

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.184

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 带自复位耗能连梁的剪力墙结构的抗震性能

钱辉,徐建,张勋,邓恩峰,刘应扬,范家俊

(郑州大学 土木工程学院,郑州 450001)

**摘要:**为了减小强地震作用下钢筋混凝土联肢剪力墙的连接梁结构损伤,实现震后结构功能的快速恢复,提出了一种兼具自复位和耗能功能的新型自复位耗能连梁。新型自复位耗能连梁在跨中安装了由形状记忆合金绞线和粘弹性耗能单元并联而成的新型复合自复位阻尼器。以一榀10层双肢剪力墙结构为例,对连梁跨中分别安装该新型自复位阻尼器的联肢剪力墙、粘弹性阻尼器的联肢剪力墙和普通钢筋混凝土连梁的联肢剪力墙进行了动力时程分析,对比分析了不同阻尼器对联肢剪力墙结构的减震效果。结果表明:地震作用下,结构变形和耗能都集中在连梁阻尼器上,但新型自复位连梁阻尼器对结构地震响应的控制效果要优于粘弹性阻尼器,新型复合连梁阻尼器在地震过程中表现出较好的自复位及耗能能力。

**关键词:**联肢剪力墙;复合连梁阻尼器;动力时程分析;自复位;减震效果

**中图分类号:**TU375.4;TU311.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2021)03-0009-07

## Seismic performance of shear wall structure with self-centering energy-dissipating coupling beam

QIAN Hui, XU Jian, ZHANG Xun, DENG Enfeng, LIU Yingyang, FAN Jiajun

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, P. R. China)

**Abstract:** In order to reduce the damage of the coupling beams in the coupled reinforced concrete shear wall structure under strong earthquake, realizing the rapid recovery of the structural function after earthquake, a new hybrid damping coupling beam with self-centering and energy dissipation functions were proposed. An innovative composite self-centering damper composed of shape memory alloy strands and viscoelastic damping devices was installed in the middle span of the innovative self-centering energy-dissipating coupling beam. A 10-layer coupled shear wall structure was taken as an example. The dynamic time history analysis on the coupled shear walls with the innovative self-centering damper, viscoelastic damper and common RC coupling beam, respectively, were conducted to investigate the seismic response mitigation effect of different damper on the shear wall structure. The calculation results show that the deformation and energy dissipation of the structure are concentrated on the coupling beam damper under the actions of earthquake, while the new self-centering coupling beam damper has better control effect than the viscoelastic damper for the seismic response of the structure, exhibiting excellent re-centering and energy dissipation capacities during the earthquakes.

**收稿日期:**2020-07-17

**基金项目:**国家自然科学基金(51978631)

**作者简介:**钱辉(1978-),男,博士,教授,主要从事结构振动控制研究,E-mail: qianhui@zzu.edu.cn.

张勋(通信作者),男,博士,E-mail: zhangxun@zzu.edu.cn.

**Received:**2020-07-17

**Foundation item:**National Natural Science Foundation of China (No. 51978631)

**Author brief:**QIAN Hui (1978-), PhD, professor, main research interests: structural vibration control, E-mail: qianhui@zzu.edu.cn.

ZHANG Xun (corresponding author), PhD, E-mail: zhangxun@zzu.edu.cn.

**Keywords:** coupled shear wall; composite coupling beam damper; dynamic time history analysis; self-centering; seismic reduction effect

在地震作用下,联肢剪力墙结构中的连梁因其较小的跨高比往往容易出现损伤甚至是剪切脆性破坏<sup>[1]</sup>,且震后损伤及破坏难以修复,造成巨大的财产损失。将联肢剪力墙连梁在跨中处截断,安装剪切型连梁阻尼器可以改变连梁的变形和耗能特点<sup>[2-11]</sup>。近年来,学者们开发了多种连梁阻尼器,如摩擦型阻尼器<sup>[2]</sup>、粘弹性阻尼器<sup>[3-4]</sup>、软钢阻尼器<sup>[5]</sup>、形状记忆合金阻尼器<sup>[6-7]</sup>、金属橡胶阻尼器<sup>[8]</sup>以及软钢-粘弹性复合阻尼器<sup>[9-10]</sup>、铅-橡胶复合阻尼器<sup>[11]</sup>等复合型连梁阻尼器。摩擦型、软钢型和粘弹性型及其复合阻尼器在循环往复荷载作用下滞回曲线饱满,耗能能力强,但存在震后残余位移较大、修复困难的问题;形状记忆合金阻尼器具有较好自复位能力,但等效阻尼比相对较小,耗能能力有限,在结构中单独使用时性价比相对较低。

为充分发挥连梁作为联肢剪力墙抗震设防第一道防线的作用,减小结构在地震过程中的动力反应,使结构在震后能够最大限度地恢复到初始状态,降低震后修复难度,提出一种新型自复位耗能连梁阻尼器。该复合连梁阻尼器由形状记忆合金(Shape Memory Alloys,简称 SMA)单元和粘弹性单元并联组成。结合一榀 10 层联肢剪力墙结构,验证该复合阻尼器消能减震和自复位的可行性。

## 1 自复位耗能连梁

自复位耗能连梁由耗能段和非耗能段组成,两部分通过螺栓装配连接,非耗能段为截断连梁两端的钢筋混凝土连梁部分,浇筑时里面设置预埋件;耗能段由本文所提出的新型自复位复合连梁阻尼器组成,如图 1 所示。粘弹性阻尼器滞回曲线饱满,耗能能力强,在小震或风振情况下即可耗能,但其提供的阻尼力和附加刚度有限;SMA 阻尼器具有稳定的耗能能力,其提供的回复力可使结构具备自复位能力,但其等效阻尼比相对较小,耗能能力有限。基于此,采用粘弹性材料和 SMA 材料研制一种复合型阻尼器,使其兼具耗能和复位功能,同时也能为剪力墙结构提供一定附加刚度,在风振和地震作用下都能稳定工作。在强风或小震作用下,粘弹性材料发生剪切变形耗能,SMA 未屈服,仅提供刚度和回复力。而在大震作用下,SMA 不仅提供刚度和回复力,还

能与粘弹性材料共同耗能。

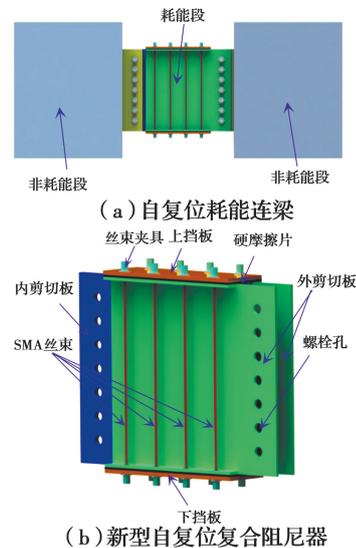


图 1 自复位耗能连梁示意图

Fig. 1 Schematic drawing of the dampers in self-centering damping coupling beam

## 2 剪力墙结构概况

选取文献[12]中的一幢 10 层钢筋混凝土剪力墙结构中的一榀双肢剪力墙进行研究。剪力墙结构层总高为 30 m,层高为 3 m。抗震设防烈度为 8 度,场地类别为Ⅲ类,设计地震分组为第 1 组,特征周期为 0.45 s。楼面恒荷载为 4.0 kN/m<sup>2</sup>,活荷载为 2.0 kN/m<sup>2</sup>。墙肢截面高度 3 000 mm,墙厚 250 mm,连梁跨度 2 100 mm,截面高 900 mm,跨高比为 2.33。墙肢及连梁混凝土强度等级为 C40,纵筋、箍筋及架立筋的强度等级均为 HRB335。结构尺寸及墙肢、连梁配筋见图 2。

自复位耗能连梁中的复合阻尼器是采用基于承载力需求的等刚度设计方法进行参数设计。为实现新型自复位耗能连梁中阻尼器 SMA 单元在地震作用下先于连梁非耗能段屈服而耗能的目的,设计时,使连梁非耗能段的抗剪承载力  $F_y$  与连梁阻尼器的屈服承载力  $V_b$  之间满足  $F_y \leq V_b$ 。为保证带自复位耗能连梁的联肢剪力墙结构在多遇地震即小震作用下有足够的抗侧刚度,保证对剪力墙墙肢提供足够的约束,新型自复位耗能连梁的刚度与普通钢筋混凝土连梁刚度的比值不应小于 0.5,不宜小于 0.7<sup>[13]</sup>。出于偏安全的角度考虑,设计时采用等刚

度设计准则,即新型自复位耗能连梁的刚度和普通钢筋混凝土连梁的刚度接近。本文中阻尼器中粘弹性材料层在大震作用下最大剪切变形设计为  $\gamma = 150\%$ ,粘弹性单元刚度不应超过 SMA 单元刚度的 10%。具体的设计流程见图 3。

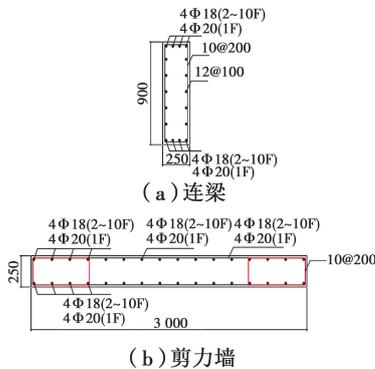


图 2 剪力墙结构具体尺寸及配筋图(mm)

Fig. 2 Specific dimensions and reinforcement diagram of shear wall structure (mm)

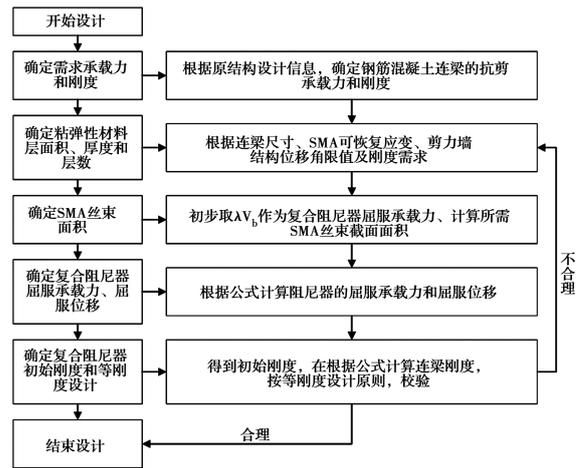


图 3 设计流程图

Fig. 3 Design flow chart

粘弹性连梁阻尼器、自复位 SMA 复合连梁阻尼器以及连梁中,预埋件钢板和阻尼器钢板均选用 Q345。按照上述设计方法及设计流程,得到阻尼器具体参数见表 1。

表 1 阻尼器设计参数

Table 1 Parameters of dampers

结构名称	粘弹性单元			SMA 单元			阻尼器 屈服力/kN
	长度/mm	高度/mm	厚度/mm	截面面积/mm <sup>2</sup>	有效长度/mm	初始刚度/(kN·m <sup>-1</sup> )	
VCBW	400	400	20				
SVCBW	400	400	20	800	450	1.441×10 <sup>5</sup>	328.5

### 3 剪力墙有限元模型的建立

为了更加清晰地分析新型复合连梁阻尼器对剪力墙地震响应和损伤的控制效果,建立了普通钢筋混凝土剪力墙结构模型(CBW)、粘弹性连梁阻尼器的剪力墙结构模型(VCBW)以及带自复位 SMA 复合耗能连梁的剪力墙结构模型(SVCBW)。VCBW 中粘弹性阻尼器参数与 VCBW 中复合阻尼器的粘弹性单元材料参数相同。

#### 3.1 材料本构模型

采用大型通用有限元软件 ABAQUS 建立有限元模型。墙肢和连梁中的混凝土采用 ABAQUS 自带的混凝土塑性损伤模型,墙肢暗柱的混凝土部分和模型中所有钢筋采用韦锋等<sup>[14]</sup>开发的用于模拟杆系单元的混凝土材料和钢筋材料的单轴滞回本构模型。

#### 3.2 单元选取

剪力墙墙肢(不包括边缘构件即暗柱)和连梁均采用分层壳单元 S4R 模拟,可通过关键字 rebar

layer 定义墙肢和连梁内钢筋材料特性。对于剪力墙暗柱,则采用 Timoshenko 纤维梁单元 B31 模拟,梁单元中钢筋可通过关键字 rebar 以纤维的方式插入。最后,通过 Stringer 共节点绑定的方式将剪力墙墙肢与暗柱连接在一起,以实现两者之间的共同受力。建立 CBW 有限元模型如图 4(a)所示。

对于 VCBW 和 SVCBW 两种结构中连梁阻尼器的模拟,粘弹性材料力学特性通过 Kelvin 模型表达,该模型由一个线性弹簧单元和一个线性阻尼单元并联。其输出力可表示为

$$F_d = k_d u + c_d \dot{u} \quad (1)$$

$$\begin{cases} k_d = G' A / h \\ c_d = G'' A / (\omega h) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $F_d$  为粘弹性单元输出力; $k_d$ 、 $c_d$  分别为粘弹性单元等效刚度和等效阻尼; $u$  为阻尼器位移; $G'$ 、 $G''$  分别为粘弹性材料存储模量和耗能模量; $A$ 、 $h$  分别为粘弹性层剪切面积和厚度; $\omega$  为加载圆频率。

在 ABAQUS 中,采用其自带的特殊连接单元,

即线性弹簧 Spring 单元和阻尼单元 Dashpot 并联在一起,即 Spring/Dashpots 连接器模拟基于 Kelvin 模型的粘弹性材料的宏观简化本构模型。其中,线性弹簧 Spring 单元赋予等效刚度系数  $k_d$ ,阻尼单元 Dashpot 单元赋予等效阻尼系数  $c_d$ ,即可构成一个等效的 Kelvin-Voigt 模型。SMA 丝束采用三维二节点桁架单元 T3D2 模拟,并赋予其 ABAQUS 自带的超弹性材料本构模型。SVCBW 的复合连梁阻尼器采用将桁架单元和 Springs/Dashpots 特殊连接器并联在一起模拟。为避免应力集中,将非耗能段与阻尼器相连部分的材料设置为 L 型刚臂,两端刚臂用平行铰接链杆连接,并赋予其 Link 连接属性,Turss 单元与刚性体之间用分布耦合约束 Coupling 连接。同时,为体现连梁的变形损伤特性,可将连梁非耗能段混凝土材料的强度等级设置为 C35<sup>[8]</sup>。在 ABAQUS 中建立的 VCBW 结构和 SVCBW 结构的有限元模型及其阻尼器连接示意图分别如图 4(c)、(d) 所示。

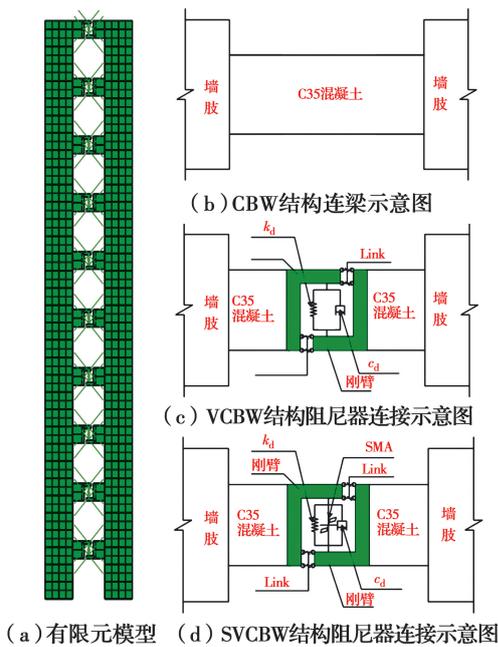


图 4 VCBW 和 SVCBW 的有限元模型

Fig. 4 FEM of VCBW and SVCBW

## 4 动力时程分析

### 4.1 模态分析

分别对 VCBW、VCBW 和 SVCBW 这 3 种结构进行模态分析,前 3 阶 3 种结构自振周期对比见表 2。可以看出,VCBW 结构前 3 阶自振周期与 CBW 结构相差较大,主要是由于 VCBW 结构连梁阻尼器刚度小,为结构提供的等效刚度小,使 VCBW 结构

的自振周期较 CBW 结构增大;而 SVCBW 结构的前 3 阶自振周期与 CBW 结构相近,说明两种结构的刚度相近。

表 2 结构前 3 阶自振周期对比

Table 2 Comparison of the first three orders of natural vibration period

振型	CBW 自振周期/s	VCBW 自振周期/s	SVCBW 自振周期/s
1	0.886 8	0.964 7	0.894 8
2	0.215 8	0.240 9	0.218 7
3	0.133 0	0.137 2	0.133 8

### 4.2 地震波的选择

考虑模型的场地类别、设防烈度和地震波选取原则等因素,选取 2 条天然波 LWD\_DEL AMO BLVD\_00\_nor 波(LWD)、EMC\_FAIRVIEW AVE\_00\_w 波(EMC)和一条人工波,选取地震动持续时间为 20 s。图 5 给出了 3 条地震动的时程曲线。各地震动加速度反应谱及其平均值反应谱与 8 度小震的规范设计反应谱的对比,如图 6 所示。由图 6 可见,选取的 3 条地震动的平均反应谱和规范反应谱吻合较好。设防烈度为 8 度,多遇地震和罕遇地震的加速度峰值分别为 70、400  $\text{cm/s}^2$ 。

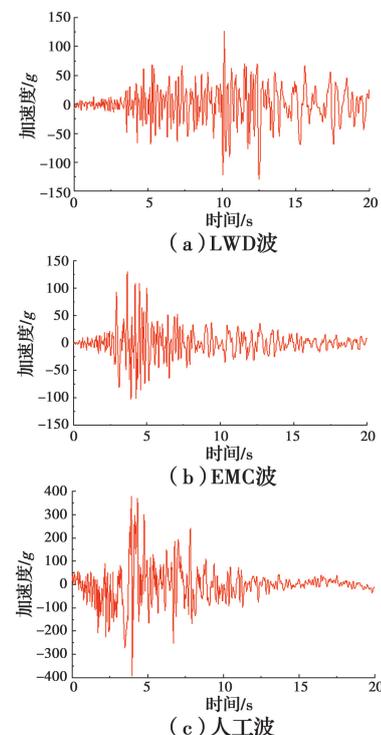


图 5 选取的地震动时程曲线

Fig. 5 Time history curves of the selected earthquake motions

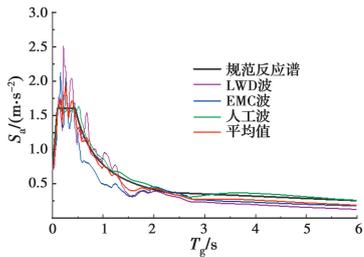


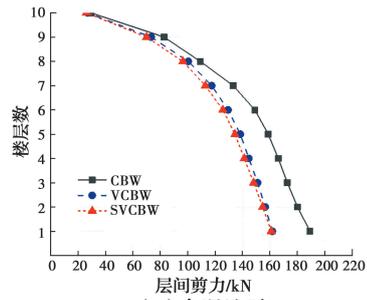
图 6 地震波反应谱和规范反应谱的对比

Fig. 6 Comparison of acceleration spectrum

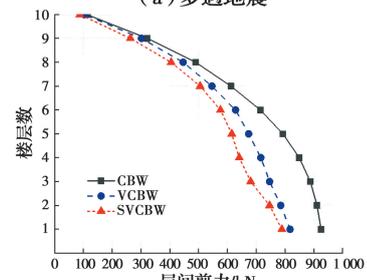
### 4.3 地震响应结果分析

4.3.1 楼层层间剪力 图 7 给出了 3 个结构在多遇地震和罕遇地震两种不同设防烈度作用下 3 条地震波输入时各层最大层间剪力的平均值对比情况。可以看出,无论在多遇地震还是罕遇地震作用下,SVCBW 结构和 VCBW 结构的最大层间剪力均值都小于 CBW 结构。在多遇地震作用下,VCBW 结构和 SVCBW 结构的基底剪力相近,分别比 CBW 结构降低了 14.54%和 14.61%。这说明在小震作用下,粘弹性阻尼器和新型复合阻尼器就都能耗散地震能量,新型复合阻尼器对层间剪力的控制效果与粘弹性阻尼器控制效果相差不大;在罕遇地震作用下,VCBW 结构和 SVCBW 结构的最大基底剪力均值较 CBW 结构分别减少 11.65%和 14.73%,在所有楼层,SVCBW 结构层间剪力都要明显小于 VCBW 结构,这说明在罕遇地震下,新型复合阻尼器对层间剪力的控制效果要优于 VCBW,SMA 丝束已充分参与耗能。

4.3.2 楼层层间位移角 图 8 给出了 3 个结构在多遇地震和罕遇地震作用下 3 条地震波输入时最大层间位移角的平均值对比情况。可以看出,无论在多遇还是罕遇地震作用下,粘弹性阻尼器并不能明显降低结构的位移响应,甚至会放大结构的位移响应。这是由于安装粘弹性阻尼器削弱了连梁的刚度。而新型复合阻尼器能够显著降低结构的位移响应:多遇地震作用下,最大层间位移角均值由 VCBW 的 0.909 38‰降到 SVCBW 的 0.833 76‰,3 种结构的层间位移角均小于规范的层间位移角限值 1/1 000。罕遇地震作用下,最大层间位移角均值由 6.86‰降到 5.968‰,且新型复合阻尼器还具有较大的弹塑性层间变形富余。3 种结构的层间位移角均小于规范的层间位移角限值 1/100,连梁跨中安装新型复合阻尼器能够有效提供剪力墙结构的附加刚度。



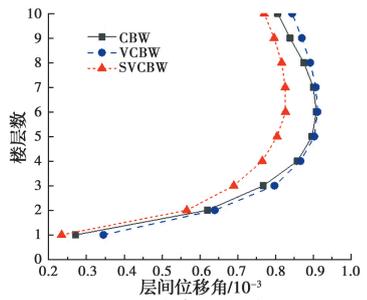
(a) 多遇地震



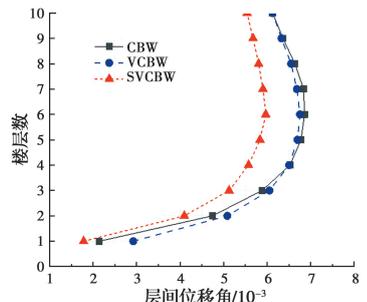
(b) 罕遇地震

图 7 楼层剪力均值对比

Fig. 7 Comparison of mean shear forces between floors



(a) 多遇地震



(b) 罕遇地震

图 8 楼层层间位移角均值对比

Fig. 8 Comparison of mean value of displacement angle between floors

4.3.3 阻尼器滞回曲线 分别选取 VCBW 结构和 SVCBW 结构在 LWD 地震波罕遇地震作用下层间位移角最大的楼层即第 6 层连梁中阻尼器为代表,查验阻尼器的耗能与复位情况。图 9 所示为该工况下第 6 层粘弹性阻尼器和新型复合阻尼器在 LWD 地震波 8 度罕遇地震作用下的滞回曲线。可以看出,新型复合阻尼器滞回曲线较粘弹性阻尼器

更加饱满,在地震全过程中耗能稳定,残余位移大大减小,新型复合阻尼器在位移约为 2 mm 时进入屈服,新型复合阻尼器能够在地震作用下发挥很好的复位和耗能效果。

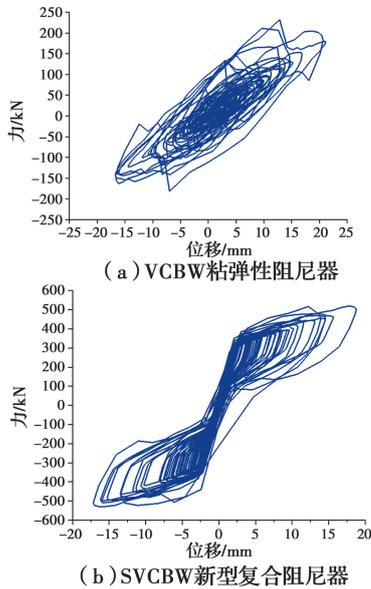


图 9 阻尼器滞回曲线

Fig. 9 Hysteresis curve of dampers

4.3.4 剪力墙结构受拉损伤 以 EMC 地震波为例,给出 3 个结构在罕遇地震作用下的受拉损伤云图,如图 10 所示。可以看出,在罕遇地震作用下,SVCBW 结构连梁先于墙肢发生屈服,起到了很好

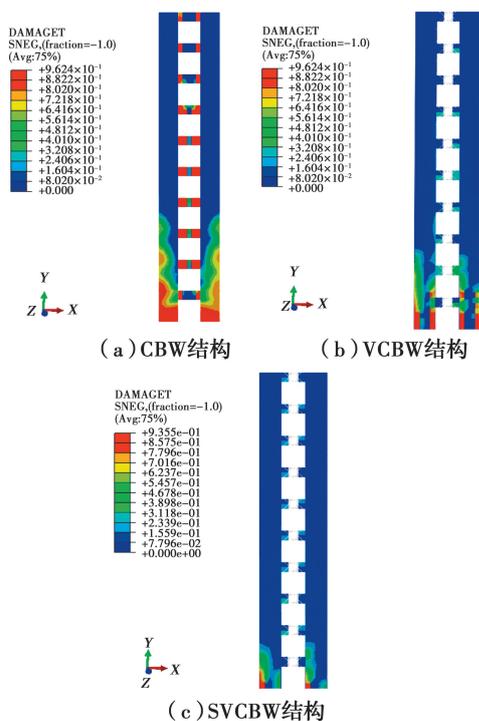


图 10 剪力墙受拉损伤云图

Fig. 10 Tensile damage cloud image of shear wall

的保护墙肢作用,达到了延性设计要求。罕遇地震作用下,VCBW 粘弹性阻尼器能够很好地耗能从而保护连梁,连梁只有少许部位出现损伤,但由于刚度的降低,导致墙肢底部出现较严重的受弯损伤;罕遇地震作用下,CBW 结构连梁损伤程度较设防地震较为严重,出现全跨度方向上的损伤,墙肢底层也破坏严重,墙肢损伤由底层延伸至第 4 层,而 SVCBW 结构连梁部分只有轻微损伤,墙肢除根部少量区域破坏严重,损伤面积也较无控结构大为减少。这是因为,在地震作用下,阻尼器先于连梁屈发生服,结构变形耗能都集中在阻尼器上,有效地保护了连梁和剪力墙墙肢。由上可知,安装新型复合阻尼器对剪力墙结构损伤的控制效果最为显著,安装该复合阻尼器既能满足先于墙肢和连梁耗能而保护主体结构的目的,又能充分保证剪力墙结构的抗侧刚度。

## 5 结论

1) 提出一种基于形状记忆合金和粘弹性材料并联组成的新型复合连梁阻尼器,安装在连梁跨中,形成一种新型的自复位耗能连梁。

2) 基于承载力需求的等刚度设计准则,提出了自复位耗能连梁中复合阻尼器的参数设计方法,给出了设计流程。

3) 粘弹性阻尼器和新型复合阻尼器都能在地震中稳定耗能,新型复合阻尼器能够在地震作用中起到很好的自复位和耗能效果。

5) 罕遇地震作用下,粘弹性 SMA 复合阻尼器先于连梁和墙肢耗能,大大减轻剪力墙结构的损伤程度,对连梁和墙肢起到了很好的保护作用。

6) 新型复合阻尼器能有效减小剪力墙结构层间剪力和层间位移角,耗散大量能量,减少残余位移,且其控制效果明显优于粘弹性阻尼器。

## 参考文献:

- [1] 田晴,赵崇锦,王忠凯,等. 新疆某超高层住宅楼动力弹塑性分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38 (Sup2): 30-34.  
TIAN Q, ZHAO C J, WANG Z K, et al. Elastic and plastic dynamic analysis of a super high-rise residential building in Xinjiang [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2016, 38 (Sup2): 30-34. (in Chinese)
- [2] CHUNG H S, MOON B W, LEE S K, et al. Seismic

- performance of friction dampers using flexure of RC shear wall system [J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2009, 18(7): 807-822.
- [3] LYONS R M, CHRISTOPOULOS C, MONTGOMERY M S. Enhancing the seismic performance of RC coupled wall high-rise buildings with viscoelastic coupling dampers [C]//15WCEE, Lisbon, Portugal, Paper-ID: 1573, September 24-28, 2012.
- [4] 王玉璋. 高阻尼黏弹性橡胶连梁阻尼器力学性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.  
WANG Y Z. The research of mechanical properties of high damping viscoelastic rubber coupling-beam damper [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012. (in Chinese)
- [5] 滕军, 马伯涛, 李卫华, 等. 联肢剪力墙连梁阻尼器伪静力试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2010, 31(12): 92-100.  
TENG J, MA B T, LI W H, et al. Pseudo-static test for coupling beam damper of coupled shear wall structure [J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(12): 92-100. (in Chinese)
- [6] 毛晨曦, 王大磊, 王涛, 等. 安装 SMA 阻尼器的钢筋混凝土连梁拟静力试验[J]. *地震工程与工程振动*, 2014, 34(4): 140-147.  
MAO C X, WANG D L, WANG T, et al. Pseudo-static tests of reinforced concrete coupling beams equipped with SAM dampers [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2014, 34(4): 140-147. (in Chinese)
- [7] 王振营, 毛晨曦, 张亮泉. 新型 SMA 耗能连梁框架剪力墙结构抗震性能研究[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(Sup2): 53-58.  
WANG Z Y, MAO C X, ZHANG L Q. Seismic performance of reinforced concrete frame-shear wall structure with novel shape memory alloy dampers in coupling beams [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(Sup2): 53-58. (in Chinese)
- [8] 赵亚哥白. 基于金属橡胶阻尼器耗能减震框架剪力墙体系的抗震研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.  
ZHAO Y G B. Study on seismic performance of shear frame structure system with metallic rubber dampers [D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [9] 蒋欢军, 李书蓉. 带可更换部件的联肢剪力墙抗震性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(1): 24-32, 41.  
JIANG H J, LI S R. Seismic performance of RC coupled shear wall with replaceable components [J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(1): 24-32, 41. (in Chinese)
- [10] KIM H J, CHOI K S, OH S H, et al. Comparative study on seismic performance of conventional RC coupling beams and hybrid energy dissipative coupling beams used for RC shear walls [C]//15WCEE, Lisbon, Portugal, Paper-ID: 2254, September 24-28, 2012.
- [11] 房晓俊. 功能自恢复连梁抗震性能研究[D]. 广州: 广州大学, 2018.  
FANG X J. Study on seismic performance of self-resilient coupling beam [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2018. (in Chinese)
- [12] 万志威. O型钢板黏弹性阻尼器抗震性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2017: 92-93.  
WAN Z W. Study on seismic performance of O-shaped steel plate-viscoelastic combined damper [D]. Shanghai: Tongji University, 2017: 92-93. (in Chinese)
- [13] 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
Technical specification for concrete structures of tall building: JGJ 3-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [14] 韦锋, 杨红, 白绍良. 钢筋混凝土剪力墙多竖杆模型的应用和讨论[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2005, 28(1): 126-130.  
WEI F, YANG H, BAI S L. Application of multi-vertical-line-element model of RC walls and discussion on it [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2005, 28(1): 126-130. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)