

# RC 框架-摇摆墙式减震结构振动台试验研究

聂伟<sup>1,2</sup>,熊咸玉<sup>1</sup>,魏晓刚<sup>3</sup>,白春<sup>4,5</sup>,刘先省<sup>2</sup>

(1. 河南财经政法大学 管理科学与工程学院,河南 郑州 450046; 2. 河南大学 计算机与信息工程学院,河南 郑州 450046;  
3. 郑州航空工业管理学院 土木与环境学院,河南 郑州 450046; 4. 江河创建集团股份有限公司,北京 101300;  
5. 辽宁工程技术大学 土木工程学院,辽宁 阜新 123000)

**摘要:**针对摇摆墙的特殊性能要求使其在工程运用中陷入施工工艺、摇摆幅度和成本控制等方面的困局,综合经济效益、施工方便、震后易更换等理念,发明了一种连接框架与摇摆墙的耗能连接装置以及摇摆墙摇摆可控的铰支座;基于此,利用摇摆墙结构的构造优势以及被动控制技术的减震原理,提出了一种新型的钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)框架-摇摆墙式减震结构。为研究该结构的抗震性能,设计了缩尺比例为1/10的6层框架结构和框架-摇摆墙式减震结构,通过振动台试验研究这2种结构模型在不同地震作用下的动力特性、加速度反应、位移反应,描述了模型结构的破坏模式以及抗震性能。结果表明,摇摆墙式减震系统能够有效消耗地震输入能量,衰减结构的动力响应,使结构最大加速度峰值和最大位移峰值降低率分别达到36%和20.15%,而且能够利用被动减震的原理有效抑制主结构的振动,改善框架结构的侧向变形模式,延缓结构的损伤进程,提高结构的整体抗震能力。

**关键词:**框架-摇摆墙式减震结构;被动控制;振动台试验;累积损伤;抗震性能

**中图分类号:**TU352.1; TU375.4

**文献标志码:**A

## Study on shaking table test of RC frame-rocking wall damping structure

NIE Wei<sup>1,2</sup>, XIONG Xianyu<sup>1</sup>, WEI Xiaogang<sup>3</sup>, BAI Chun<sup>4,5</sup>, LIU Xiansheng<sup>2</sup>

(1. School of Management Science and Engineering, Henan University of Economics and Law, Zhengzhou 450046, China; 2. School of Computer and Information Engineering, Henan University, Zhengzhou 450046, China; 3. School of Civil and Environmental Engineering, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China; 4. Jianghe Group Company Limited, Beijing 101300, China; 5. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** In view of the special performance requirements of the rocking wall, the rocking wall structure is often trapped in the dilemma of construction technology, rocking range and cost control in engineering application. Based on the concepts of economic benefits, convenient construction, and easy replacement after earthquake, an energy-consuming connection device between the frame and the rocking wall was developed. Additionally, a hinge support with controllable swing of the rocking wall was also designed for the test models. Thus, a new type of reinforced concrete (RC) frame-rocking wall damping structure is proposed by leveraging the structural advantages of the rocking wall structures and the principle of passive control technology. Then, 1/10 scale shaking table tests of six-story RC frame structure and RC frame-rocking damping wall were conducted to verify the effectiveness of the structure. The dynamic characteristics, acceleration response, and displacement response of the test models under different earthquakes were studied by shaking table tests. The failure mode and seismic performance of the test models were also described. The results show that the rocking wall damping system can effectively consume seismic input energy and attenuate structural dynamic response, reducing the maximum peak acceleration and the maximum peak displacement of the structure by 36% and 20.15%, respectively. Moreover, the rocking wall damping

收稿日期:2023-04-01; 修回日期:2024-05-21

基金项目:河南省科技攻关项目(242102321010,242102220091);河南省高校青年骨干教师培养计划(2021GGJS116);河南省高等学校重点科研项目(25A560010,23A440002)

作者简介:聂伟(1992—),女,讲师,博士,主要从事工程结构防灾减灾研究。E-mail:nwstudy@163.com

通信作者:熊咸玉(1992—),女,讲师,博士,主要从事岩土工程研究。E-mail:xiongxianyu520@163.com

structure can also effectively suppress the vibration of the main structure by using the principle of passive damping, improving the lateral deformation mode of the frame structure. Additionally the damage process of the structure is delayed, enhanced the overall seismic capacity of the structure.

**Key words:** frame-rocking wall damping structure; passive control; shaking table test; cumulative damage; seismic performance

## 0 引言

钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)框架结构是多层公共建筑(如学校、行政办公室和博物馆等)中使用最广泛的一种结构体系<sup>[1]</sup>,且抗震要求相对较高,但大量震害结果表明,房屋建筑的破坏与倒塌是造成地震中巨大人员伤亡和财产损失的主要原因<sup>[2]</sup>,且 RC 框架结构在强震下的抗震性能无法可靠地预测和控制<sup>[3]</sup>,常表现出典型的薄弱层倒塌破坏,造成的经济损失和社会影响巨大,其中很大一部分的经济损失是由于震后建筑物受损严重,难以修复,或者修复时间过长,建筑功能中断,影响正常的生产和生活<sup>[4]</sup>。虽然非结构构件的破坏对建筑主体结构安全影响较小,但威胁着人们的生命和财产安全,影响正常的生产和生活<sup>[5]</sup>。因此,随着全国城镇化率的不断增加,如何降低建筑结构的损伤,实现“中小地震无影响,强大地震无伤亡,特大地震不混乱,震后恢复速度快,社会发展可持续”的城市抗震韧性目标,是国际防灾减灾领域最新的前沿课题<sup>[6]</sup>。而在延性框架中安装摇摆墙,并以此为载体设置消能器,形成基于摇摆机制的消能减震框架,是实现结构功能可恢复性的一种解决方法,也是韧性城市建设与发展的重大需求。

摇摆墙结构是结构抗震设计概念的一种新技术,属于自复位结构的一种新型结构形式<sup>[7]</sup>,在“可恢复功能城市”建设领域中有着较好的应用前景。目前,国内外学者对框架-摇摆墙结构体系在设计方法<sup>[8]</sup>、整体结构抗震性能与破坏模式<sup>[9]</sup>、摇摆墙与框架连接方式<sup>[10]</sup>等方面进行了大量研究,并对摇摆墙结构优良的减震效果进行了证明<sup>[1,8,11]</sup>。其中摇摆墙与框架相连的节点构造以及摇摆墙与基础的连接是实现该结构体系的关键技术。为了解决摇摆墙结构中的关键技术问题,QU 等<sup>[11]</sup>、曹海韵等<sup>[12]</sup>、张富文等<sup>[13]</sup>以及董金芝等<sup>[14]</sup>从不同角度出發,设计了不同的连接构件并通过试验研究证明了连接构件的有效性。虽然摇摆墙能显著提高框架结构的抗震性能,但目前仅有个别工程实例<sup>[7,11,15]</sup>,尚未形成成熟的设计和建造方法。而且,工程实例中所用的连接形式,大多数价格昂贵且工作效率较低<sup>[11,15]</sup>,这是因为摇摆墙与主结构之间常采用大量的位移型阻尼器来增加耗能,由于摇摆墙与框架主结构之间的相对位移较小,导致阻尼器屈服耗能较小,利用率偏低,且造价较高,阻尼器的特性在一定程度上限制了其在实际工程中的应用。此外,面对我国框架结构存在量大面广的特点,框架与摇摆墙之间连接结构设计的复杂性以及繁琐性,使摇摆墙结构在实际工程中普适性较低。

综合经济效益、施工方便和震后易修复等因素,本文在前期研究的连接构件<sup>[16]</sup>基础上设计了一种新型连接框架与摇摆墙的耗能连接结构,并根据摇摆墙的摇摆振动特性研制了一种摇摆墙摇摆可控的铰支座,结合被动控制技术的减震原理以及摇摆墙结构的构造优势,提出了一种 RC 框架-摇摆墙式减震结构。为了验证该新型结构的有效性,根据相似原理设计并制作了 1:10 的缩尺试验模型,采用地震模拟振动台试验研究了框架结构以及框架-摇摆墙式减震结构分别在不同强度的 El Centro 波、Taft 波、人工波激励下的抗震性能,证明了该结构的减震有效性,为框架-摇摆墙结构的应用推广提供了基础性的分析方法。

## 1 振动台模型试验设计

### 1.1 工程概况

为了研究摇摆墙式减震装置的振动控制效果,采用 PKPM 软件分别设计了普通 RC 框架结构(F 模型)以及 RC 框架-摇摆墙式减震结构(FR 模型)。结构模型共 6 层,层高为 3 m,各层平面布置相同,X 与 Y 方向各取 2 跨,轴间距均为 4 m。建筑场地类别为 II 类,设计地震分组为第 1 组,结构抗震设防烈度为 7 度(0.1 g)和 8 度(0.2 g)。混凝土采用 C30,钢筋选择 HRB335,箍筋选择 HPB300。柱截面尺寸为 600 mm×600 mm,梁截面尺寸为 300 mm×600 mm,楼面板与屋面板厚度均为 120 mm。由于试验条件限制,张敏政<sup>[17]</sup>

根据 Buckingham  $\pi$  定理,通过定义等效密度建立的设置任意附加质量的“一致相似律”确定模型试验设计的相似关系,试验模型的缩尺比例为 1:10,其他物理参数的相似关系如表 1 所示。为了施工方便,参考贾剑辉等<sup>[18]</sup>提出的摇摆墙与框架结构的刚度比计算方法,初步确定缩尺模型中摇摆墙的尺寸为 30 mm×180 mm×1 800 mm,验算可得结构已经基本具有稳定的整体破坏机制,满足设计要求。试验模型采用微粒混凝土和镀锌铁丝制成,模型结构的平面尺寸如图 1(a)所示,楼层连接构件的设计(L 示意图)在后文进行详细介绍,按照普通混凝土力学性能试验方法对微粒混凝土试块进行力学性能测试,测得平均抗压强度为 24.65 MPa,弹性模量为  $2.13 \times 10^4$  MPa,最终的试验模型如图 1(b)所示。

表 1 试验模型的主要相似关系

Table 1 Main similarity relationship of test models

物理量	相似关系	相似比	物理量	相似关系	相似比
应力	$S_\sigma$	0.67	频率	$S_\omega = \sqrt{S_E / \sqrt{S_\rho}} / S_l$	4.47
弹性模量	$S_E$	0.67	时间	$S_t = S_l \cdot \sqrt{S_\rho / S_E}$	0.22
等效密度	$\bar{S}_{mp} = \frac{m_m + m_a + m_{0m}}{(m_p + m_{0p}) \cdot S_l^3}$	3.33	重力加速度	$S_g$	1.00
长度	$S_l$	0.10	加速度	$S_a = S_E / (S_l \cdot \bar{S}_\rho)$	2.00

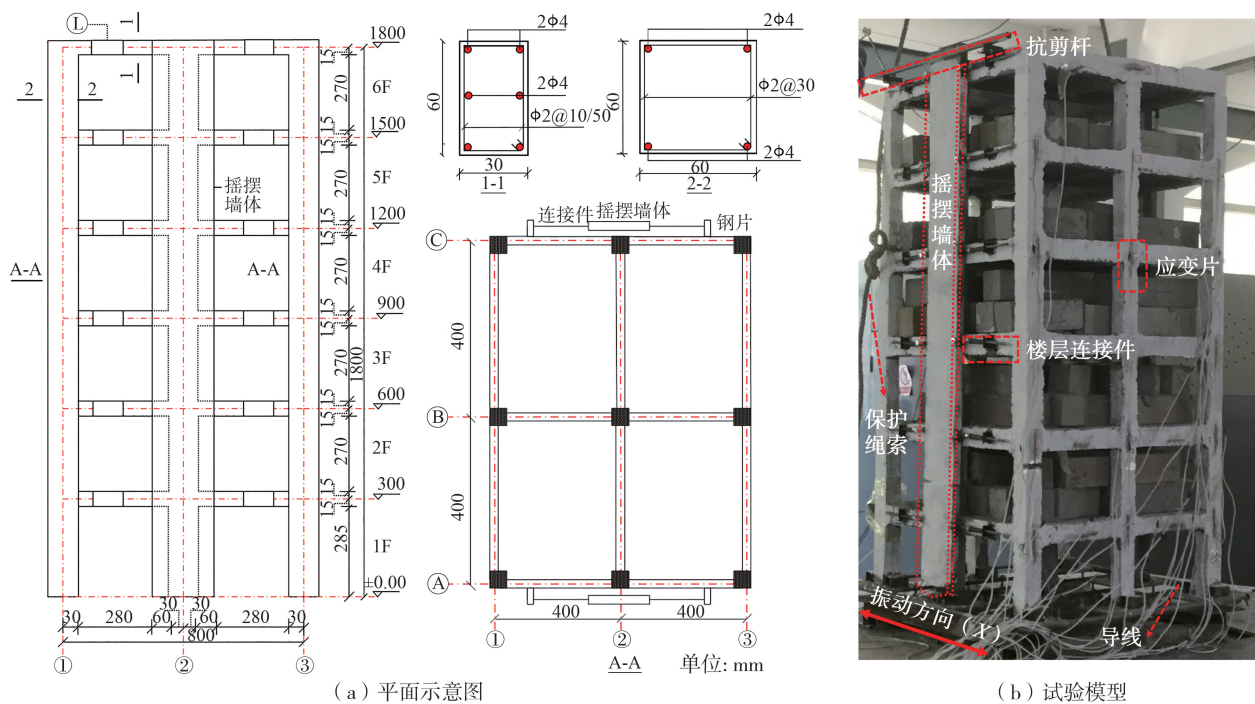


图 1 模型结构的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the model structure

1.2 模型设计中的关键技术

1) 模型底座以及不同材料构件连接的设计

首先,在进行振动台试验时,为 6 层缩尺模型专门设计了一种连接试验模型和振动台台面的底座<sup>[19]</sup>,如图 2 所示。该发明装置不仅可以实现模型结构与刚性振动台台面的连接,还可以用来分析地表建筑物在不同地基沉降下的抗震稳健性,本文不考虑地基的沉降。其次,为了实现刚性底座与混凝土模型连接,发明了不同材料属性构件的连接方法与装置,具体可以参考专利<sup>[20]</sup>中的介绍。

2) 楼层连接装置的设计

为了实现摇摆墙式减震装置与主结构之间的连接,发明了



图 2 模型底座实物图

Fig. 2 Physical diagram of the model base

一种经济实用,构造简单,震后易更换且适合工程运用的连接构件<sup>[16]</sup>。为了摇摆墙结构更好地摆动和更换,本文在此连接构件的基础上进行了改进,设计了如图3(a)所示的连接框架与摇摆墙的连接装置,该装置由1根带有螺纹的延性螺杆、与之配套的2个螺母、弹簧以及延性垫片组成。为了方便连接结构出现损伤后的更换以及维修,将螺杆上的螺母布置在摇摆墙体厚度方向上的2个螺母中间,通过六角螺栓进行销轴连接,其中在摇摆墙体厚度方向分别焊接2个螺母,如图3(b)所示,并且通过调整螺栓与螺母之间的咬合程度即图3(c)中的插销装置可以实现震后连接构件的快速更换。

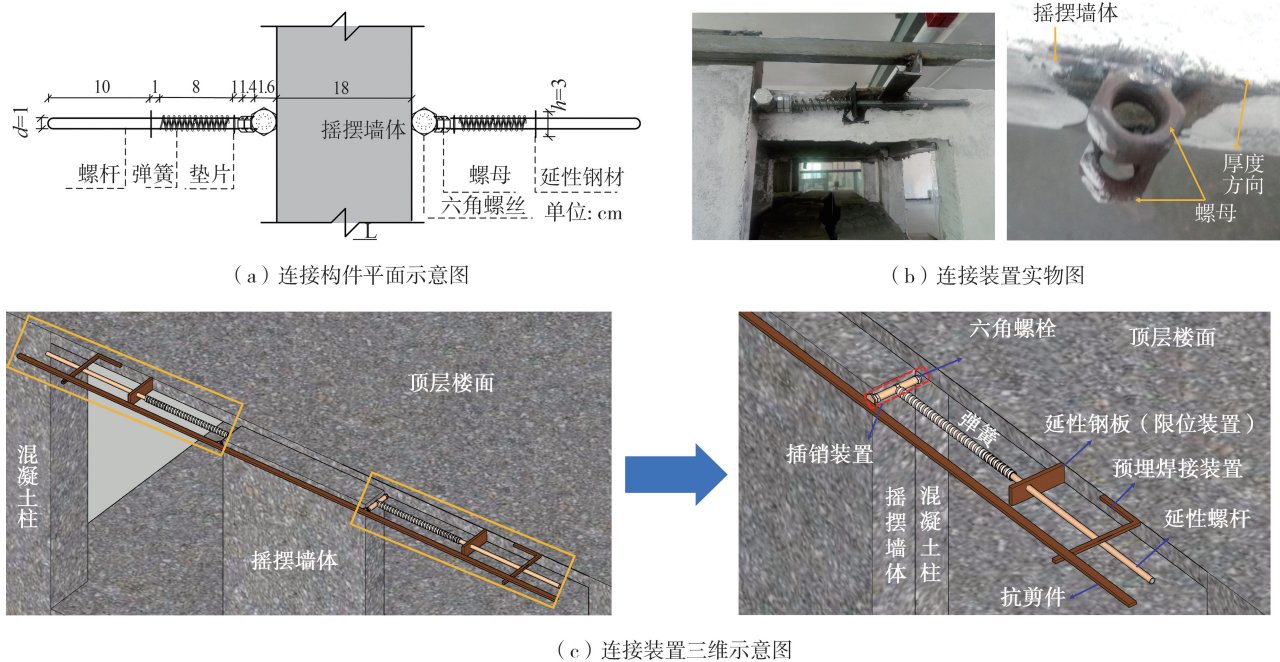


图3 摇摆墙体与框架连接件设计示意图

Fig.3 Schematic diagram of the connection between the rocking wall and the frame

### 3) 摇摆墙摇摆可控的铰接底座设计

为了实现摇摆墙体的有效摆动并提供竖向支撑,避免摇摆墙在地震作用下与基础发生碰撞损伤,设计了如图4(a)所示的铰接底座。为了使摇摆墙体的转动中心控制在一点,在方钢上焊接一个10 mm高的螺母,作为铰接支座的内槽,如图4(b)所示。为了方便摇摆墙与框架主结构的连接,用高1800 mm和180 mm的等边角钢( $\angle 30 \times 30 \times 3$ )作为摇摆墙体的外模,并且将其中一个180 mm的等边角钢打磨成弧形的墙底,如图4(c)所示。为了实现摇摆墙墙体铰接效果,则在弧形墙体下焊接一根长20 mm、直径10 mm的钢棒,并将其打磨成圆弧面,直接嵌入铰支座底座的内槽内,如图4(a)所示,可以实现弱约束条件下摇摆墙的摇摆。

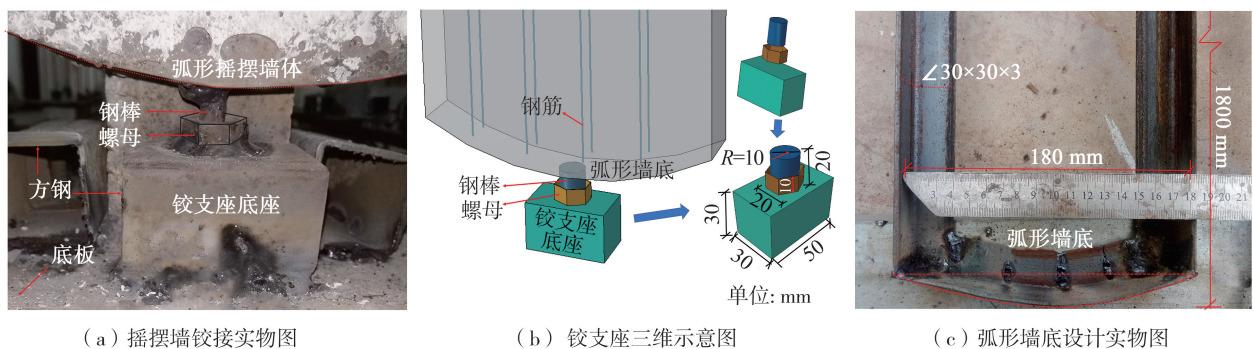


图4 摇摆墙体铰支座连接设计

Fig.4 Connection design of the hinge support of the rocking wall

### 4) 摇摆墙体浇筑成形

框架-摇摆墙结构中的摇摆墙是控制结构变形模式的整体型关键构件,宜在地震作用下保持弹性,通常

被设计为无损结构。在实际工程中常采用高配筋或者预应力的方法使摇摆墙墙体的纵筋在大震下不发生屈服<sup>[12]</sup>,因此摇摆墙体的纵筋为 4 $\phi$ 6@45 钢筋。由于纵筋较长,为了避免墙体面外出现漏筋以及混凝土振捣出现钢筋错位,沿着摇摆墙高度方向布置了 6 $\phi$ 6@260 的横筋,并将摇摆墙体外的纵筋和横筋的端部焊接在摇摆墙体的外模上,方便钢筋的绑扎,如图 5(a)所示。按照混凝土的施工工艺,浇筑微粒混凝土,并在标准条件下进行养护,最终形成如图 5(b)所示的摇摆墙体。随后摇摆墙体按照图 4 所示的方式实现与基础底座的连接,进行相应的试验研究。

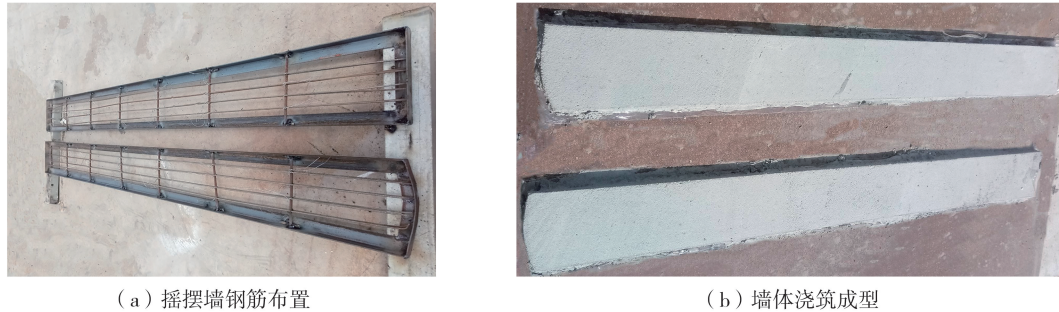


图 5 摇摆墙墙体实物图

Fig.5 Physical digaram of the rocking wall

### 1.3 加载方案

根据结构周期和试验目的,选择 El Centro 波 NS, Taft 地震波 NS, 以及人工波作为振动台台面单向 (X 向) 激励,按照相似关系,地震波的持时为 15 s,地震波的时间间隔取 0.02 s,根据表 1 中加速度相似关系调整 3 种地震波的峰值加速度,调整后的加速度时程曲线和频谱曲线如图 6 和图 7 所示。由图 7 可知,所选的 3 条地震波在基本周期内与设计反应谱拟合较好,频谱范围广泛,在 0~2 s 内 3 条地震波的平均振幅与设计谱的偏差小于 10%,满足本文的设计需求。根据文献[21]中的计算可知,在相同的激励时间内,人工波输入的能量最大,为了减少模型结构的累积损伤,地震波输入顺序为 El Centro 波、Taft 波与人工波。框架模型中共布置 6 个加速度传感器,分布在每层的 Y 方向 (非振动方向),图 8 描述了加速度传感器在模型中的位置。为了检测模型结构在不同地震波激励后的损伤情况,对模型结构输入峰值为 0.5~0.8 m/s<sup>2</sup> 的白噪声,测量模型在不同工况下的动力特性,试验工况如表 2 所示。

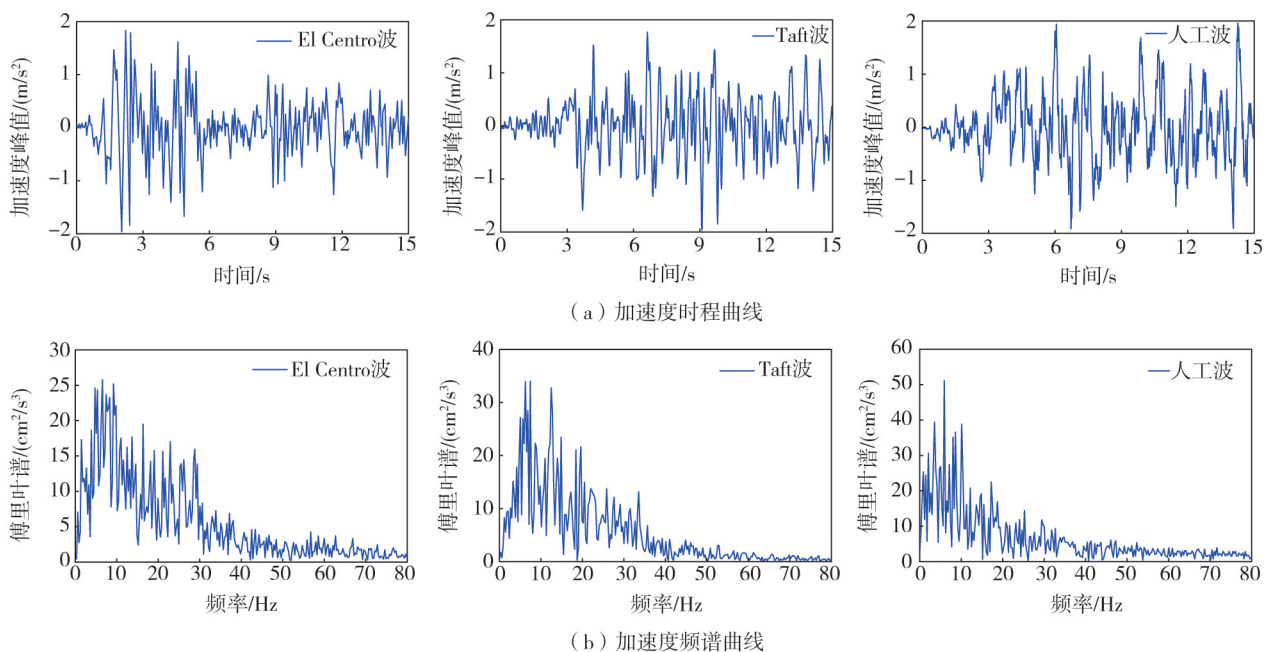


图 6 3 种地震波时程曲线及其傅里叶变换

Fig.6 Time history curves of three seismic waves and their Fourier transforms

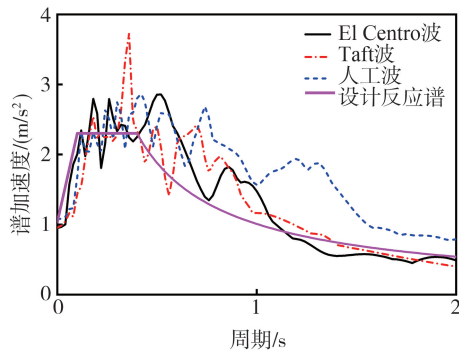


图7 地震波的加速度反应谱

Fig. 7 Acceleration response spectrum of the seismic waves

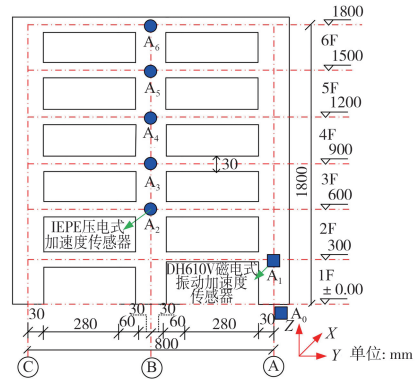


图8 加速度传感器布置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the layout of acceleration sensors

表2 模型结构的试验工况

Table 2 Test conditions of model structures

模型	烈度	峰值/g	地震激励	工况编号	模型	烈度	峰值/g	地震激励	工况编号
F 模型	7度 设防	0.05	第1次白噪声	WN-1-X	FR 模型	7度 设防	0.05	第4次白噪声	WN-4-X
		0.20	El Centro	EW-x0.2-F			0.20	El Centro	EW-x0.2-FR
		0.20	Taft	TW-x0.2-F			0.20	Taft	TW-x0.2-FR
		0.20	人工波	AW-x0.2-F			0.20	人工波	AW-x0.2-FR
	8度 设防	0.05	第2次白噪声	WN-2-X		8度 设防	0.05	第5次白噪声	WN-5-X
		0.40	El Centro	EW-x0.4-F			0.40	El Centro	EW-x0.4-FR
		0.40	Taft	TW-x0.4-F			0.40	Taft	TW-x0.4-FR
		0.40	人工波	AW-x0.4-F			0.04	人工波	AW-x0.4-FR
		0.05	第3次白噪声	WN-3-X			0.05	第6次白噪声	WN-6-X

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验现象

2组试验模型在经历不同设防烈度的地震后,最终的损伤现象为F模型相比于FR模型的整体损伤程度较大,出现的水平、竖向和斜向裂缝的数量要多于FR模型,且裂缝主要出现在3层以下。并且随着地震强度的增加,F模型上原有裂缝出现加宽和延伸的现象,并产生新的裂缝,尤其是1层柱顶处的集中受弯裂缝的塑性损伤,首层柱端以及2层梁柱节点处出现粉刷层和混凝土脱落现象,如图9(a)所示,其中2层梁柱节点区的塑性发展比较明显,柱端的裂缝不断变宽并向梁端延伸。另外,随着地震强度的增加,F模型内部的耗能机制无法承受更强的地震激励,使模型结构的塑性损伤增加,原有裂缝不断变宽和发展,新裂缝不断产生,如图9(b)所示,梁端裂缝从梁底部到梁外侧裂开,并向柱端延伸,而且梁的底端出现混凝土脱落现象,如图9(c)所示。

相应地,在相同地震波激励下,FR模型在第1层角柱处的框架柱首先出现裂缝,随着地震强度的增加,一层柱顶裂缝宽度增加并且不断延伸发展,混凝土保护层局部脱落,如图10(a)所示。另外通过图10(b)可以看出,FR模型顶层梁端截面的竖向裂缝痕迹不断向梁顶延伸,且在梁端附近还有斜裂缝的产生,说明摇摆墙式减震装置的存在可以将输入结构模型中的地震能量传递至子结构中,减轻了底层构件承载的压力,随后子结构将其存储的能量以阻尼耗能和摩擦耗能的形式释放,使结构的局部损伤有所缓解,减少了结构的损伤程度。然而,楼层连接装置在振动过程中不断地与主体结构的限位装置摩擦碰撞,导致构件的磨损比较明显,因此加有摇摆墙一跨的梁柱在地震作用下的裂缝较未加摇摆墙方向的严重,主要表现为梁柱节点处的剪切破坏,如图10(c)所示,而未安装摇摆墙方向的构件破坏主要发生在梁端,并且随着地震的往复作用,梁端裂缝不断地向柱端发展,最后与柱端交汇一起,形成塑性区域如图10(b)所示。

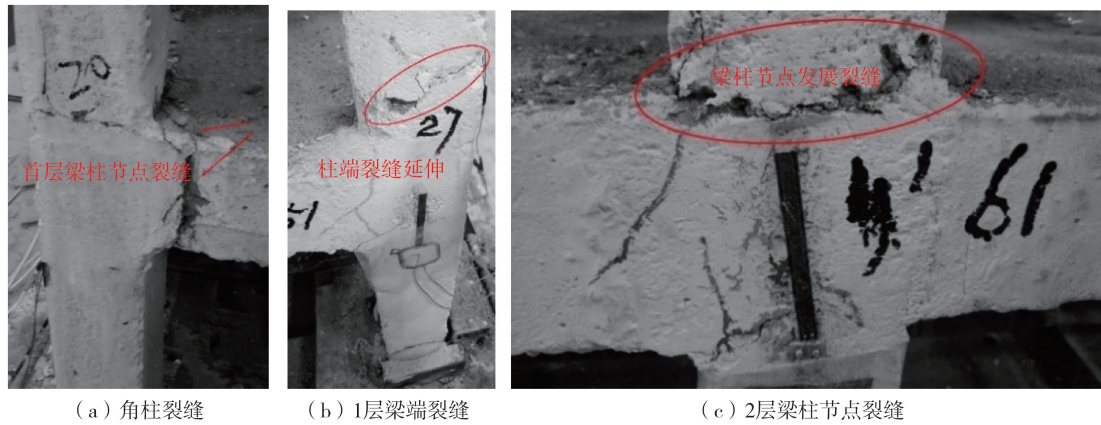


图 9 F 模型裂缝开展情况

Fig.9 Cracking development situation of the F model

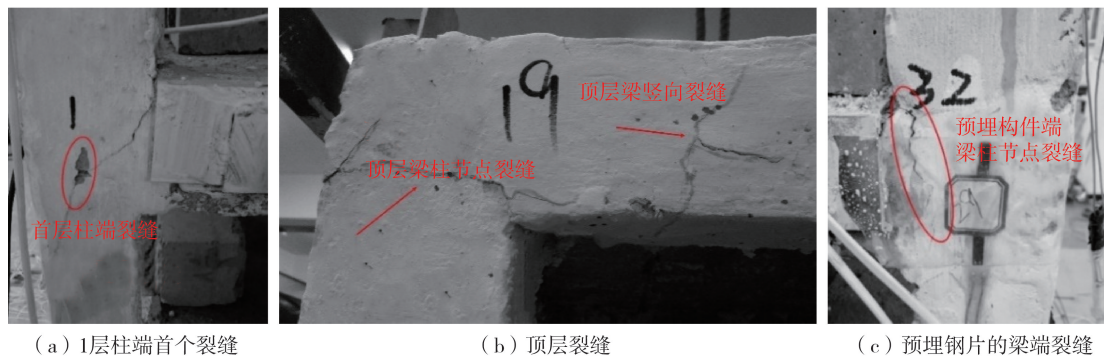


图 10 FR 模型裂缝开展情况

Fig.10 Cracking development situation of the FR model

### 2.2 结构动力特性分析

由于某种原因导致第 6 层的加速度计测得的数据失真,但不影响整体结构响应分析。结构刚度大致和自振频率的平方成正比,因此自振频率的变化在一定程度上可以反映结构的破坏情况和承载能力的变化,对结构的自振频率的分析情况如图 11 所示。由图可知,F 模型与 FR 模型经历 3 次白噪声扫频后的频率分别为 6.108、5.411、4.122 Hz 以及 6.216、5.692、4.753 Hz,试验模型的自振频率随着输入地震波强度的增加而不断降低,其中 F 模型在第 2 次与第 3 次扫频后的频率降低率分别为 11.42%与 32.52%,FR 模型的频率降低率分别为 8.44%与 23.53%,说明在经历不同的地震动激励后,2 组模型结构都出现了不同程度的损伤,但是 F 模型的自振频率下降较为明显,累积损伤较大,FR 模型中摇摆墙式减震系统可以有效减少结构的损伤,提高结构整体承载能力。

### 2.3 楼层峰值加速度减幅分析

为了更好地反映 FR 模型对框架主结构动力响应的衰减效果,定义了楼层峰值加速度减幅 ( $R_{FR}$ ) (F 模型与 FR 模型的楼层峰值加速度差值与 F 模型的楼层峰值加速度比值) 来量化加速度的衰减程度,得到不同工况下模型结构各楼层的  $R_{FR}$  值如表 3 所示。由表可知,在 X 向输入不同峰值的地震波时,FR 模型各楼层的  $R_{FR}$  均为正值,说明框架-摇摆墙式减震结构对主结构的振动响应控制具有积极作用,可以有效衰减结构各层的加速度峰值。并且 FR 模型相比于 F 模型在不同工况下均具有较好的减震效果,尤其是在地面峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)分别为 0.2 g 和 0.4 g 的 El Centro 波激励下,除了底层  $R_{FR}$  值较小外,其它层的  $R_{FR}$  值可以分别达到 10%~25%和 30%~36%,证明了 FR 模型整体减震的有效性。这是由

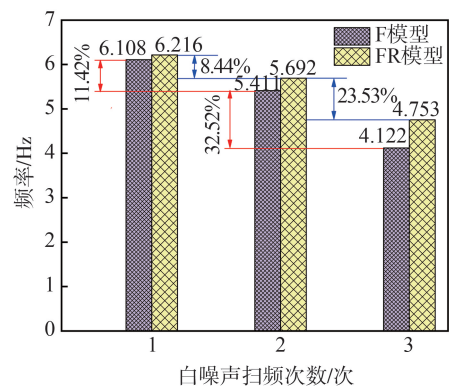


图 11 模型结构的频率变化

Fig.11 Frequency change of the model structure

于摇摆墙式减震装置沿着结构高度布置,有助于摇摆墙式减震装置与主结构之间在每层进行能量交换,进而可以有效耗散地震能量,降低主结构的动力响应。此外,对于相同峰值加速度的不同地震波而表现出  $R_{FR}$  值不同的现象,是由于地震波不同的频谱特性所致。

表3 不同峰值加速度下的楼层峰值加速度减幅( $R_{FR}$ )

Table 3 Floor peak acceleration reduction ( $R_{FR}$ ) under different peak accelerations

地震波	参数	PGA=0.2 g					PGA=0.4 g				
		5层	4层	3层	2层	1层	5层	4层	3层	2层	1层
El Centro 波	$a_F$	5.31	5.23	4.80	4.68	2.16	8.34	8.00	6.17	5.79	4.08
	$a_{FR}$	4.68	4.37	3.83	3.51	2.02	5.34	4.85	4.15	3.94	3.89
	$R_{FR}/\%$	11.86	16.44	20.21	25.00	6.48	35.97	39.38	32.74	31.95	4.66
Taft 波	$a_F$	5.86	5.13	4.90	5.42	2.44	8.15	7.24	5.69	5.65	3.99
	$a_{FR}$	5.03	4.64	4.14	3.73	2.24	6.55	5.99	5.03	4.18	3.91
	$R_{FR}/\%$	14.16	9.55	15.51	31.18	8.20	19.63	17.27	11.60	26.02	2.01
人工波	$a_F$	5.68	4.95	4.28	3.96	2.34	8.95	7.96	6.26	5.60	4.13
	$a_{FR}$	4.80	4.53	3.59	3.51	2.27	5.61	5.76	4.11	4.43	3.95
	$R_{FR}/\%$	15.49	8.48	16.12	11.36	2.99	37.32	27.64	34.35	20.89	4.36

## 2.4 加速度放大系数

将各楼层测点采集到的加速度峰值与台面测得的加速度峰值之比定义为该楼层的加速度放大系数( $\beta_{floor}$ ), F 模型与 FR 模型在不同工况下的加速度放大系数包络图如图 12 所示。

由图 12 可知,模型结构的  $\beta_{floor}$  值与地震波的频谱特性、加速度峰值以及楼层高度有关,且 F 模型的  $\beta_{floor}$  最大值在不同强度的 3 种地震波激励下均大于 FR 模型,说明摇摆墙式减震装置可以有效减少结构的损伤程度。此外,在相同的地震强度下,人工波与 El Centro 波激励下的  $\beta_{floor}$  值相比于 Taft 波更加显著,这是因为 3 种地震波的频谱特性不同,而且相比于另外 2 种地震激励,人工波输入模型结构中的能量最大,对结构的激励程度相对较大。另外,模型结构的累积损伤随输入地震波能量的增大而增加,改变了模型结构的动力特性,使 2 组模型结构在不同频率特性的地震波作用下的  $\beta_{floor}$  值有所不同;但是具有相似的变化规律,即随着输入地震波强度越大, $\beta_{floor}$  值越小,说明地震波强度增大,模型出现累积损伤较大,结构的抗侧刚度减少,阻尼比增大。另外,通过图 12 (a) 可知, F 模型在 PGA=0.2 g 的 Taft 波激励下,第 3 层的  $\beta_{floor}$  值显著小于第 2 层,说明 F 模型在第 3 层出现了明显的损伤,在输入地震能量一定的情况下,第 3 层通过塑性损伤耗散部分地震能量,导致其刚度变化较大。然而 FR 模型在此工况下的  $\beta_{floor}$  值变化趋势相对均匀,表现出相对稳定的抗震性能,直至 PGA=0.2 g 的人工波激励下,FR 模型的  $\beta_{floor}$  值在第 3 层的位置出现明显的转折,如图 12 (a) 所示,说明摇摆墙式减震装置的存在不仅可以有效地衰减结构的振动响应,而且可以显著地延缓结构的损伤进程,同样的结果也可以参见位移响应的分析。

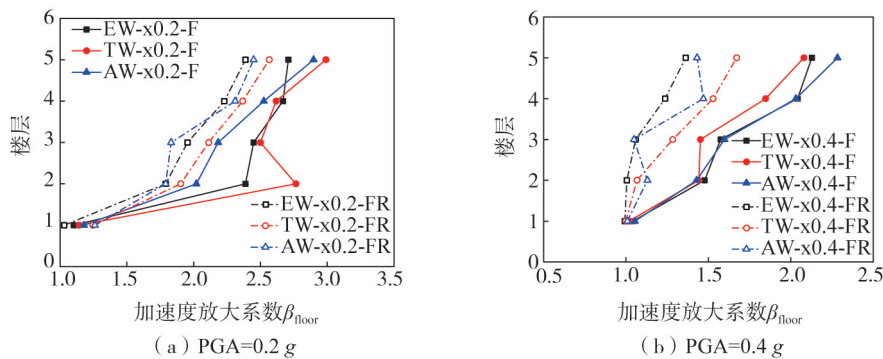


图 12 模型结构在不同地震波激励下的加速度放大系数

Fig. 12 Acceleration amplification coefficient of model structures under different ground motions

## 2.5 位移响应分析

通过加速度分析结果可知,随着地震强度的增加,摇摆墙式减震系统的减震效果越好。由于篇幅的限制,本文只给出 F 模型和 FR 模型分别在 PGA=0.4 g 的 El Centro 波、Taft 波以及人工波激励下的顶层最大位移时程曲线,如图 13 所示。

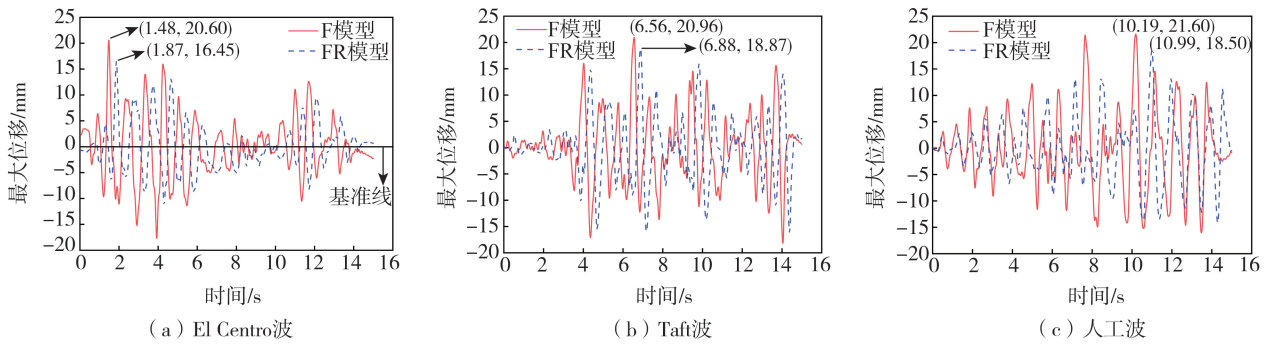


图 13 不同地震波激励下顶层的位移时程曲线

Fig. 13 Displacement time-history curves of the top floor under different seismic wave excitations

由图 13 可知,2 组模型结构顶层的最大位移分别为 20.60、20.96、21.60 mm 和 16.45、18.87、18.50 mm,最大位移的降低率(F 模型与 FR 模型的位移差值与 F 模型的位移比值)分别为 20.15%、9.97%、14.35%,证明了摇摆墙式减震系统的减震有效性。此外,FR 模型相比于 F 模型出现最大峰值的时间点分别延迟了 0.39、0.32、0.80 s,而且 FR 模型的位移时程曲线出现了明显的滞后,体现了 FR 模型被动减震的特点,说明摇摆墙式减震系统与主结构之间的异相振动比较明显,产生的作用于主结构的反作用力较大,因此可以有效地控制主结构的振动反应,衰减结构的损伤进程,提高结构的整体的抗震能力。而且摇摆墙式减震系统可以利用自重摆动以及弹簧势能实现较好的复位效果,由图 13(a)也可以明显看到,即 FR 模型在振动结束时的残余变形相对较小,而 F 模型的偏离基准线较大,其他工况亦是如此。但是在图 13 (c)中可以看到,FR 模型在振动后期的位移响应衰减程度相对较低,这是因为本文采用的加载方式为逐级增大加速度峰值的方法,试验模型出现了明显的累积损伤,刚度折减较大,抗震能力降低。而且摇摆墙式减震系统在反复的摇摆振动过程中出现了一定的疲劳损伤,影响了其减震效果,但是由于摇摆墙式减震装置具有可更换性,可以在试验中快速更换实现更好的减震效果。

### 2.6 层间位移角分析

结构整体损伤程度与结构的最大层间位移角具有很好的相关性<sup>[22]</sup>,因此将 2 组模型结构在不同工况下的最大层间位移角进行分析,如图 14 所示。由图可知,2 组模型结构的底部薄弱层表现出明显的非线性。F 模型的损伤主要出现在底部 3 层,符合框架结构典型的层屈服破坏特征,即在试验中 F 模型的底部 3 层的层间刚度退化相对较快,尤其是第 1 层与第 2 层的损伤相对严重,极易发展为“机构”体系形成薄弱层;而沿着结构高度布置的摇摆墙式减震系统,由于增加了各层的能量交换能力,并且通过其摇摆振动可以使结构各层的抗震性能得到提高,塑性铰向上层分布,各层的层间位移角的变化趋势相对均匀,各层的刚度折减程度相对较小,因此整体的损伤程度相对较小,这与试验现象相一致。另外,由于 FR 模型可以有效地衰减主结构的振动响应并且延缓主结构的损伤进程,因此不同工况下的最大层间位移角(1/198)小于 F 模型(1/164),满足抗震变形验算的相关规定,证明了 FR 模型优越的抗震性能。

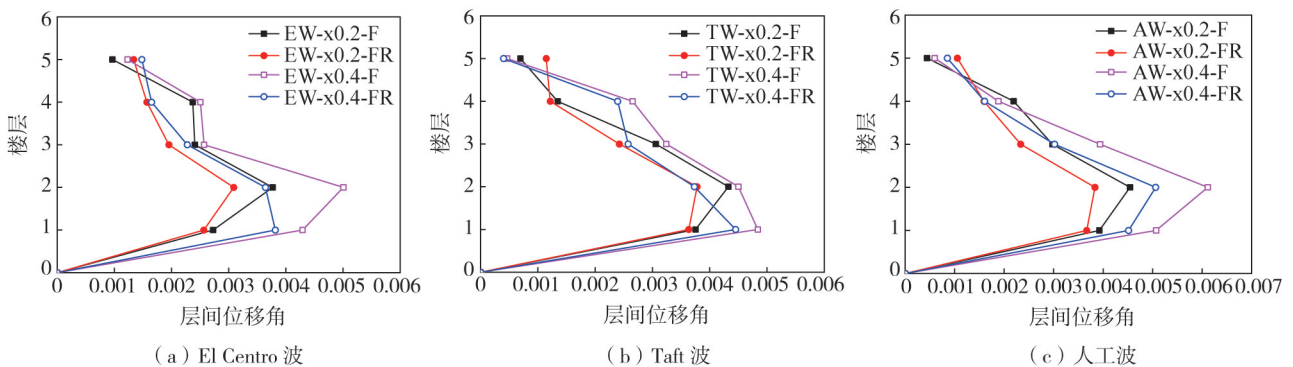


图 14 不同地震波激励下的层间位移角

Fig. 14 Inter-story drift angle under different seismic wave excitations

### 3 结论

本文设计了一种连接框架与摇摆墙的耗能连接构件以及摇摆墙摇摆可控的铰接底座,提出了一种 RC 框架-摇摆墙式减震结构,通过振动台试验分析了该结构在不同地震作用下的抗震性能,得出如下结论:

1) 沿着结构高度布置的摇摆墙式减震系统可有效利用与各层的能量交换,提高结构的耗能能力和整体承载能力,减少结构的累积损伤,控制结构底层的变形集中,改善框架结构的侧向变形模式,使框架结构各层层间位移角变化趋势相对均匀。

2) 摇摆墙式减震结构具有良好的抗震性能,与框架结构相比,最大楼层峰值加速度减幅和最大位移峰值降低率可分别达到 36%、20.15%,并且随着地震强度的增加,减震效果越显著。

3) 摇摆墙式减震子结构能够有效延缓主结构的损伤进程,减少震后残余变形,降低结构各层的加速度放大系数,使结构在 3 种不同地震波激励下的位移峰值时间点分别延迟 0.39、0.32、0.80 s,体现了被动减震的特点。

### 参考文献:

- [1] QU Z, ZHU B J, CAO Y T, et al. Rapid report of seismic damage to buildings in the 2022  $M_6.8$  Luding earthquake, China[J]. Earthquake Research Advances, 2023, 3(1): 100180.
- [2] 清华大学土木工程结构专家组,西南交通大学土木工程结构专家组,北京交通大学土木工程结构专家组,等.汶川地震建筑震害分析[J].建筑结构学报,2008,29(4):1-9.  
Civil Engineering Structures Expert Group, Tsinghua University, Civil Engineering Structures Expert Group, Southwest Jiaotong University, Civil Engineering Structures Expert Group, Beijing Jiaotong University, et al. Analysis on seismic damage of buildings in the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 1-9. (in Chinese)
- [3] CHAO S H, GOEL S C, LEE S S. A seismic design lateral force distribution based on inelastic state of structures[J]. Earthquake Spectra, 2007, 23(3): 547-569.
- [4] 吕西林,全柳萌,蒋欢军.从16届世界地震工程大会看可恢复功能抗震结构研究趋势[J].地震工程与工程振动,2017,37(3):1-9.  
LV Xilin, QUAN Liumeng, JIANG Huanjun. Research trend of earthquake resilient structures seen from 16WCEE[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(3): 1-9. (in Chinese)
- [5] 潘毅,任宇,郭瑞,等.泸定6.8级地震工业厂房典型震害及其启示[J].地震工程与工程振动,2023,43(2):13-23.  
PAN Yi, REN Yu, GUO Rui, et al. Typical damage of industrial buildings in Luding  $M_6.8$  earthquake and its enlightenment[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2023, 43(2): 13-23. (in Chinese)
- [6] 薄景山,王玉婷,薄涛,等.城市和建筑抗震韧性研究的进展与展望[J].地震工程与工程振动,2022,42(2):13-21.  
BO Jingshan, WANG Yuting, BO Tao, et al. Progress and prospect of research on seismic resilience of cities and buildings[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2022, 42(2): 13-21. (in Chinese)
- [7] 周颖,吕西林.摇摆结构及自复位结构研究综述[J].建筑结构学报,2011,32(9):1-10.  
ZHOU Ying, LV Xilin. State-of-the-art on rocking and self-centering structures[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(9): 1-10. (in Chinese)
- [8] SUN T S, KURAMA Y C, OU J P. Practical displacement-based seismic design approach for PWF structures with supplemental yielding dissipators[J]. Engineering Structures, 2018, 172: 538-553.
- [9] GIOIELLA L, TUBALDI E, GARA F, et al. Modal properties and seismic behaviour of buildings equipped with external dissipative pinned rocking braced frames[J]. Engineering Structures, 2018, 172: 807-819.
- [10] LIU W A, HUTCHINSON T C, GAVRAS A G, et al. Seismic behavior of frame-wall-rocking foundation systems. I: Test program and slow cyclic results[J]. Journal of Structural Engineering, 2015, 141(12): 04015059.
- [11] QU Z, WADA A, MOTOYUI S, et al. Pin-supported walls for enhancing the seismic performance of building structures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41(14): 2075-2091.
- [12] 曹海韵,潘鹏,吴守君,等.框架-摇摆墙结构体系中连接节点试验研究[J].建筑结构学报,2012,33(12):38-46.  
CAO Haiyun, PAN Peng, WU Shoujun, et al. Experimental study of connections of frame-rocking wall system[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(12): 38-46. (in Chinese)
- [13] 张富文,李向民,陈玲珠,等.一种框架摇摆墙结构的实现形式及其有限元分析[J].振动与冲击,2016,35(17):213-217.  
ZHANG Fuwen, LI Xiangmin, CHEN Lingzhu, et al. Design and finite element analysis for a new frame-rocking wall structure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(17): 213-217. (in Chinese)
- [14] 董金芝,李向民,张富文,等.基于SMA装置的框架-受控摇摆墙结构抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2019,52(4):41-51.

- DONG Jinzhi, LI Xiangmin, ZHANG Fuwen, et al. Experimental study on seismic performance of frame-controlled rocking wall structures using SMA devices[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(4): 41-51. (in Chinese)
- [15] 曲哲. 摇摆墙-框架结构抗震损伤机制控制及设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.  
QU Zhe. Study on seismic damage mechanism control and design of rocking wall-frame structures [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010. (in Chinese)
- [16] 刘书贤, 聂伟, 路沙沙, 等. 一种连接框架与摇摆墙的耗能连接结构: CN109779064A[P]. 2019-05-21.  
LIU Shuxian, NIE Wei, LU Shasha, et al. An energy-consuming connection structure connecting a frame and a rocking wall; CN109779064A[P]. 2019-05-21. (in Chinese)
- [17] 张敏政. 地震模拟实验中相似律应用的若干问题[J]. *地震工程与工程振动*, 1997, 17(2): 52-58.  
ZHANG Minzheng. Study on similitude laws for shaking table tests[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 1997, 17(2): 52-58. (in Chinese)
- [18] 贾剑辉, 闫路路, 杨树标, 等. 不同层数框架摇摆墙结构抗震性能研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2014, 34(2): 97-103.  
JIA Jianhui, YAN Lulu, YANG Shubiao, et al. Study on seismic performance of rocking-wall frame structure with different stories[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2014, 34(2): 97-103. (in Chinese)
- [19] 刘书贤, 聂伟, 谢雨航, 等. 一种在地震模拟振动台试验中模拟地基不均匀沉降的装置: CN111238756B[P]. 2022-03-04.  
LIU Shuxian, NIE Wei, XIE Yuhang, et al. A device for simulating uneven settlement of foundation in earthquake simulation shaking table test; CN111238756B [P]. 2022-03-04. (in Chinese)
- [20] 刘书贤, 聂伟, 路沙沙, 等. 一种模拟煤炭采动中便于衔接的实验装置及其使用方法: CN109540437B[P]. 2020-07-28.  
LIU Shuxian, NIE Wei, LU Shasha, et al. An experimental device that facilitates connection insimulating coal mining and its use method; CN109540437B [P]. 2020-07-28. (in Chinese)
- [21] NIE W, SHUXIAN L, LUO S S, et al. Seismic performance analysis of rocking wall TMDs structure based on shaking table test[J]. *Earthquakes and Structures*, 2021, 21: 23.
- [22] 马哲昊, 张纪刚, 梁海志, 等. 装配式人工消能塑性铰框架-摇摆墙抗震性能研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2021, 41(1): 151-160.  
MA Zhehao, ZHANG Jigang, LIANG Haizhi, et al. Research on the seismic performance of the prefabricated frame-rocking wall structure based on artificial dissipative plastic hinge[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2021, 41(1): 151-160. (in Chinese)