

于建,赵立财.2023.近断层脉冲型地震动作用下 BRB 框剪结构减震性能设计研究[J].地震研究,46(4):575-585,doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0051.

Yu J, Zhao L C. 2023. Research on damping performance design of BRB frame-shear structure by near-fault pulse-like ground motions [J]. *Journal of Seismological Research*, 46(4):575-585, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0051.

近断层脉冲型地震动作用下 BRB 框剪结构 减震性能设计研究*

于建¹, 赵立财^{1,2,3,✉}

(1. 中铁十九局集团 第五工程有限公司, 辽宁 大连 116100; 2. 中铁十九局集团 第三工程有限公司, 辽宁 沈阳 110136;
3. 台湾科技大学 营建工程系, 中国台湾 台北 10672)

摘要:在脉冲型及非脉冲型地震动作用下,对典型框剪结构及6个屈曲约束支撑(BRB)减震结构进行弹塑性动力时程分析,主要基于层间位移角、结构损坏程度及结构耗能指标,对比分析不同BRB框剪结构的减震性能。结果表明:①由于抗侧刚度的提高,增设BRB能有效降低脉冲型地震动下框剪结构整体的层间位移角响应,使其满足规范限值要求,减震率最高达到52.1%;②相比布置于外周,BRB布置于内框架能更有效减轻脉冲型地震动作用下结构上部楼层梁构件的严重损坏,从结构整体而言使梁构件严重损坏程度占比从71%降至45%以下,同时有效减轻了竖向构件的中度及严重损坏;③相比非脉冲型地震动,脉冲型地震动削弱了减震结构中BRB的塑性耗能能力;④BRB布置于内框架,且其初始刚度和屈服强度按更多楼层区域划分、屈服后刚度比取较小的减震方案的结构在脉冲型地震动下具有较高的减震性能。

关键词:脉冲型地震动;框剪结构;屈曲约束支撑;减震性能

中图分类号: P315.925 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2023)04-0575-11

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0051

0 引言

我国发生过多地破坏性地震,给人民生命财产带来巨大损失。如1976年唐山 $M_s7.8$ 大地震,灾区设防烈度Ⅵ度,实际烈度达到Ⅺ度;2008年 $M_s8.0$ 汶川大地震,灾区设防烈度Ⅵ~Ⅶ度,设计“大震”设防烈度为Ⅶ~Ⅷ度,但实际烈度达到Ⅸ~Ⅺ度(徐铭阳等,2022)。汶川地震动记录表现出明显的近断层脉冲特性(Luet al, 2010; 谢俊举等, 2012),从震害情况可见,地震的强度加上地

震动脉冲效应,对建筑物具有极为强烈的破坏力,导致严重的人员伤亡和经济损失。从以往研究可知,近断层脉冲型地震动具有明显的向前方向性效应和滑冲效应,会引起明显的长周期速度脉冲(贾路等, 2019),且一次地震动的大部分能量都集中在单个或少数几个频率的脉冲上。因此,开展脉冲型地震动作用对建筑结构影响的研究是必要的。

通过减震设计,结构能够具备抵御脉冲型地震动的能力。周敏和薛彦涛(2017)研究了Ⅷ度区某5层BRB框剪结构在罕遇、极罕遇地震作用下的抗震性能,发现减震框架结构能有效降低层

* 收稿日期: 2022-09-03.

基金项目: 辽宁省“兴辽英才计划”青年拔尖人才资助项目(XLYC2007146); 中铁十九局集团有限公司科技研究开发计划项目(2021-B03)。

第一作者简介: 于建(1973-),高级工程师,主要从事房屋建筑结构稳定性研究。

E-mail: 383202550@qq.com.

✉ 通讯作者简介: 赵立财(1985-),正高级工程师,博士,主要从事岩土介质与结构相互作用、结构减震控制与流体动力学研究。E-mail: zhaolicai1314@foxmail.com.

间位移角,使其满足 1/50 限值要求。包嗣海等(2019)以某框剪结构工程为例,采用黏滞阻尼器和 BRB 建立混合减震结构,发现该结构在极罕遇地震作用下能有效改善结构构件的损坏状态并提高结构安全性能。针对地震动脉冲特性对减震结构的影响,程浩和赵杨(2021)对某高层建筑结构进行 BRB 减震参数设计,发现在近断层脉冲型地震动作用下 BRB 减震高层建筑的层间位移反应较大,楼层加速度放大不明显,BRB 耗能在结构总塑性耗能中占比减小,结构塑性损伤较大;陈超等(2021)对典型多层校舍采取减震加固技术,研究脉冲型地震动及其它类型地震动作用下减震加固前后的结构抗震性能、残余变形以及阻尼器工作性能等,发现结构的黏滞阻尼减震效率受地震动特性影响不明显。

目前,同时考虑地震强度及地震动脉冲效应对高层建筑结构影响的研究不多见,本文选取一定量的近断层地震动记录,同时考虑地震强度及其脉冲特性,针对典型的高层框架-剪力墙结构进行 BRB 布置方案和参数的减震性能设计,以期为此类型结构在考虑脉冲型地震动作用下的减震设计提供一定参考。

1 框架-剪力墙结构数值模型

1.1 结构基本信息

本文结合《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)(以下简称《高规》)8.1 节中对于框架-剪力墙结构(以下简称框剪结构)设计的一般布置原则,并参考工程实例,基于 PERFORM-3D 建立典型的高层框剪结构弹塑性模型。该结构基本信息如下:建筑使用功能为办公,结构的首层高度为 4 m,其余楼层高度为 3.5 m,共 15 层,结构总高为 53 m。结构首层平面布置如图 1 所示,灰色阴影部分为框架柱和剪力墙。结构中的框架柱、剪力墙及连梁的混凝土等级划分为:1~5 层 C40、6~10 层 C35、11~15 层 C30,全楼框架梁和楼板均采用 C30。结构全部构件均采用 HRB400 钢筋。抗震设计参数为:抗震设防烈度Ⅷ度(0.20 g),设计地震第一分组,场地类别为Ⅱ类,剪力墙抗震等级为一级,框架抗震等级为二级。基本风压为 0.45 kN/m²,地面粗糙度为 B 类。结构的周期折减系数取为 0.75。

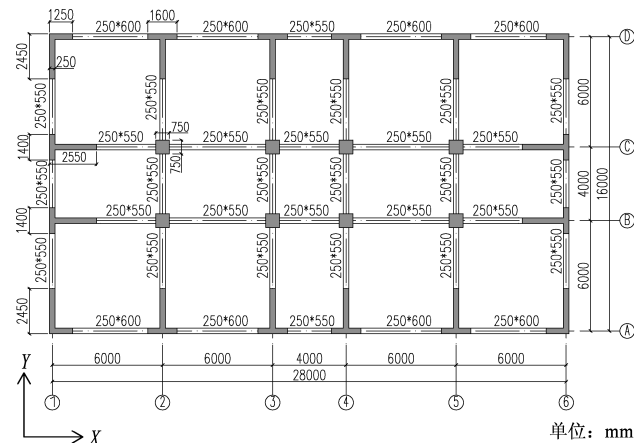


图 1 高层框剪结构模型结构构件首层平面布置图
Fig. 1 Layout plan of the first floor of the high-rise, frame-shear structure

1.2 PERFORM-3D 数值模型

在 PERFORM-3D 中,该高层框剪结构模型构件均采用纤维截面模型模拟。纤维截面模型通过材料积分获得截面的内力-变形关系,与塑性铰模型直接给出截面内力-变形关系相比,在描述截面压弯耦合非线性行为方面有着更大的优势(崔济东,2017)。为考虑约束混凝土和非约束混凝土的应力-应变关系,模型中的混凝土材料的单轴本构采用修正 Kent-Park 模型(Scott *et al.*, 1982),钢筋材料的单轴本构采用常用的考虑随动强化的双线性弹塑性模型,参数取值依据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)。基于 PERFORM-3D 的“YUL-RX”五折线型骨架曲线对上述材料本构进行简化。梁单元按照纤维截面段+弹性段+纤维截面段的形式组装成端部塑性区模型;剪力墙单元使用 PERFORM-3D 的 Shear Wall 单元分别采用约束和非约束混凝土纤维来模拟剪力墙的端部约束区与非端部约束区。整体数值模型采用刚性楼板假定,从而减少结构位移自由度以提高整体的计算效率。根据以上条件建立的 PERFORM-3D 框剪结构数值模型三维图如图 2 所示。

在工况定义中,按照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)(以下简称《抗规》),取重力荷载代表值为 1 倍恒载加 0.5 倍活载;模型采用 Rayleigh 阻尼,阻尼比取为 5%。PERFORM-3D 模型与 YJK 模型的总质量及模态分析结果对比见表 1。由表 1 可见,两模型的总质量和自振周期的相对误差在 3% 以内,验证了 PERFORM-3D 模型

动力特性的准确性。模型的小震弹性层间位移角分别为 X 方向 1/946, Y 方向 1/1 018, 满足《抗规》中 1/800 限值要求。该模型可用于后续的计算分析。

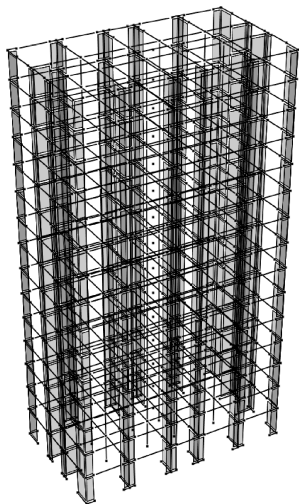


图 2 PERFORM-3D 高层框剪结构数值模型三维图
Fig. 2 3D digram of PERFORM-3D numerical model of the high-rise, frame-shear structure

表 1 PERFORM-3D 与 YJK 模型总质量及模态分析结果对比
Tab. 1 Comparison of total mass and modal analysis results between the PERFORM-3D model and the YJK model

模型名称	模型总质量/ t	模型自振周期 t		
		第 1 阶 (X 平动)	第 2 阶 (Y 平动)	第 3 阶 (扭转)
YJK 模型	9 418.3	1.46	1.35	1.15
PERFORM-3D 模型	9 473.6	1.47	1.36	1.12
相对误差	0.6%	0.7%	0.7%	2.6%

2 近断层脉冲型地震动作用下框剪结构响应分析

2.1 地震动的选取

为探讨近断层地震动脉冲特性对框剪结构地震响应的影响,本文选取一定量的近断层脉冲型及非脉冲型地震动进行对比研究。根据《抗规》5.1.2 条规定,分别选取 7 条近断层脉冲型地震波和 7 条非脉冲型地震波,其基本信息见表 2。14 条地震波的加速度反应谱和规范反应谱如图 3 所示,两类地震波均与规范谱在对应的结构基本周期点上相差不大于 20%,满足《抗规》关于所选地震

波与规范谱在统计意义上相符的规定。

图 4 给出其中 2 条典型的近断层脉冲型地震波 GM4CHICHI_TCU076 (GM4) 和 DARFIELD_LI NCN23E (GM6) 的加速度时程及速度时程曲线。从图 4 可以看出,两条地震波的速度时程表现出较大的幅值 ($PGV/PGA > 0.2$),且出现了明显的两个相反方向的脉冲。

表 2 14 条地震波基本信息
Tab. 2 Basic information of 14 pieces of seismic wave

类型	编号	地震名称	发震年份	震级	断层距/ km	脉冲周期/ s
脉 冲 型	GM1	IMPVALL_H _H -E04140	1979	6.53	7.05	4.79
	GM2	SANSALV_GIC090	1986	5.8	6.30	0.81
	GM3	NORTHR_JGB022	1994	6.69	5.43	3.54
	GM4	CHICHI_TCU076	1999	7.62	2.74	4.73
	GM5	NIIGATA_NIGH11NS	2004	6.63	8.93	1.80
	GM6	DARFIELD_LINCN23E	2010	7.0	7.11	7.37
	GM7	DARFIELD_TPLCN27W	2010	7.0	6.11	8.93
非 脉 冲 型	GM8	CHALFANT_A_A-LAD180	1986	6.19	17.17	—
	GM9	NORTHR_LOS000	1994	6.69	12.44	—
	GM10	DUZCE_DZC180	1999	7.14	6.58	—
	GM11	PARK2004_VYC090	2004	6.0	5.21	—
	GM12	UBMARCHE_P_A-BEV000	1997	6.0	18.86	—
	GM13	CHUETSU_5-G1NS	2007	6.8	10.97	—
	GM14	IWATE_44B61NS	2008	6.9	16.67	—

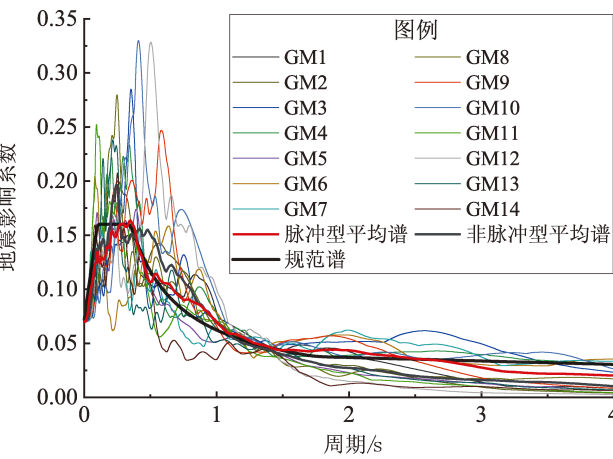


图 3 14 条地震波反应谱与规范谱对比
Fig. 3 Comparison of 14 earthquake-wave response spectra and the design response spectrum

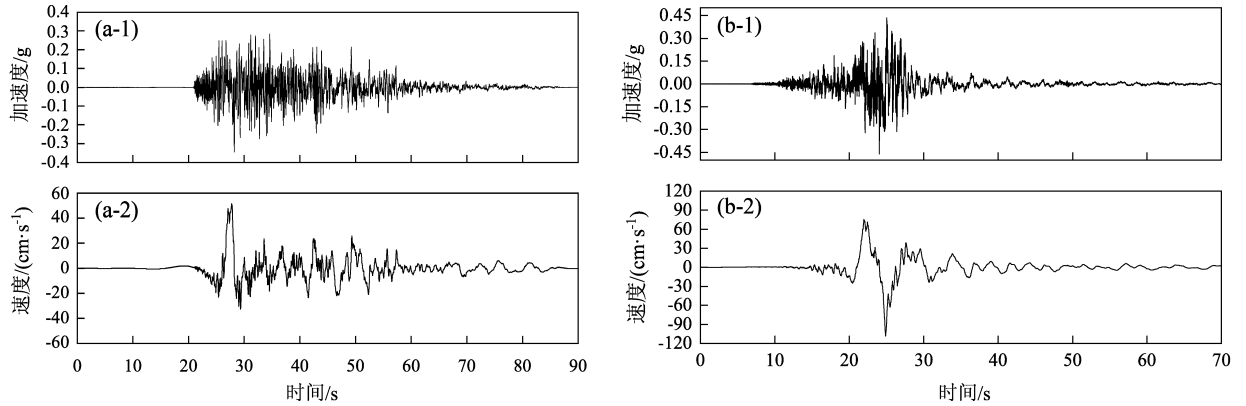


图4 CHICHI_TCU076 (a) 和 DARFIELD_LINC23E (b) 地震波加速度和速度时程曲线

Fig. 4 Time-history curves of acceleration and velocity of CHICHI_TCU076 earthquake wave (a) and DARFIELD_LINC23E earthquake wave (b)

2.2 层间位移角响应分析

地震动加速度时程峰值取罕遇地震相关数值乘以调整系数得到 (周敏, 2017), VIII度 (0.20 g) 设防烈度对应的调整系数为 1.50, 结合《高规》中时程分析罕遇地震峰值取值, 地震动主方向加速度峰值取为 600 cm/s^2 。选择结构的 X 方向为主方向、 Y 方向为次方向, 再选择 Y 方向为主方向、 X 方向为次方向, 在主、次两水平方向 (峰值比 1:0.85) 同时输入地震波, 对高层框剪结构进行强震作用下的弹塑性动力时程分析, 得到结构在 X 和 Y 方向的层间位移角响应, 如图 5 所示。

为保证结构在地震动作用下满足生命安全的设防标准, 要求结构满足《抗规》对钢筋混凝土框剪结构的弹塑性层间位移角限值 (1/100) 要求。从图 5 可看出, 脉冲型地震波引起结构层间位移角的强烈响应, 部分脉冲型地震波下层间位移角远超出限值, 且在 X 方向, 7 组脉冲型地震波下的层间位移角平均值也超出限值; 相比脉冲型地震波, 在非脉冲型地震波下层间位移角基本在限值以下。以上实验表明, 脉冲型地震动作用下结构无法满足生命安全的性能标准, 需要通过减震设计来提高结构的抗震性能。

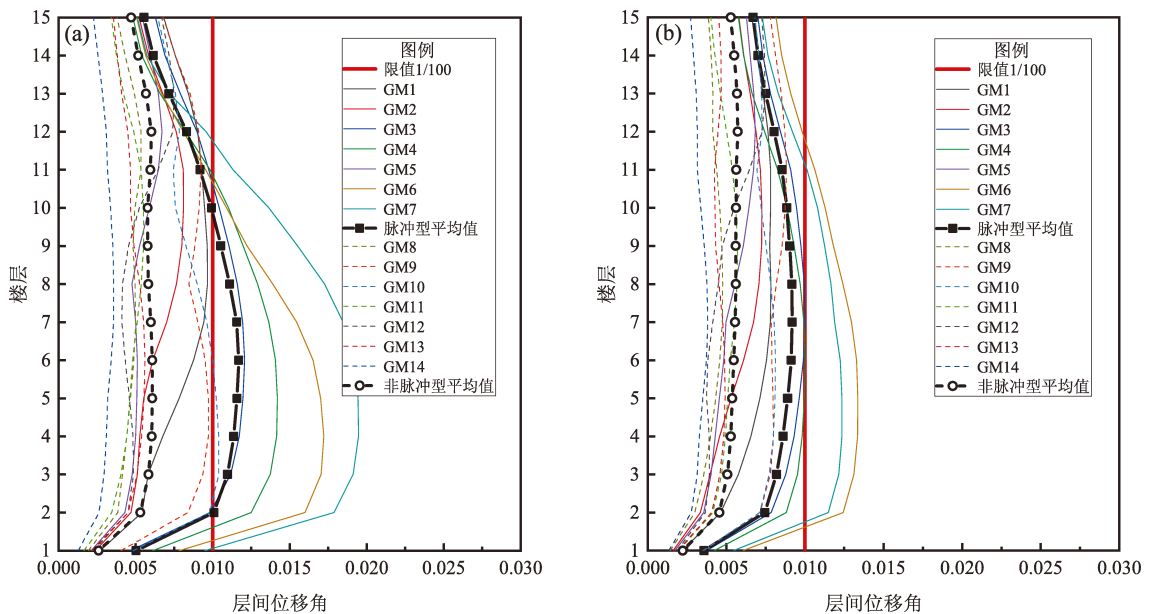


图5 脉冲型与非脉冲型地震作用下高层框剪结构 X 方向 (a)、 Y 方向 (b) 层间位移角响应

Fig. 5 Story drift ratio response in X direction (a) and Y direction (b) of the high-rise, frame-shear structure by the pluse-like and non-pluse-like ground motions

3 BRB 减震方案设计

相较于普通钢支撑，BRB 利用外约束单元防止核心单元受压时发生屈曲，是一种受拉特性同普通钢支撑、且受压特性与受拉特性相当的支撑，具有良好的滞回耗能作用。本文采用耗能型 BRB 进行结构的减震设计，耗能型 BRB 在设计中要求多遇地震水准下不发生屈服，在中强震及大震水准下产生塑性变形及耗能。PERFORM - 3D 模型中 BRB 构件由一个 BRB 复合组件模拟，一个 BRB 复合组件由一个 BRB 组件和一个弹性杆组件串联得到。

针对该类典型框剪结构的特点，从 BRB 布置方式和参数两方面进行减震方案设计。BRB 在结构楼层中的布置方式有两种，一种布置于外周，另一种布置于内框架。考虑到 X 方向为弱侧，对称布置 4 套 BRB， Y 方向则对称布置 2 套 BRB，采用单斜撑的安装形式，如图 6 所示。两种 BRB 布置方式的三维示意图如图 7 所示（浅蓝色部分为 BRB 单元）。BRB 布置于 1 ~ 12 楼层，全结构共布置 72 套 BRB。

按楼层划分区域，设计两种方案：①1 ~ 4 层、5 ~ 8 层、9 ~ 12 层共 3 个区域；②1 ~ 2 层、3 ~ 4 层、5 ~ 6 层、7 ~ 8 层、9 ~ 10 层、11 ~ 12 层共 6 个区域，在不同区域布置不同初始刚度和屈服承载力的 BRB。各方案的屈服承载力数值取相应 BRB 初始刚度的 1/1000，BRB 极限变形均取屈服变形的 20 倍，BRB 核心单元长度全部一致。

基于上述方案，再通过改变 BRB 屈服后刚度比设计其它方案，共设计出 6 种减震方案，各减

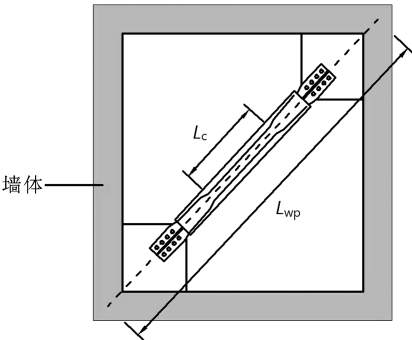


图 6 BRB 安装示意图

Fig. 6 BRB installation

震方案的结构模型的编号、BRB 布置方式和具体参数见表 3。

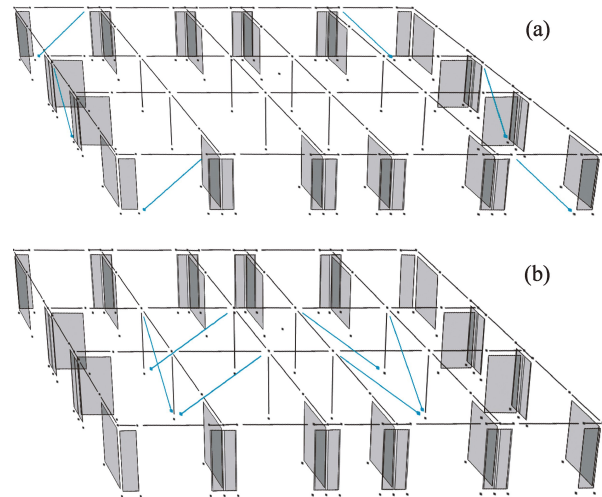


图 7 BRB 布置于外周 (a) 和内框架 (b) 的三维示意图

Fig. 7 3D diagrams of the arrangement of BRB on the periphery (a) and in inner frame (b)

表 3 6 种减震方案的结构模型参数

Tab. 3 BRB parameters of 6 damping structure models

减震 模型 编号	BRB 布置 方式	初始刚度/($\times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$)						屈服 后刚 度比
		1 ~ 2 层	3 ~ 4 层	5 ~ 6 层	7 ~ 8 层	9 ~ 10 层	11 ~ 12 层	
JZ-1	外周	1.6	1.6	1.2	1.2	0.8	0.8	0.02
JZ-2	外周	1.6	1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.02
JZ-3	外周	1.6	1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.01
JZ-4	内框架	1.6	1.6	1.2	1.2	0.8	0.8	0.02
JZ-5	内框架	1.6	1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.02
JZ-6	内框架	1.6	1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.01

表 4 给出原结构与 6 个减震结构模型自振周期的对比。从表中可以看出，增加 BRB 之后，结构的自振周期较原结构有一定减小，减小率为 18% ~ 30%，表明增加 BRB 后，结构的抗侧刚度有所提高。

表 4 原结构与 6 个减震结构模型自振周期对比

Tab. 4 Comparison of periods between the original structure and six damping structure models (单位: s)

自振周期	原结构	JZ-1	JZ-2	JZ-3	JZ-4	JZ-5	JZ-6
第一阶	1.47	1.20	1.20	1.20	1.19	1.19	1.19
第二阶	1.36	1.05	1.06	1.06	1.01	1.01	1.01
第三阶	1.12	0.78	0.79	0.79	0.98	0.99	0.99

4 BRB 框剪结构的减震性能分析

通过弹塑性动力时程分析,基于基底剪力、层间位移角、结构构件损坏及塑性耗能等指标,对比分析原结构模型与 6 个减震结构模型在脉冲型及非脉冲型地震动作用下的减震性能。

4.1 基底剪力

原结构与 6 个减震结构模型在 7 组脉冲型及非脉冲型地震动作用下的基底剪力平均值见表 5。从表中可见,相比于原结构,在脉冲型及非脉冲型地震动作用下各减震结构在 X 方向的基底剪力平均值有一定程度的降低,尤其 JZ-6 模型在脉

冲型地震动作用下基底剪力平均值降低 15.1%,在非脉冲型地震动作用下降低 22.0%。

4.2 层间位移角响应

原结构与 6 个减震结构模型在 7 组脉冲型和非脉冲型地震动作用下的层间位移角平均值如图 8 所示。从图中可以看出,由于提高了原结构的抗侧刚度,增设 BRB 能够有效地降低脉冲型地震动下原结构整体的层间位移角响应,使其满足规范限值要求,保证结构整体的安全性能。从结构的自振周期和振型可知,X 方向为结构的弱侧。因此,在相同强度地震动作用下,通过减震设计,减震结构在 X 方向布置的 BRB 数量多于 Y 方向,可使层间位移角的降低幅度明显大于 Y 方向,尤其表现在地震动作用下。综上所述,BRB 布置于内框架的减震结构层间位移角较布置于外周的减震结构小,而不同参数方案的减震结构层间位移角响应差异较小。

针对 X 方向,表 6 给出 6 个减震结构在脉冲型和非脉冲型地震动作用下不同楼层的层间位移角减震率。综合来看,在脉冲型地震动作用下,JZ-4 结构的层间位移角减震效果最佳,最高减震率为 52.1%,在第 4 层;在非脉冲地震动作用下,JZ-6 结构的层间位移角减震效果最佳,最高减震率为 47.0%,在第 2 层。

表 5 原结构与 6 个减震结构模型的基底剪力平均值

Tab. 5 Average base shears of the original structure and six damping structure models

结构	脉冲型地震动作用		非脉冲型地震动作用	
	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向
原结构	14 820	16 939	12 961	14 848
JZ-1	13 978	16 886	11 820	15 990
JZ-2	13 810	16 792	11 682	15 821
JZ-3	13 815	16 886	11 668	15 990
JZ-4	12 850	16 775	10 354	15 762
JZ-5	12 648	16 106	10 129	15 232
JZ-6	12 584	15 927	10 113	15 084

表 6 脉冲型和非脉冲型地震动作用下 6 个减震结构的层间位移角减震率

Tab. 6 Damping ratios of the story drift ratio by the pulse-like and non-pulse-like ground motions

楼层	脉冲型地震动						非脉冲型地震动					
	JZ-1	JZ-2	JZ-3	JZ-4	JZ-5	JZ-6	JZ-1	JZ-2	JZ-3	JZ-4	JZ-5	JZ-6
1	49.9%	50.1%	49.3%	50.9%	51.3%	50.3%	37.7%	40.0%	39.6%	45.4%	46.5%	46.5%
2	50.0%	49.8%	49.1%	51.2%	51.3%	50.4%	39.2%	40.8%	40.6%	46.0%	47.0%	47.0%
3	49.0%	48.2%	47.7%	51.9%	51.1%	50.2%	38.6%	39.3%	38.9%	45.8%	46.0%	46.0%
4	47.8%	47.1%	46.7%	52.1%	51.3%	50.4%	36.9%	37.6%	37.4%	44.9%	44.9%	44.9%
5	46.8%	46.4%	46.1%	51.8%	51.3%	50.5%	34.4%	35.4%	35.2%	43.1%	43.6%	43.6%
6	46.0%	45.5%	45.2%	51.8%	51.0%	50.4%	31.9%	32.7%	32.6%	41.8%	42.1%	42.4%
7	44.6%	43.9%	43.7%	51.6%	50.3%	49.9%	29.0%	29.2%	29.2%	40.2%	39.7%	40.1%
8	42.0%	41.4%	41.3%	50.4%	49.1%	48.8%	25.8%	25.8%	25.9%	36.9%	37.3%	37.3%
9	38.2%	37.9%	38.0%	48.4%	47.5%	47.4%	22.4%	23.7%	24.1%	33.3%	34.3%	34.5%
10	34.7%	34.3%	34.5%	46.7%	45.9%	46.1%	20.6%	21.8%	22.1%	31.1%	31.8%	31.8%
11	29.1%	28.1%	28.5%	43.6%	42.0%	42.6%	20.7%	20.7%	21.0%	29.7%	28.7%	29.1%
12	21.6%	20.4%	21.0%	38.9%	37.3%	38.2%	18.4%	17.1%	17.6%	27.1%	25.2%	26.1%
13	7.8%	7.3%	8.3%	30.3%	29.1%	30.6%	8.5%	8.1%	9.0%	19.8%	18.9%	20.1%
14	4.6%	4.4%	2.9%	23.6%	23.1%	25.2%	1.0%	1.5%	2.7%	15.1%	14.5%	16.2%
15	10.5%	9.7%	8.1%	21.7%	21.8%	24.2%	4.0%	2.8%	1.5%	13.0%	12.7%	14.6%

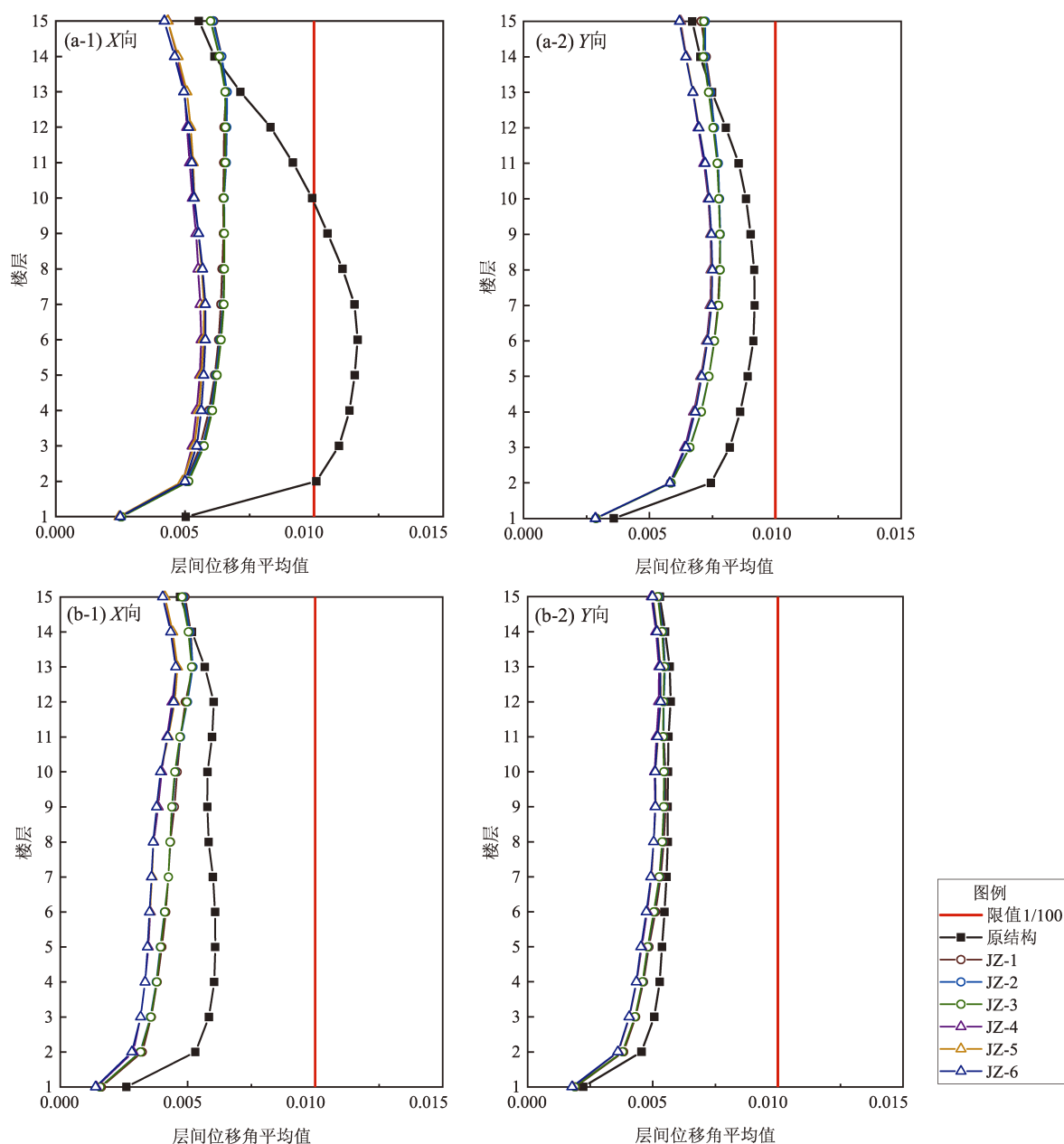


图8 脉冲型 (a) 和非脉冲型 (b) 地震动作用下原结构与6个减震结构模型层间位移角对比

Fig. 8 Comparison of story drift ratios the original structure and six damping structure models by the pulse-like (a) and non-pulse-like (b) ground motions

4.3 结构构件损坏程度

4.3.1 判别标准

以X方向为主方向的计算结果为例,对比分析原结构与6个减震结构在脉冲型及非脉冲型地震动作用下的结构损坏程度。参考《建筑结构抗倒塌设计规范》(CECS 392—2014),基于混凝土和钢筋材料的应变来判别混凝土结构构件的损坏程度,见表7。为方便统计结构构件的损坏程度,将结构中的框架梁和梁合并统计为梁构件,将框架

柱和剪力墙合并统计为竖向构件。

4.3.2 梁构件损坏程度

分别取脉冲型及非脉冲型地震动作用下结构整体的梁构件损坏程度平均值进行统计。原结构及6个减震结构的梁损坏程度占比如图9a所示。从图中可看出,在脉冲型地震动作用下原结构的梁构件大部分出现了严重损坏,严重损坏程度占71%,而在非脉冲地震动作用下仅占34%。本文通过BRB减震设计有效地减轻了梁构件的损坏,

表 7 基于应变的结构构件损坏程度判别标准
Tab. 7 Criterion for damage degree of structural members based on strain

损坏程度	判别标准	
	混凝土	钢筋
无损坏	$ \varepsilon_3 \leq \varepsilon_p $	且 $\varepsilon_1 < \varepsilon_y$
轻微损坏	$ \varepsilon_3 \leq \varepsilon_p $	且 $\varepsilon_y < \varepsilon_1 < 2\varepsilon_y$
轻度损坏	$ \varepsilon_p < \varepsilon_3 \leq 1.5 \varepsilon_p $	或 $2\varepsilon_y < \varepsilon_1 < 3.5\varepsilon_y$
中度损坏	$1.5 \varepsilon_p < \varepsilon_3 \leq \varepsilon_{cu} $	或 $3.5\varepsilon_y < \varepsilon_1 < 12\varepsilon_y$
严重损坏	$ \varepsilon_3 > \varepsilon_{cu} $	或 $\varepsilon_1 < 12\varepsilon_y$

注： ε_1 为主拉应变； ε_3 为主压应变； ε_p 和 ε_{cu} 分别为约束混凝土单轴受压峰值应变和极限应变； ε_y 为钢筋的屈服应变。

尤其是将 BRB 布置于内框的结构中时尤为明显，JZ-4、JZ-5、JZ-6 结构均使梁构件在脉冲型地震动作用下的严重损坏程度降低至 45% 以下。

统计梁构件的严重损坏程度沿楼层分布的占比，如图 9b 所示。从图中可以发现，原结构梁构件的严重损坏程度占比在脉冲型地震动下明显大于非脉冲型地震动下的占比，脉冲型地震动下原结构大部分楼层中（2~11 层）梁严重损伤程度占比达到 100%，即楼层中所有梁完全发生严重损坏；在非脉冲型地震作用下，各减震结构的梁构件严重损坏程度占比无明显的差异，且随楼层变化趋势基本一致；而在脉冲型地震作用下，相较于 BRB 布置于外周的 3 个减震结构，BRB 布置于内框架的 3 个减震结构的上部楼层（9~14 层）梁构件严重损坏程度占比有一定减少。

4.3.3 竖向构件损坏程度

分别取脉冲型及非脉冲型地震动作用下结构整体的竖向构件损坏程度平均值进行统计。原结构及 6 个减震结构的竖向构件损坏程度占比情况如图 9c 所示。从整体的竖向构件损坏程度来看，各结构的竖向构件无损坏程度的占比没有明显的差异。在脉冲型地震动作用下，减震结构一定程度上降低了竖向构件的中度损坏及严重损坏，JZ-4、JZ-5、JZ-6 结构表现较为明显。与梁构件相比，竖向构件损坏程度明显较低，且损坏主要集中在结构的底层，因此结构拥有足够的安全储备，体现了“强竖向构件弱水平构件”的延性设计理念。

4.4 结构塑性耗能分析

针对脉冲型及非脉冲型地震动作用下弹塑性动力时程分析得到的各项能量指标的平均值进行对比分析。能量指标包括：地震总输入能、各结构的瑞雷阻尼耗能比例和塑性耗能的比​​例（包括梁构件、竖向构件及 BRB 的塑性耗能），见表 8。从表中可知，在同等加速度峰值的地震动输入下，脉冲型地震动输入到结构的总能量明显大于非脉冲型地震动输入的总能量。从地震输入能量的角度分析，其原因为脉冲型地震动中具有极大的瞬时输入能，占地震总输入能的大部分（丁玉春，朱晞，2007）。另外，由于 BRB 的布置提高了结构整体抗侧刚度，改变了原结构动力特性，减震结构能够减少脉冲型地震动总输入能，尤其表现在 JZ-4、JZ-5、JZ-6 结构。从塑性耗能比例结果来看，JZ-4、JZ-5、JZ-6 结构的塑性耗能较 JZ-1、JZ-2、JZ-3 明显，其中 JZ-6 结构的塑性耗能比例最大，达到 24.0%，有效地降低了梁构件和竖向构件的塑性耗能（比例均为所有结构中最小），提高了主体结构的安全性。

表 8 脉冲型和非脉冲型地震动作用下原结构与 6 种减震结构模型的能量结果对比

Tab. 8 Comparison of the energy dissipation of the original structure and six damping structure models by the pulse-like and non-pulse-like ground motions

类型	结构模型	地震总输入能/ 人能/ ($\times 10^4 \text{ kN}\cdot\text{m}$)	瑞雷阻尼 耗能比例 (%)	塑性耗能比例 (%)		
				梁构件	竖向构件	BRB
脉冲型	原结构	2.44	46.5	48.0	5.5	—
	JZ-1	1.89	47.9	31.8	8.2	12.1
	JZ-2	1.89	47.4	30.8	7.8	13.9
	JZ-3	1.90	47.4	30.5	7.8	14.3
	JZ-4	1.64	44.3	29.3	5.3	21.2
	JZ-5	1.64	44.0	28.2	4.8	23.0
	JZ-6	1.64	43.9	27.5	4.6	24.0
非脉冲型	原结构	1.46	64.6	31.0	4.4	—
	JZ-1	1.62	59.4	21.5	5.8	13.3
	JZ-2	1.64	58.5	20.0	5.4	16.1
	JZ-3	1.63	58.4	19.8	5.3	16.5
	JZ-4	1.74	52.4	19.3	3.9	24.5
	JZ-5	1.74	52.2	18.0	3.4	26.4
	JZ-6	1.74	52.0	17.6	3.4	27.0

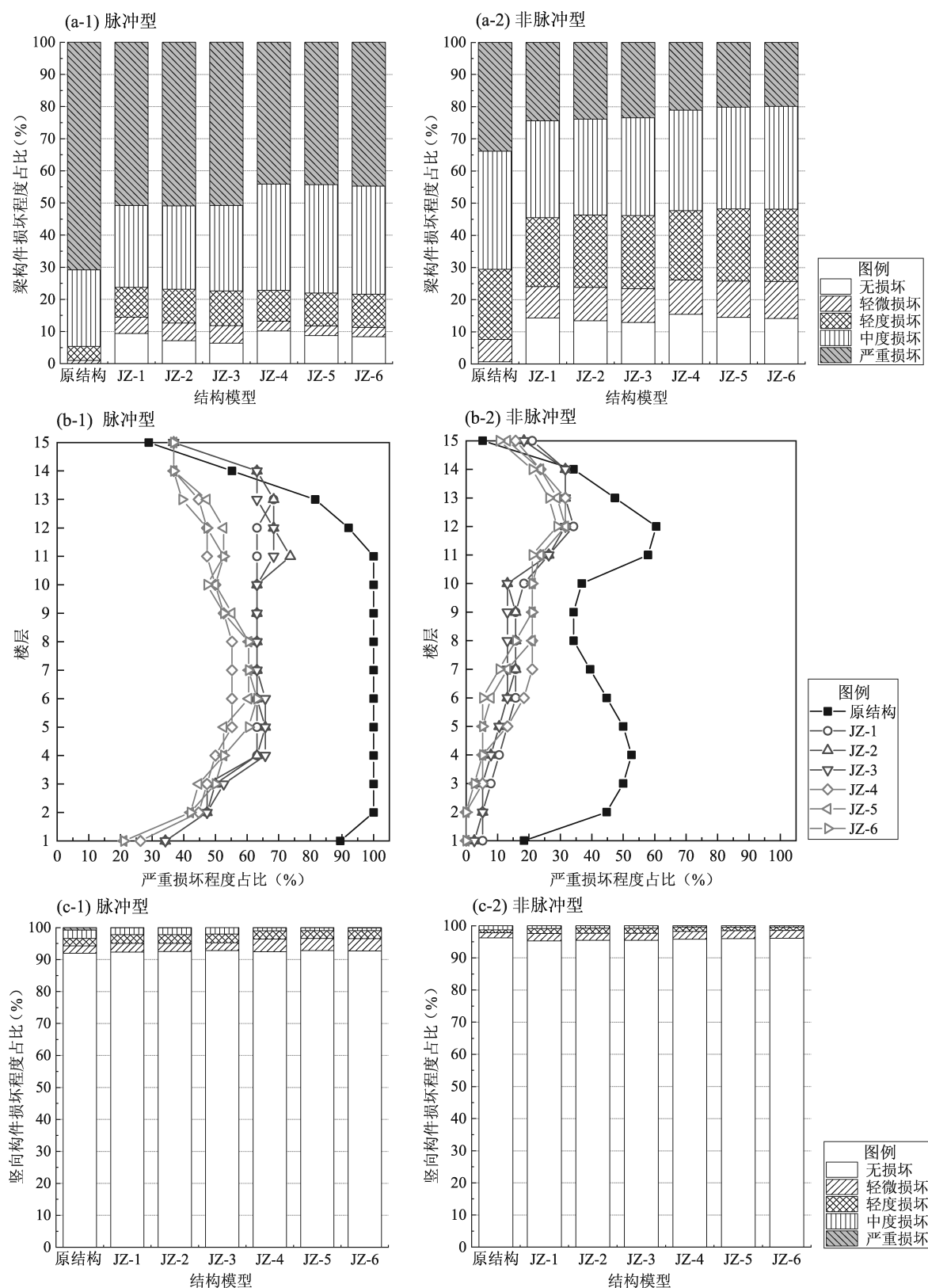


图9 脉冲型和非脉冲型地震动作用下梁构件损坏程度占比 (a)、梁构件严重损坏程度随楼层分布占比 (b) 和竖向构件损坏程度占比 (c)

Fig. 9 The proportion of beam damage (a), beam components severely damaged with floor changes (b) and vertical component damage (c) by the pulse-like and non-pulse-like ground motions

在非脉冲型地震动作用下, JZ-6 结构的塑性耗能比例最大。整体而言, 脉冲型地震动下减震结构中的塑性耗能能力较弱, 而梁构件和竖向构件承担了较多塑性耗能, 反映出脉冲型地震动对结构的塑性破坏有更大的影响。

图 10 为脉冲型及非脉冲型地震动作用下各减震结构中 BRB 在 3 类构件塑性耗能中的占比, 更直观地展示了各减震结构中 BRB 的塑性耗能能力。从图中可知, 脉冲型地震动削弱了 BRB 的塑性耗能能力。JZ-6 结构在脉冲型及非脉冲型地震动作用下的 BRB 塑性耗能占比均为最高, 其中在脉冲型地震动下占比达到 42.8%; JZ-5 结构中 BRB 塑性耗能占比大于 JZ-4 结构, 表明按更多楼层区域进一步划分 BRB 的初始刚度和屈服强度参数有利于提高整体 BRB 的塑性耗能能力。

基于层间位移角响应、结构损坏程度和结构耗能分析可知, JZ-6 结构是较优的减震结构, 在所有减震方案结构中表现出较高的减震性能。由此建议: ①在此类框剪结构中, 应优先考虑将 BRB 布置于结构的内框架中; ②对 BRB 的初始刚度及屈服强度按多楼层区域进行划分, 以充分发挥 BRB 的塑性变形能力; ③在参数设计中, 可适当降低 BRB 的屈服后刚度比, 从而在一定程度上提高 BRB 的塑性耗能能力, 减轻主体结构的塑性损坏。

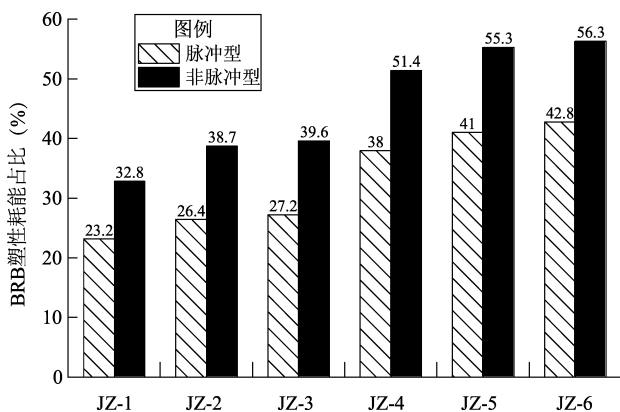


图 10 6 种减震结构中 BRB 塑性耗能占比

Fig. 10 Proportion of inelastic energy of BRB members of six damping structures

5 结论

本文对典型高层框剪结构进行多个 BRB 减震

方案设计, 对原结构及 6 个减震结构进行脉冲型及非脉冲型地震动作用下的弹塑性时程分析, 基于层间位移角、结构损坏程度及结构耗能指标, 对比分析不同 BRB 框剪结构的减震性能, 得到以下主要结论:

(1) 脉冲型地震动作用下增设 BRB 能提高抗侧刚度, 有效降低结构整体的层间位移角响应, 使其满足规范中保证生命安全的限值要求。BRB 布置于内框架的减震结构, 对于层间位移角有更高的减震率, 尤其是在脉冲型地震动作用下, 减震率达到 52.1%。

(2) 相比非脉冲型地震动, 脉冲型地震动加剧了结构构件的损坏程度。脉冲型地震动作用下, BRB 布置于内框架的减震结构较明显地减小了梁构件严重损坏程度占比, 使结构整体梁构件严重损坏程度占比从 71% 降低至 45% 以下; 从楼层分布来看, 有效地减轻了结构上部楼层梁构件的严重损坏, 较明显地减轻了竖向构件的中度损坏及严重损坏。

(3) 相对非脉冲型地震动, 脉冲型地震动削弱了减震结构中 BRB 的塑性耗能能力。在所有减震方案结构中, BRB 布置于内框架, 且其初始刚度参数按更多楼层区域划分、屈服后刚度比取较小的减震方案的结构, BRB 发挥出较优的塑性耗能能力, 有效降低了梁构件和竖向构件的塑性耗能。该减震方案结构在脉冲型地震动作用下具有较高的减震性能。

参考文献:

- 包嗣海, 汪大洋, 汪天雷, 等. 2019. 极罕遇地震下框剪结构的混合减震控制[J]. 广西大学学报(自然科学版), 44(3): 765-775.
- 陈超, 陈鑫, 俞伟根, 等. 2021. 近断层速度脉冲型地震动对多层校舍减震加固性能影响研究[J]. 工程抗震与加固改造, 43(3): 95-103.
- 程浩, 赵杨. 2021. 近断层脉冲型地震作用下 BRB 减震高层建筑结构抗震性能分析[J]. 建筑结构, 51(S1): 868-874.
- 崔济东. 2017. PERFORM-3D 原理与实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 丁玉春, 朱晞. 2007. 地震动中输入能量的探讨[J]. 北京交通大学学报, 31(4): 49-51.
- 贾路, 阮鑫鑫, 刘章军. 2019. 近断层脉冲型地震动的降维模拟[J]. 地震研究, 42(4): 516-522.
- 谢俊举, 温增平, 李小军, 等. 2012. 基于小波方法分析汶川地震近断层地震动的速度脉冲特性[J]. 地球物理学报, 55(6): 1963-1972.
- 徐铭阳, 王丛, 董尧, 等. 2022. 极罕遇地震作用下建筑结构一致风险

- 抗倒塌设计方法研究[J]. 建筑结构学报, 43(7): 253–263.
- 周敏, 薛彦涛. 2017. BRB 钢筋混凝土框架结构罕遇、极罕遇地震弹塑性分析[J]. 建筑科学, 33(5): 25–30.
- 周敏. 2017. BRB 框架结构罕遇、极罕遇地震下倒塌性能研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院.
- Lu M, Li X J, An X W, *et al.* 2010. A preliminary study on the near-source strong-motion characteristics of the great 2008 Wenchuan Earthquake in China[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 100(5B): 2490–2507.
- Scott B D, Park R, Priestley M. 1982. Stress – strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates[J]. Aci Journal, 79(1): 13–27.
- CECS 392—2014, 建筑结构抗倒塌设计规范[S].
- GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
- GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].
- JGJ 3—2010, 高层建筑混凝土结构技术规程[S].

Research on Damping Performance Design of BRB Frame-shear Structure by Near-fault Pulse-like Ground motions

YU Jian¹, ZHAO Licai^{1,2,3}

(1. China Railway 19th Bureau Group Fifth Engineering Co. Ltd., Dalian 116100, Liaoning, China)

(2. China Railway 19th Bureau Group Third Engineering Co. Ltd., Shenyang 110136, Liaoning, China)

(3. Construction Engineering, Taiwan University of Science and Technology, Taipei 10672, Taiwan, China)

Abstract

Pulse-like ground motions exert extremely strong destructive force on building structures. The elastic-plastic dynamic time-history analysis of the typical frame-shear structure and several buckling restrained braces (BRB) shock-absorbing design structures subjected to the pulse-like and non-pulse-like ground motions is carried out. Based on the story drift ratio, the structural damage degree, and the structural energy consumption index, the seismic performance of different BRB frame-shear structures is compared and analyzed. The analysis shows that, due to the improvement of lateral stiffness, the added BRB can help to effectively reduce the story drift ratio response of the frame-shear structure subjected to the pulse-like ground motions, and make the structure meet the limit requirement in the Code. Instead of being arranged on the periphery, the BRB arranged in the inner frame of the shock-absorbing structure can help to reduce more effectively the serious damage to the upper-floor beam members of the structure subjected to the pulse-like ground motions, and reduce the proportion of the serious damage to the beam members from 71% to less than 45% as a whole, and effectively reduce the moderate- and serious-damage to the vertical members. Pulse-like ground motions can weaken the plastic energy-dissipation capacity of BRB in shock-absorbing structures while the non-pulse-like ground motions cannot. In general, when the structure is arranged with BRB in the inner frame, and the structure's initial stiffness and yield strength are divided by more floor zones, the smaller post-yield stiffness ratio would show higher damping performance subjected to the pulse-like ground motions.

Keywords: pulse-like ground motion; frame-shear structure; buckling restrained braces; damping performance