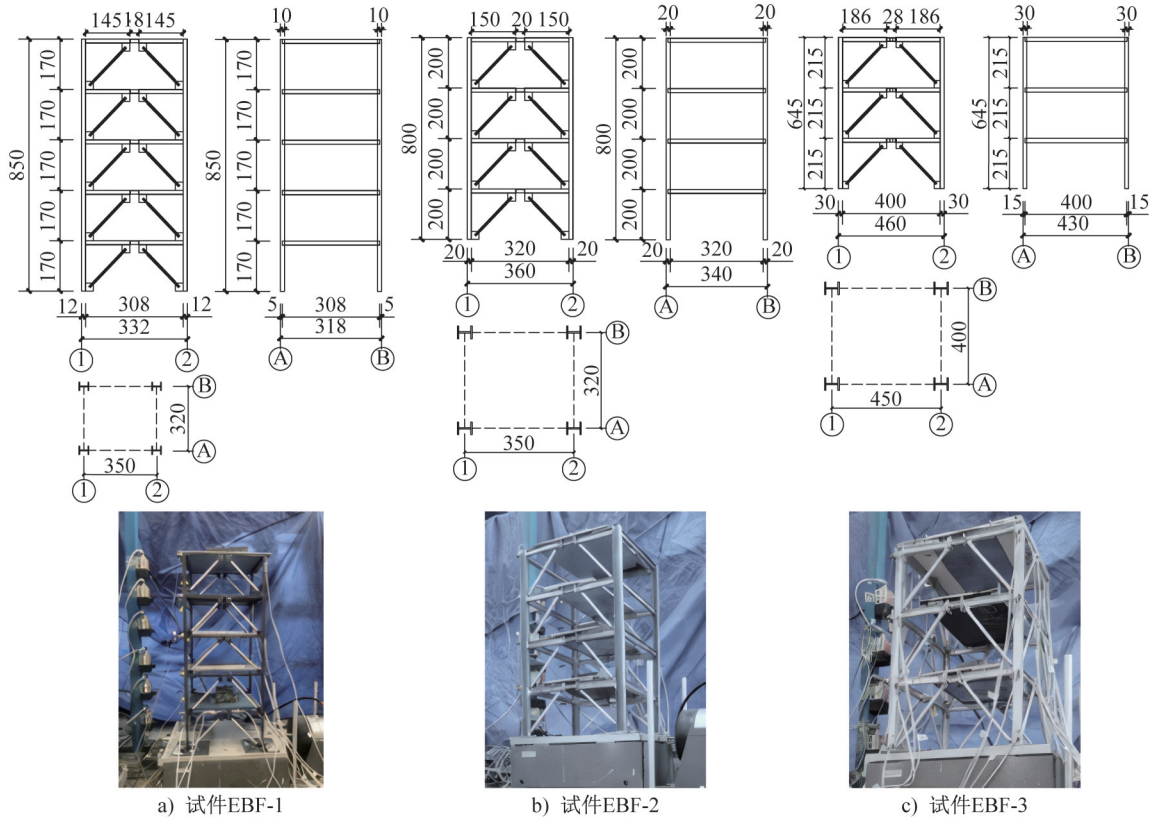


图2 试件几何尺寸及构造(单位:mm)

Fig. 2 Geometry and construction of specimens (unit: mm)

表3 钢材性能参数

Table 3 Steel performance parameters

部位	钢材牌号	弹性模量 $E$ /MPa	屈服强度 $f_y$ /MPa	极限强度 $f_u$ /MPa	伸长率 $\epsilon$ /%
框架柱	Q235	190 522	255	431	26.14
框架梁	Q235	190 432	253	428	26.05
防屈曲支撑	Q235	190 357	247	436	25.91
耗能梁段	Q235	190 689	249	425	25.90
平均值	—	190 500	251	430	26.00

同时为获得结构关键部位的应变分布规律,在结构每层耗能梁段的腹板及上下翼缘处、受力较大的柱脚处、梁柱

节点和防屈曲支撑等部位处布置应变片,测点布置位置如图3所示。

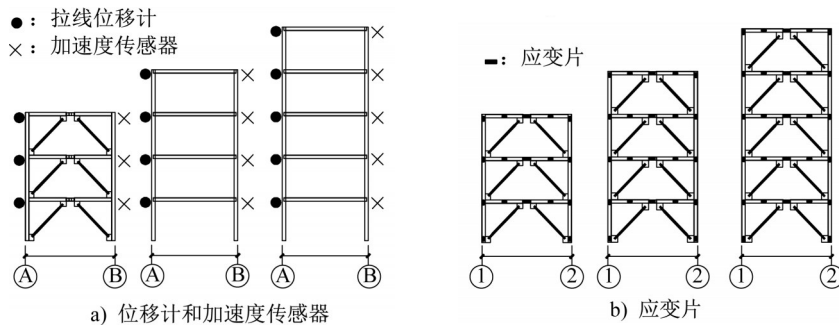


图3 试件测点布置

Fig. 3 Specimen measuring point arrangement

### 1.3 地震波的选取

按规范对选取的El Centro波、Taft波和兰州波的加速度幅值进行调幅,模拟试件在三条地震波下当地震烈度为多遇、设防、罕遇及加速度为1.0g工况时试件的动力

响应。所选地震波的时程曲线如图4所示,将所选三条地震波的反应谱与规范反应谱进行了对比如图5所示,其满足抗震规范要求,表4( $A_{max}$ 为加速度峰值)给出了试验加载工况,地震波采用 $x$ 单向加载。

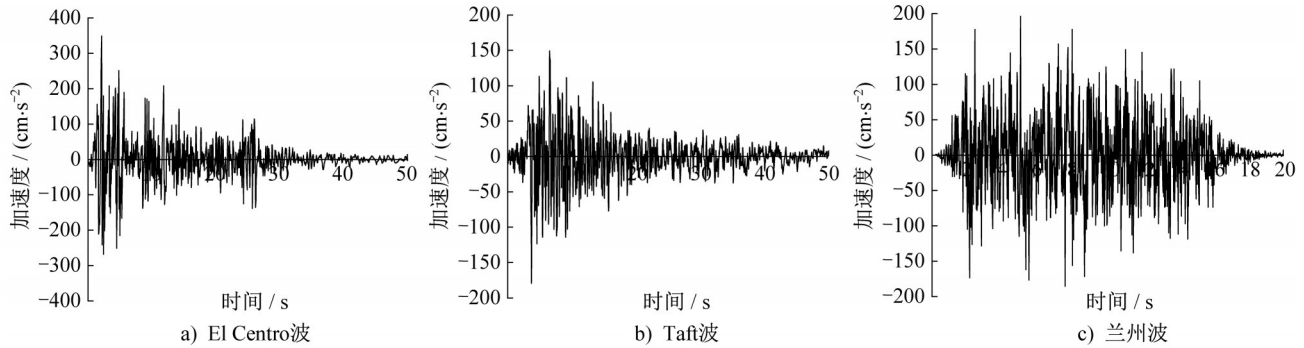


图4 所选地震波的时程曲线

Fig. 4 Time history curve of selected seismic wave

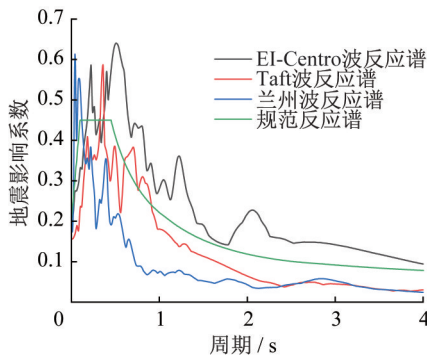


图5 所选地震波反应谱对比

Fig. 5 Comparison of selected seismic wave response spectra

## 2 试验现象

试件EBF-1在8度多遇和9度多遇工况加载过程中,剪切耗能梁段与主体框架连接处出现了微小的变形,可替换剪切耗能梁段承担了结构中的主要弹性变形,而框架梁与边缘柱应力值相对较低,表明结构仍处于弹性阶段;在8度设防地震的作用下,框架梁与底层的剪切耗能梁段发生轻微的上下错动(见图6a)),腹板开始发挥剪切耗能作用,这种耗能作用有效地防止了试件因超出极限承载力而直接进入屈服状态的发生,从而增强了结构在不利条件下的安全保障;在8度罕遇地震的作用下,底层剪切耗能梁段腹板应力值接近屈服应力值,翼缘出现轻微的屈曲(见图6b)),由于底层剪切耗能梁段发生了塑性变形,使得结构水平方向的摆幅加剧,上层的剪切耗能梁段也因受地震作用的影响开始发生变形,结构柱脚部位仍承受了较大的弹性应力,但该应力并未达到使其发生明显塑性屈服的程度,证明了其良好的抗震性和稳定性;

在9度罕遇地震的作用下,底层的剪切耗能梁段翼缘屈曲程度加大,梁柱节点处出现了应力集中的现象,其翼缘出现轻微的屈曲(见图6d)),结构中间层的耗能梁段发生了明显的位移变形,腹板也表现出了一定程度的屈服,并伴随着中间层翼缘的屈曲,即剪切耗能梁段已经进入塑

表4 试验加载工况

Table 4 Test loading cases

工况序号	地震烈度	地震波	EBF-1 $A_{max}/g$	EBF-2 $A_{max}/g$	EBF-3 $A_{max}/g$
1		El-Centro波	0.128	0.108	0.086
2	8度多遇	Taft波	0.128	0.108	0.086
3		兰州波	0.128	0.108	0.086
4		El-Centro波	0.256	0.217	0.172
5	9度多遇	Taft波	0.256	0.217	0.172
6		兰州波	0.256	0.217	0.172
7		El-Centro波	0.365	0.309	0.245
8	8度设防	Taft波	0.365	0.309	0.245
9		兰州波	0.365	0.309	0.245
10		El-Centro波	0.729	0.617	0.489
11	8度罕遇	Taft波	0.729	0.617	0.489
12		兰州波	0.729	0.617	0.489
13		El-Centro波	1.129	0.955	0.757
14	9度罕遇	Taft波	1.129	0.955	0.757
15		兰州波	1.129	0.955	0.757
16		El-Centro波	1.821	1.541	1.221
17	1.0g	Taft波	1.821	1.541	1.221
18		兰州波	1.821	1.541	1.221

性变形阶段;在加速度为 $1.0g$ 的地震作用下,框架柱发生扭转变形,剪切耗能梁段全截面进入塑性变形阶段(见图6c)),其翼缘处发生更为明显的屈曲,在第二层梁柱节点

板的焊缝处,出现明显断裂现象(见图6e)),而结构的框架边柱柱脚翼缘处出现屈曲现象(见图6f)),但结构未发生倒塌,表明其抗震性能良好。

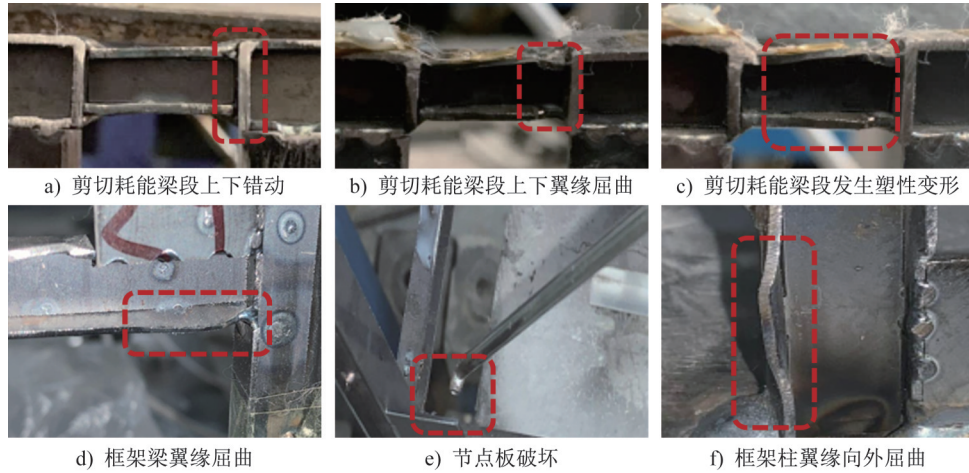


图6 试件EBF-1试验现象

Fig. 6 Test phenomena of specimen EBF-1

在地震烈度为8度多遇和9度多遇的地震作用下,试件EBF-2与EBF-3都表现出了弹性响应,无明显试验现象;在8度设防地震作用下,试件EBF-2整体出现了明显的晃动;在8度罕遇地震作用下,试件EBF-2的可替换剪切耗能梁段开始出现轻微的变形,同时其腹板开始发挥剪切耗能的作用;在9度罕遇地震作用下,可替换剪切耗能梁段进入屈服阶段;在加速度为 $1.0g$ 工况加载过程中,特别是Taft波在该地震烈度的作用下时,试件EBF-2的水平方向摆幅显著,其防屈曲支撑部位进入弹塑性阶段,底层可替换剪切耗能梁段翼缘出现轻微的屈曲,且底层层间位移角均超过了 $1/250$ ,结构层间位移主要集中在底层区域;试件EBF-3由于层数较少、 $x$ 方向与 $y$ 方向均布置了可替换剪切耗能梁段及防屈曲支撑构件,使得结构刚度较大,在整个试验过程中未表现出任何破坏特征。

研究发现,带可替换剪切耗能梁段的防屈曲偏心支撑钢框架在多遇地震的作用下,结构均处于弹性阶段;在8度设防地震作用下,底层剪切耗能梁段上下错动并耗散能量,其余构件均处于弹性阶段;在罕遇地震作用下,底层剪切耗能梁段进入塑性变形阶段,腹板部分区域发生应力屈服且翼缘发生轻微屈曲,底层框架梁柱节点处因应力集中而造成其部分翼缘轻微屈曲;在加速度为 $1.0g$ 地震作用下,底层剪切耗能梁段腹板发生全截面屈服,翼缘屈曲加剧,防屈曲支撑部位两端应力超过屈服应力,其与框架连接的节点板处发生破坏,底层框架柱脚因应力过大导致翼缘发生屈曲,该破坏形式属于强度破坏。

### 3 试验结果及其分析

#### 3.1 应力分布及塑性铰发展过程

试件EBF-1的塑性变形主要集中在可替换剪切耗能梁段上,尤其是翼缘的剪切变形表现在翼缘的应力值明显高于腹板的应力值上。在相同的加载工况下试件EBF-1的剪切耗能梁段的应力值高于其余两榀试件的剪切耗能梁段的应力值,说明可替换剪切耗能梁段的截面越小,变形越大,其耗能性能越优越。框架梁腹板最大应力值为 $224\text{ MPa}$ ,这表明框架梁仍处于弹性阶段,不仅为可替换剪切耗能梁段提供了足够的刚度,还最大化地利用了剪切耗能梁段优越的变形能力和能量耗散特性。框架柱应力主要分布在柱脚和靠近节点的位置,在加速度为 $1.0g$ 的地震作用下,底层柱脚及梁柱节点的受力均超过了屈服极限,同时翼缘发生屈曲,第二层支撑部位和节点板焊缝处发生了断裂。

根据结构构件应力分布规律,试件EBF-1结构塑性铰随加载变化地分布情况及出现次序如图7a)所示。在9度多遇工况下,底层的层间位移角达到弹性层间位移角的 $1/250$ 时,剪切耗能梁段开始发生屈服,框架梁柱和防屈曲内核支撑仍处于弹性状态;试件EBF-1在8度罕遇地震作用下,结构的整体振幅增大,底层层间位移角达到 $1/123$ ,耗能梁段翼缘开始进入到强化阶段( $247\text{ MPa}$ ),柱脚腹板翼缘依然保持在弹性状态( $187\text{ MPa}$ ),剪切耗能梁段发生轻微变形;在9度罕遇工况下,剪切耗能梁段翼缘应力值达到了 $287\text{ MPa}$ ,翼缘局部发生了应力集中从而出现屈曲现象。当底层层间位移角达到 $1/100$ 时,

剪切耗能梁段翼缘和中间腹板区域出现大面积屈服,防屈曲支撑部位将进入弹塑性阶段,与剪切耗能梁段共同稳定地耗散地震能量,但框架梁柱仍处于弹性状态阶段。当底层层间位移角达到1/66时,底层和第二层形成塑性铰,支撑内核钢芯发生屈服,依靠滞回变形的机制来实现耗能的效果,而外围约束套管为内核钢芯提供了侧向约束,随后支撑进入塑性阶段,框架梁柱节点部分区域开始发生屈服,该破坏模式实现了多道防线(可替换剪切耗能梁段-防屈曲支撑-钢框架)有序耗能的目的。

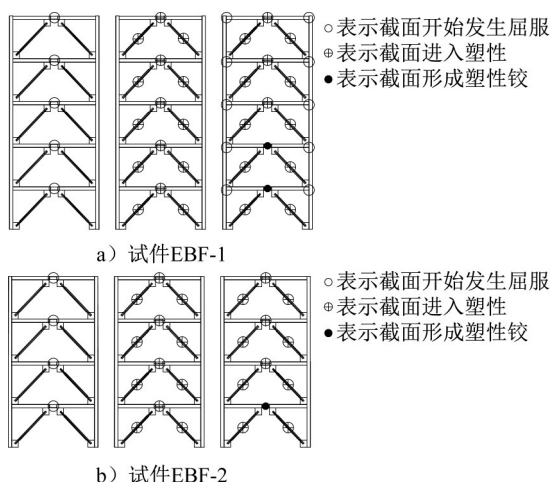


图7 塑性铰发展过程

Fig. 7 Development process of plastic hinges

试件EBF-2结构塑性铰随加载变化地分布情况及出

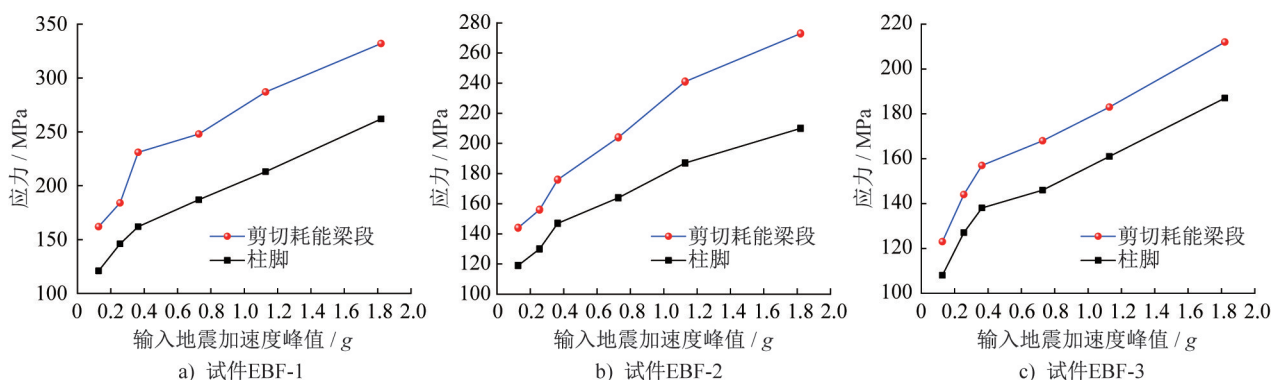


图8 El-Centro波下各试件应力分布对比

Fig. 8 Comparison of stress distribution of all specimens under El-Centro wave

### 3.2 位移响应及分析

图9显示了在不同强度的El-Centro波、Taft波和兰州波的地震作用下,模型结构的楼层位移包络曲线,其中在Taft地震波输入测试时,与其他两种波形相比结构的位移响应达到了最大值。当结构在3种不同的地震波作用下时,各个层面的最大层间位移曲线从初期的直线,到随着时间的推移曲线逐渐出现弯折,并且这种弯折的曲

现次序如图7b)所示,在8度罕遇地震作用下,结构的可替换剪切耗能梁段通过变形耗能的作用,底层最大层间位移角可达到1/267,柱脚应力远小于屈服应力,框架梁柱仍处于弹性状态;在9度罕遇地震作用下,可替换剪切耗能梁段进入屈服阶段(241 MPa),防屈曲支撑部位还处于弹性阶段;在加速度为1.0g的地震作用下,剪切耗能梁段翼缘应力值达到了273 MPa,翼缘局部发生应力集中并出现轻微屈曲现象,底层层间位移角达到1/103,防屈曲支撑进入弹塑性阶段,底层剪切耗能梁段形成塑性铰。

试件EBF-3在加速度为1.0g的工况下可替换剪切耗能梁段的应力均小于屈服应力,各构件均未进入塑性耗能阶段。

如图8所示,将3榀试件在El-Centro波及不同工况下的底层剪切耗能梁段其应力和柱脚应力对比发现:剪切耗能梁段的应力均高于剪切耗能梁段的柱脚应力,且在剪切耗能梁段进入屈服阶段时,框架柱脚仍处于弹性阶段,这表明剪切耗能梁段的非弹性变形行为有效地耗散了作用在结构中的地震能量,使得框架柱脚的应力保持在屈服点之下,即使在较大地震作用下也未达到塑性屈服阶段,实现了耗能梁段首先发生屈服耗能的预期破坏模式,即结构支撑内核钢芯产生变形前,框架梁柱仍处于弹性状态。这种弹性响应有助于保护结构的完整性,避免了过度损伤,并确保结构在地震后具有良好的恢复能力。

率有明显的增长趋势。而曲线的形态变化是由于输入地震波的强度在不断上升,导致结构内部产生的损伤在持续地累积,从而使得不同强度的地震波引起的响应持续增长。同时研究发现,结构底层位移响应的增长速率相对于其他部位增长更快,意味着该区域结构损伤和强度的退化现象更为明显。底层的框架柱在受到地震波作用时,非线性响应较为显著。

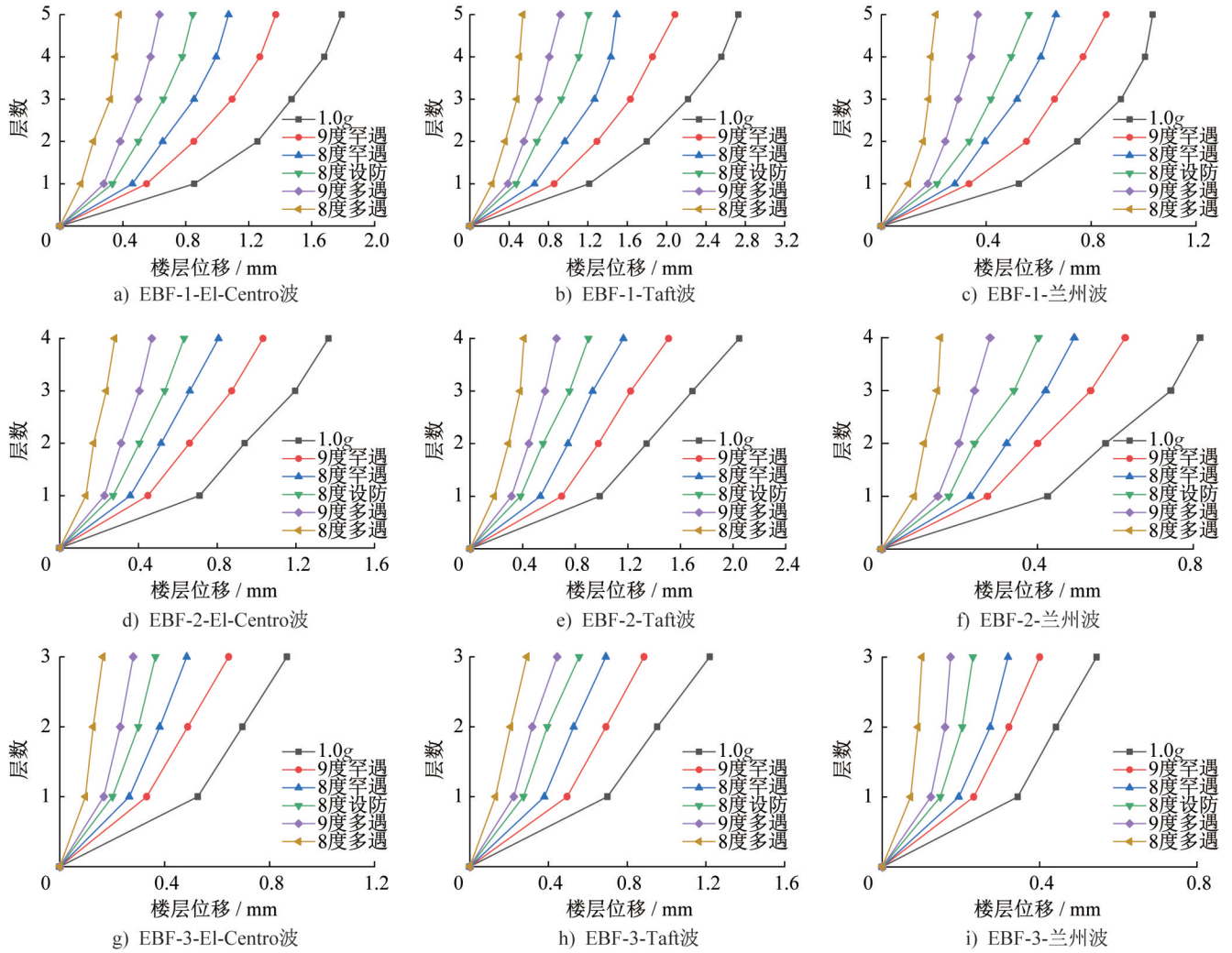


图9 楼层位移包络值

Fig. 9 Envelope value of floor displacements

表5列出了试件在三种波形作用下不同地震烈度的最大层间位移角,表中 $\alpha$ 为地震波加速度; $\theta_{max}$ 为最大层间位移角,3榀试件在多遇地震作用下的最大层间位移角均小于限值1/250,试件EBF-1在高于9度罕遇地震作用下(地震波峰值加速度为1.0g)的最大层间位移角为1/66,符合抗震规范。通过可替换剪切耗能梁段和防屈曲支撑部位先后不断耗能,当地震烈度达到9度时,仍能满足抗震规范对变形限值的相关要求,表现出良好的抗震性能。

### 3.3 加速度响应分析及剪力分布

以试件柱脚实测加速度最大值为参考值,如图10所示选取El-Centro波、Taft波及兰州波6个相同工况下的加速度峰值开展对比研究,得到了楼层峰值加速度放大系数。研究结果显示,加速度放大系数整体呈现随着结构楼层高度增加而增大的趋势。其中,最大值位于结构顶部,顶部加速度放大系数值集中在0.5~1.5之间,而最小值位

表5 结构最大层间位移角

Table 5 Maximum inter-story drft of the structure

试件	$I$	8度多遇	9度多遇	8度设防	8度罕遇	9度罕遇	1.0g
EBF-1	$\alpha/g$	0.128	0.256	0.365	0.729	1.129	1.821
	$\theta_{max}$	1/435	1/293	1/207	1/146	1/94	1/66
EBF-2	$\alpha/g$	0.108	0.217	0.309	0.617	0.955	1.541
	$\theta_{max}$	1/698	1/444	1/356	1/267	1/196	1/103
EBF-3	$\alpha/g$	0.086	0.172	0.245	0.489	0.757	1.221
	$\theta_{max}$	1/999	1/671	1/485	1/335	1/260	1/157

于结构底层,底层加速度放大系数值集中在0.5~1.0之间。此外,各层的加速度放大系数在随着地震波强度增大的情况下整体呈现出减小的趋势,说明随着地震烈度的提升,底层可替换剪切耗能梁段会形成塑性铰、防屈曲支撑内核管发生变形等现象,从而导致钢框架的阻尼比增大,结构整体刚度减小。

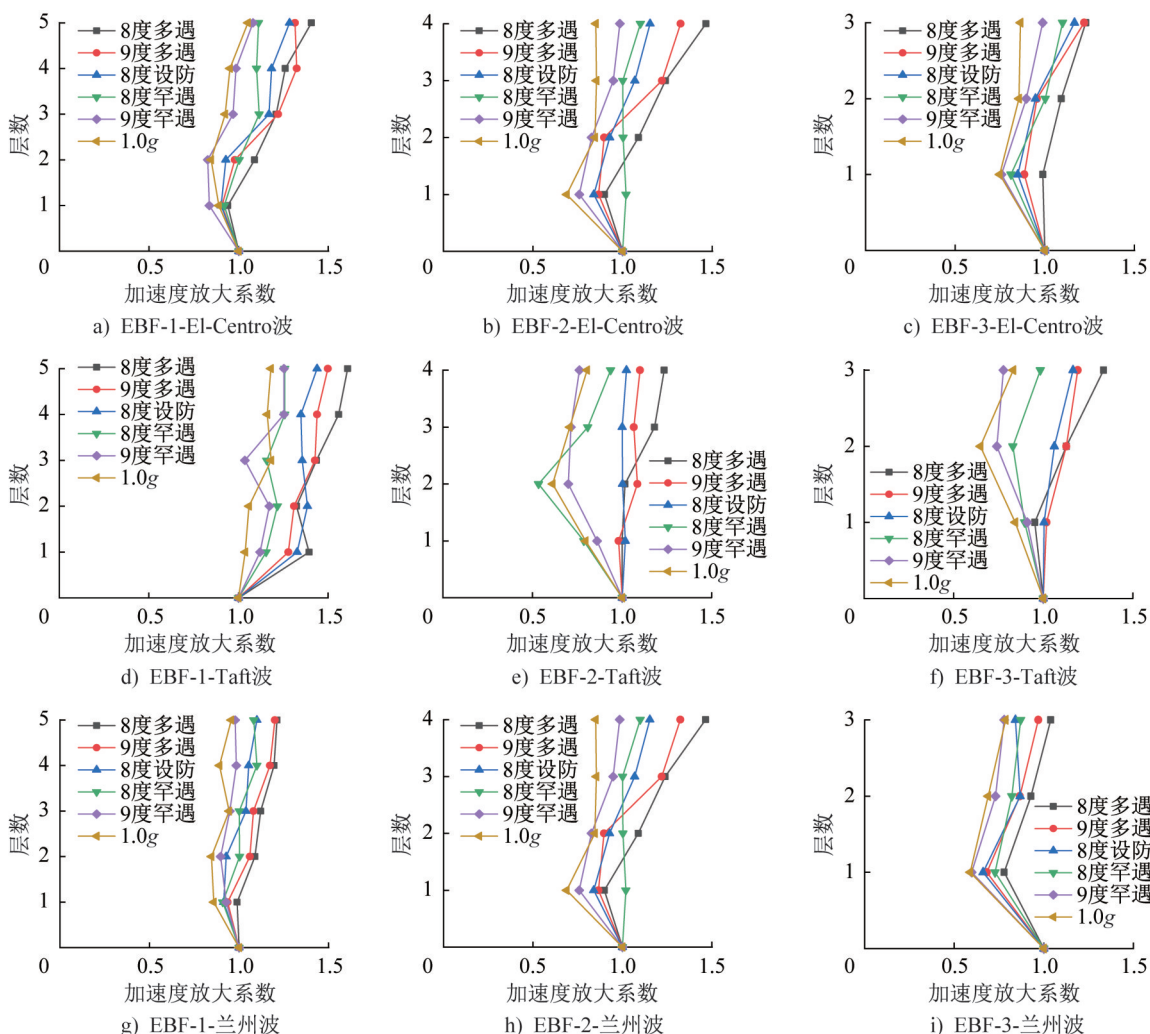


图 10 各试件加速度放大系数

Fig. 10 Acceleration amplification coefficients of all specimens

图 11 给出了试件结构在不同工况下的各层最大剪力  $V_{max}$  包络图。试件 EBF-1 因其框架梁柱、剪切耗能梁段和防屈曲支撑的截面尺寸相较于其他两个试件较小，特别是相比于试件 EBF-3，导致其底层承受的剪力值最小。试件 EBF-3 在  $x$  方向与  $y$  方向都布置了剪切耗能梁段和防屈曲支撑，该配置不仅增强了底层结构的承载能力，使其在三榀试件中底层承受剪力值达到最大，且能够

确保试件在试验过程中表现出更稳定的性能。观察整个结构的各层剪力值，可以明显发现各层的最大剪力在垂直高度方向上呈现逐层递减的趋势，结构的变形以剪切变形为主。多遇地震作用下各层剪力的最大值差异较小，且随着输入地震波的增强，结构各层的剪力分布较为接近，从而减缓了整体刚度退化的幅度。

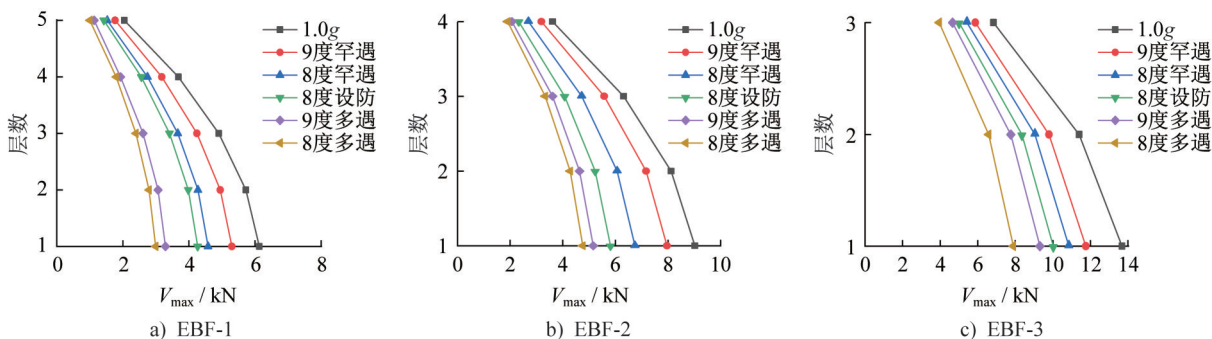


图 11 各试件结构层间剪力包络值

Fig. 11 The inter-story shear envelope value of all specimens

## 4 结论

(1) 随着地震峰值加速度的增加,可替换剪切耗能梁段翼缘先于框架梁柱发生屈服,随后底层剪切耗能梁段形成塑性铰,防屈曲支撑内核进入塑性阶段,框架梁柱节点部分区域开始进入屈服,结构无倒塌危险,从而结构形成了多道抗震防线。

(2) 带可替换剪切耗能梁段的钢框架底层层间位移较大,在多遇和罕遇地震作用下的层间位移角均满足规范要求,在加速度为 $1.0g$ 工况下,试件EBF-1最大层间位移角为 $1/66$ ,该结构的设计提高了整个框架的侧向变形性能,使得结构能在大震或罕遇地震中拥有良好的抗震性能。

(3) 3榀试件的加速度放大系数会因楼层高度的逐渐增大而有所增加。当地震烈度进一步增强时,可替换剪切耗能梁段会有更加显著的塑性变形,该变形会直接影响结构的阻尼比,进而导致结构的加速度放大系数呈下降趋势。试件结构各层层间剪力沿高度方向逐渐减小,且均随着地震波强度的增大而增大,结构在试验过程中所出现的变形以剪切变形为主。

## 参考文献:

- [1] FUJIMOTO M, AOYAGI T, UKAI K, et al. Structural characteristics of eccentric k-braced frames[J]. Transactions of the Architectural Institute of Japan, 1972, 195: 39-49, 97. DOI:10.3130/aijsaxx.195.0\_39.
- [2] 连鸣,苏明周,李慎,等.Y形偏心支撑高强钢框架结构抗震性能振动台试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(8):24-31.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2015.08.004.  
LIAN Ming, SU Mingzhou, LI Shen, et al. Shake table test of seismic performance of high strength steel frames with Y-eccentric braces[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(8): 24-31. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.08.004. (in Chinese)
- [3] 连鸣,苏明周.Y形偏心支撑高强钢框架结构抗震性能[J].土木建筑与环境工程,2016,38(4):86-95.DOI:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.04.014.  
LIAN Ming, SU Mingzhou. Finite element analysis on seismic performance of high strength steel frames with Y-type eccentric braces [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2016, 38(4): 86-95. DOI: 10.11835/j.issn.1674-4764.2016.04.014. (in Chinese)
- [4] 连鸣,苏明周,李慎.Y形高强钢组合偏心支撑框架结构基于性能的塑性设计方法研究[J].工程力学,2017,34(5):148-162.DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2017.09.032.  
LIAN Ming, SU Mingzhou, LI Shen. Performance-based plastic design method for Y-type high strength steel composite eccentrically braced frames[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(5): 148-162. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.09.032. (in Chinese)
- [5] 田小红,苏明周,连鸣,等.高强钢组合K形偏心支撑框架结构振动台试验研究[J].土木工程学报,2016,49(3):56-63. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2016.03.005.  
TIAN Xiaohong, SU Mingzhou, LIAN Ming, et al. Shake table test of high-strength steel composite K-eccentrically braced frames[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(3): 56-63. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2016.03.005. (in Chinese)
- [6] IOAN A, STRATAN A, DAN D, et al. Experimental validation of re-centring capability of eccentrically braced frames with removable links [J]. Engineering Structures, 2016, 113: 335-346. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.01.038.
- [7] 殷占忠,徐德宇,杨博.端部配置延性铸件的装配式防屈曲支撑抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2022,43(1):77-85. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2020.0261.  
YIN Zhanzhong, XU Deyu, YANG Bo. Experimental study on seismic performance of prefabricated buckling-restrained braces with end ductile casting connectors [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(1): 77-85. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2020.0261. (in Chinese)
- [8] 刘斌,赵赤云.端板连接可替换式耗能梁段偏心支撑钢框架在循环荷载作用下的有限元分析[J].建筑结构,2013,43(增刊1):1433-1436. DOI: 10.19701/j.jzjg.2013.s1.330.  
LIU Xiao, ZHAO Chiyun. Numerical analysis on end-plate connected replaceable shear links for eccentrically braced steel frames under cyclic loading [J]. Building Structure, 2013, 43 (Suppl. 1): 1433-1436. DOI: 10.19701/j.jzjg.2013.s1.330. (in Chinese)
- [9] BALUT N, GIONCU V. Suggestion for an improved 'dog-bone' solution[C]// Stessa 2003.2003:129-134.
- [10] 吕西林,陈云,蒋欢军.可更换连梁保险丝抗震性能试验研究[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(9):1318-1325,1332. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2013.09.007.  
LYU Xilin, CHEN Yun, JIANG Huanjun. Experimental study on seismic behavior of "Fuse" of replaceable coupling beam [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(9): 1318-1325, 1332. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2013.09.007. (in Chinese)
- [11] YIN Z Z, FENG D Z, HE Y L. Restoring force model of end-plate bolted shear links in eccentrically braced frames [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 199: 107623. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107623.
- [12] MANSOUR N, CHRISTOPOULOS C, TREMBLAY R. Experimental validation of replaceable shear links for eccentrically braced steel frames [J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(10): 1141-1152. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000350.
- [13] 李通,王新武,时强,等.震后替换耗能梁段对偏心支撑钢框

- 架的抗震性能影响[J]. 建筑结构, 2022, 52(5): 63-69. DOI: 10.19701/j.jzjg.20200869.
- LI Tong, WANG Xinwu, SHI Qiang, et al. Influence of post-earthquake replacement beam link with energy-dissipation on seismic performance of eccentrically braced steel frame [J]. Building Structure, 2022, 52 (5) : 63-69. DOI: 10.19701/j.jzjg.20200869. (in Chinese)
- [14] 殷占忠, 任亚歌, 陈伟, 等. 可替换独立耗能梁段抗震性能分析[J]. 工程力学, 2016, 33(增刊1): 207-213. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.05.S041.
- YIN Zhanzhong, REN Yage, CHEN Wei, et al. The seismic performance analysis of replaceable independent links [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33 (Suppl. 1) : 207-213. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.05.S041. (in Chinese)
- [15] 殷占忠, 孙宝悦, 安树桢, 等. 单向荷载下带延性连接件防屈曲支撑的钢框架力学性能分析[J]. 建筑科学, 2021, 37(11): 22-30. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2021.11.004.
- YIN Zhanzhong, SUN Baoyue, AN Shuzhen, et al. Mechanical property analysis of buckling-restrained braced steel frames with ductile connector under unidirectional load [J]. Building Science, 2021, 37(11) : 22-30. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2021.11.004. (in Chinese)
- [16] 刘晓刚, 樊健生, 聂建国, 等. 剪切型耗能连梁的塑性强化特性研究 [J]. 土木工程学报, 2017, 50 (3) : 1-11. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2017.03.001.
- LIU Xiaogang, FAN Jiansheng, NIE Jianguo, et al. Research on plastic overstrength of energy-dissipation shear links [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50 (3) : 1-11. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2017.03.001. (in Chinese)
- [17] 王宇航, 刘元九, 周绪红. 腹板屈曲约束钢连梁抗震性能研究 [J]. 工程力学, 2019, 36 (6) : 49-59, 69. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2018.08.0461.
- WANG Yuhang, LIU Yuanjiu, ZHOU Xuhong. Study on seismic property of steel coupling beam with restrained web [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(6) : 49-59, 69. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2018.08.0461. (in Chinese)
- [18] 金龙, 李启才, 张永咸. 设置悬臂梁段拼接耗能的钢框架抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2022, 43(2) : 43-51. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.0760.
- JIN Long, LI Qicai, ZHANG Yongxian. Experimental study on seismic behavior of steel frame structures using cantilever beam splicing as energy dissipater [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43 (2) : 43-51. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.0760. (in Chinese)