

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.08.019

金属阻尼器和 VD 混合减震技术在 框架结构加固中的应用

陈亚磊¹, 陈道政^{1,2}, 王伟强³

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 国防科技大学 电子对抗学院, 安徽 合肥 230037)

摘要:文章以某栋 7 层框架结构为例, 选用黏滞阻尼器(viscous damper, VD)和金属阻尼器 2 种消能构件, 分别进行多遇和罕遇地震工况下的时程分析, 通过 ETABS 结构分析软件计算并分析对比原结构、增设 VD、金属阻尼器和 VD 混合布置在不同工况下的层间位移角、层间剪力、能量耗散、最大加速度等地震响应, 对比突出金属阻尼器和 VD 混合布置的实际减震效果以及 2 种地震工况下阻尼器的滞回和耗能情况。结果表明, 金属阻尼器和 VD 混合布置的结构能更好地控制框架结构的地震反应, 特别是在大震下控制地震响应效果突出。

关键词:黏滞阻尼器(VD); 金属阻尼器; 地震响应; 滞回曲线; 时程分析

中图分类号: TU375.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2025)08-1132-07

Application of metal and viscous damper mixed damping technology in reinforcement of frame structures

CHEN Yalei¹, CHEN Daozheng^{1,2}, WANG Weiqiang³

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 3. College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

Abstract: In this paper, a seven-story frame structure is taken as an example. Two kinds of energy dissipation components, viscous damper(VD) and metal damper, are selected to carry out time history analysis under frequent and rare earthquake conditions. The ETABS structural analysis software is used to calculate and compare the seismic responses such as interlayer displacement angle, interlayer shear force, energy dissipation and maximum acceleration of the original structure, structure with VD and structure with mixed arrangement of metal damper and VD under different working conditions. The actual damping effect of mixed arrangement of metal damper and VD and the hysteresis and energy dissipation of the damper under two kinds of seismic conditions are highlighted. The analysis results show that the structure with mixed arrangement of metal damper and VD can better control the seismic response of the frame structure, especially under large earthquakes.

Key words: viscous damper(VD); metal damper; seismic response; hysteretic curve; time history analysis

地震作用会输入能量至建筑结构, 引起建筑
结构本身产生相应的地震响应, 当建筑物的主要

抗侧力构件的地震反应超过一定限值时就会引起
结构整体的严重破坏, 甚至失效倒塌, 带来大量的

收稿日期: 2023-05-22; 修回日期: 2023-06-16

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本业务费专项资助项目(2020EEVL0417)

作者简介: 陈亚磊(1997—), 男, 河南周口人, 合肥工业大学硕士生;

陈道政(1964—), 男, 安徽合肥人, 博士, 合肥工业大学教授, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: cdztai@163.com.

人员伤亡和经济损失,因而结构的消能减震技术愈发受到人们的重视。多遇地震作用下金属阻尼器能为主体结构提供附加刚度,在设防地震或罕遇地震作用下屈服耗能。金属阻尼器在提供刚度的同时会增加输入结构的地震作用,进而增加主体结构的承载力需求。黏滞阻尼器(viscous damper, VD)在地震作用下不提供刚度,仅为主体结构提供附加阻尼。采用金属阻尼器与 VD 混合消能减震技术^[1],其结构刚度提高、周期变短,同时能提供一定的附加阻尼,可以充分发挥 2 种阻尼器的特性,更好地达到预期的减震效果。

1 阻尼器的工作原理

1.1 金属阻尼器的工作原理

金属阻尼器主要由各种金属材料(如软钢、低屈服点钢和铅以及形状记忆合金 SMA 等)制造而成,其耗能减震原理是将阻尼器与主体结构连接的支座视为刚性域,使阻尼器只存在剪切变形^[2]。在小震作用下,金属阻尼器处于弹性工作阶段,主要为结构提供附加刚度。在大震作用下,金属阻尼器会在主体结构发生塑性变形前先一步屈服,而后进入弹塑性工作阶段,通过滞回变形去消耗地震动输入的能量。

1.2 黏滞阻尼器的工作原理

黏滞阻尼器一般由油缸、阻尼孔、活塞、活塞杆等部分组成,油缸内安装有活塞和活塞杆,并且充满流体阻尼材料^[3]。当外部由于地震或其他因素引起其振动后,引起活塞运动,从而使活塞两侧的压力发生改变,油缸中的液体阻尼材料在产生的压力差作用下也发生了运动,在其通过阻尼孔或阻尼间隙时产生了阻尼力,阻碍振动对结构的影响,从而达到耗能的目的。

2 工程概况及布置方案

2.1 工程概况

以某服务中心新建办公楼 7 层混凝土框架结构为例,该办公楼每层层高为 3.6 m,总高度为 25.2 m。该工程抗震设防烈度为 8 度(0.2g),抗震等级为二级,设计地震分组为第 1 组,场地类别为 II 类,场地特征周期为 0.45 s。其中底层柱、2~5 层柱、6~7 层柱截面尺寸(宽×高)分别为 600 mm×600 mm、500 mm×500 mm、400 mm×400 mm,主梁尺寸为 300 mm×600 mm,次梁尺寸为 250 mm×500 mm 及 200 mm×500 mm。楼板厚度为 120 mm,采用 C35 混凝土。为使阻尼器加装最小程度影响原结构的空间使用,以及采用“均匀、分散、对称”原则,金属阻尼器和 VD 设计均采用墙式连接安装在新建钢筋混凝土墙体内部,新建钢筋混凝土墙体长度设计值为 1.5 m,厚度为 0.2 m,高度同层高,具体如图 1 所示。

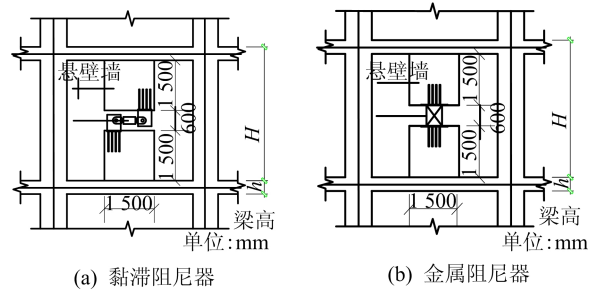


图 1 2 种阻尼器的墙式连接方式示意图

2.2 布置方案

阻尼器标准层平面布置图如图 2 所示。结构减震耗能效果与阻尼器布置位置有关,需将阻尼器布置在层间位移较大及楼层加速度较大的部位。

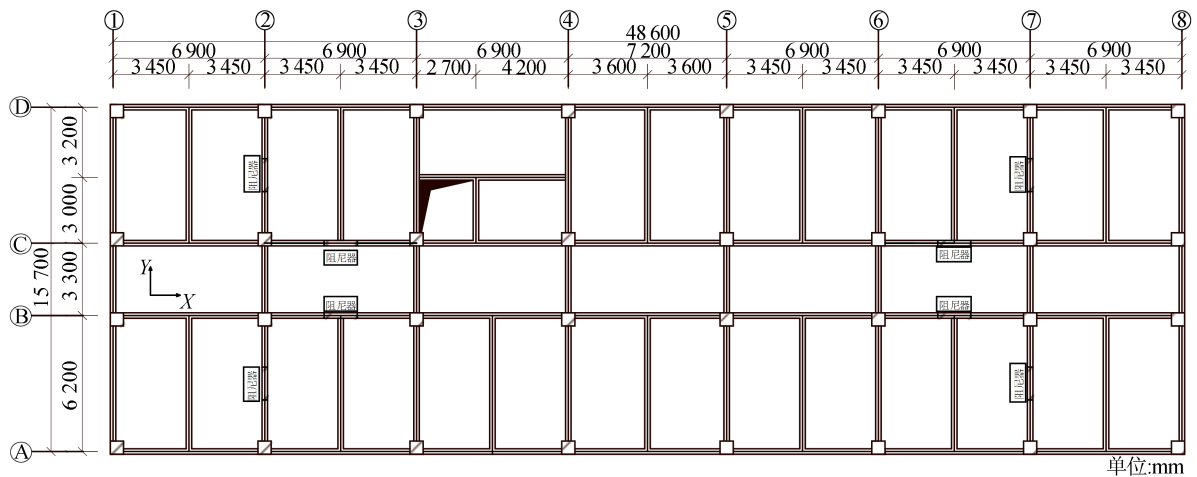


图 2 结构标准层平面

对原结构进行反应谱分析发现,结构在底层及顶层的层间位移较小,2层和6层层间位移角较大且楼层越高楼层加速度反应越明显。考虑建筑物房间用途,不影响其建筑功能,本工程消能减震器的布置原则如下:拟在2~6层的每层X方向分别在B、C轴上的②~③轴之间及⑥~⑦轴之间布置,Y方向分别在②轴、⑦轴上的A~B轴之间及C~D轴之间布置,其中混合布置时,采用2层和6层布置金属阻尼器,3~5层布置VD。当采用墙式连接时,位移型阻尼器可优先布置在靠近柱边位置,速度型阻尼器可优先布置在跨中位置,最终得到阻尼器的标准层平面布置情况。现拟采用原结构、单独布置VD和金属阻尼器与VD混合布置3种不同方案进行加固设计。

3 有限元模型的建立与分析

3.1 阻尼器的模拟

本文对金属阻尼器采用 Bouc-Wen 模型,模型中对金属阻尼器的模拟采用 Plastic(Wen)单元,根据原结构的层间位移角和位移比,综合考虑建筑布置条件及加工采购方便,本工程所使用金属阻尼器的屈服荷载为 400 kN。屈服后刚度比取为 0.02;黏滞阻尼器采用 Maxwell 模型,弹性刚度和线性阻尼均取为 0,阻尼指数取为 0.3,阻尼系数取为 $50 \text{ kN}/(\text{mm}/\text{s})^{0.3}$ 。其中 Maxwell 模型是由 1 个阻尼器单元与 1 个线性弹簧单元串联而成。假设阻尼器与线性弹簧单元的位移分别为 u_c 及 u_k ,其力学计算公式为:

$$u = u_c + u_k \quad (1)$$

$$f_d = ku_k = cV_c^\alpha \quad (2)$$

其中: f_d 为阻尼器产生的抵抗力; k 为弹簧常数; c 为阻尼系数; α 为速度指数; V_c 为阻尼器变形速度。

而 Bouc-Wen 模型的方程为:

$$P(x, z) = \gamma ku + (1 - \gamma)kz,$$

$$z = Ax - \alpha |\dot{x}| z |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n \quad (3)$$

其中: x 为结构位移; \dot{x} 为结构的速度; \ddot{x} 为结构的加速度; u 为外界激励; z 为滞回非线性恢复力; A 、 n 、 α 、 β 为滞回常数。

3.2 地震波的选择及模型的建立

采用时程分析法时,应按建筑场地类别和设计地震分组选用实际强震记录和人工模拟的加速度时程曲线,其中实际强震记录的数量不应少于总数的 2/3。因此拟采用 ElCentro 天然地震波、TangShanSN 天然地震波以及上海人工波作为地震波能量输入,3 条地震波原加速度峰值分别为

341.70、55.49、35.00 cm/s^2 ,需调整比例系数来控制时程函数整个时间范围内的函数值大小,以满足抗震规范所规定加速度有效峰值的要求。为对比金属阻尼器与 VD 混合布置的减震效果,拟根据条件建立 3 种方案模型进行加固设计。方案 1 为原结构框架模型,方案 2 为增设 VD 后的框架模型,方案 3 为增设金属阻尼器与 VD 混合布置后的框架模型。

有限元模型通过 ETABS 软件建立,采用线单元定义框架梁、柱,采用壳薄壳单元定义楼板并忽略横向剪切,并赋予结构荷载及各种分析下的工况^[4],结构模型如图 3 所示。

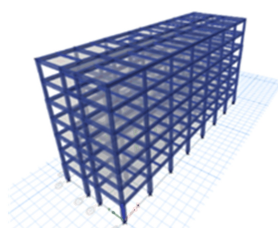


图 3 结构模型

3.3 反应谱分析

ETABS 软件对于反应谱分析方法,给出多种组合方法,为更接近于实际工程情况且考虑阻尼引起的振型间的静态耦合效应,本文采用以随机振动理论为基础的完全平方根组合法^[4]。3 个加固方案下反应谱分析下的层间位移角如图 4 所示。

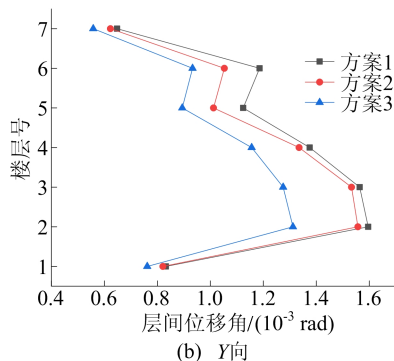
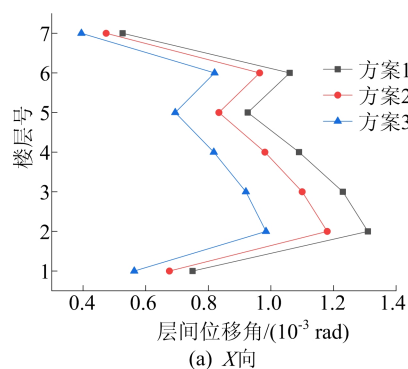


图 4 反应谱下 3 种方案的层间位移角

由图 4 可知:反应谱分析下,根据原结构的设计形式由于自身 Y 向的刚度要远小于 X 向,以及在第 2 层、第 6 层位置柱截面尺寸发生变化,3 个模型在 Y 向的层间位移角普遍都比 X 向的大,且在第 2 层、第 6 层层间位移角产生突变;同时,方案 2 及方案 3 的层间位移角比方案 1 均有所降低,可以看出 VD 在反应谱分析的减震效果,但明显方案 3 降低的幅度更大,减缓位移反应效果更明显,其中最大层位移角由 1/748 降低为 1/930,减震效果明显。

3.4 多遇地震作用下性能分析

通过有限元分析软件 ETABS 对结构模型进行弹塑性时程分析,可以在多遇地震下准确地分析主结构的变形特性的弹性和阻尼特性。为突出金属阻尼器与 VD 在多遇地震影响下的减震效果,对结构进行单向地震输入作用下纯框架结构、只增设有 VD 以及金属阻尼器与 VD 混合布置结构的最大位移角、加速度对比,得到 3 种方案在不同波形、峰值地震波下的最大加速度 a_{max} 及其平均降幅、最大位移等信息见表 1 所列。

由表 1 可知:只布置 VD 及 VD 与金属阻尼器混合布置的结构,其最大加速度及最大位移均得到有效控制,结构 Y 向最大加速度略大于 X 向,最大位移变化均低于国家规范^[5]的层间位移角限值(1/550),特别在 TangshanSN 波下方案 3 最大位移从方案 1 的 32.12 mm 降至 21.23 mm,控制结构位移反应的效果显著;同时方案 2 最大

加速度平均降幅在 7.00%~9.02%之间,方案 3 最大加速度平均降幅在 17.05%~29.92%之间,相比之下,VD 与金属阻尼器混合减震降速效果更为理想。

表 1 结构在各地震波下的加速度、位移响应

| 地震波 | 方案 | $a_{max}/(m/s^2)$ | | 平均降幅/% | 最大位移/mm |
|--------------|----|-------------------|------|--------|---------|
| | | X 向 | Y 向 | | |
| El Centro 波 | 1 | 0.43 | 0.59 | | 17.60 |
| | 2 | 0.43 | 0.54 | 9.02 | 16.72 |
| | 3 | 0.39 | 0.49 | 17.05 | 13.42 |
| TangshanSN 波 | 1 | 0.72 | 0.82 | | 32.12 |
| | 2 | 0.68 | 0.77 | 7.00 | 30.03 |
| | 3 | 0.52 | 0.64 | 26.73 | 21.23 |
| 上海人工波 | 1 | 0.84 | 0.97 | | 30.03 |
| | 2 | 0.78 | 0.92 | 7.38 | 29.04 |
| | 3 | 0.60 | 0.72 | 29.92 | 24.53 |

多遇地震的情况下,VD 及 VD 和金属阻尼器混合作用的位移、相对运动速度均较小,其中混合布置结构中的金属阻尼器在小震情况下还处于弹性状态,没有能充分发挥其最大限度的减震效果,VD 表现较好,但是相同地震作用条件下 VD 和金属阻尼器混合布置的结构的减震效果更为可观,能更有效地降低楼层加速度和位移^[5]。

3.5 罕遇地震作用下时程分析

3.5.1 地震波作用下的位移响应

输入 3 种不同波形并调整峰值加速度的地震波作为激励后,结构的层间位移角变化趋势如图 5 所示。

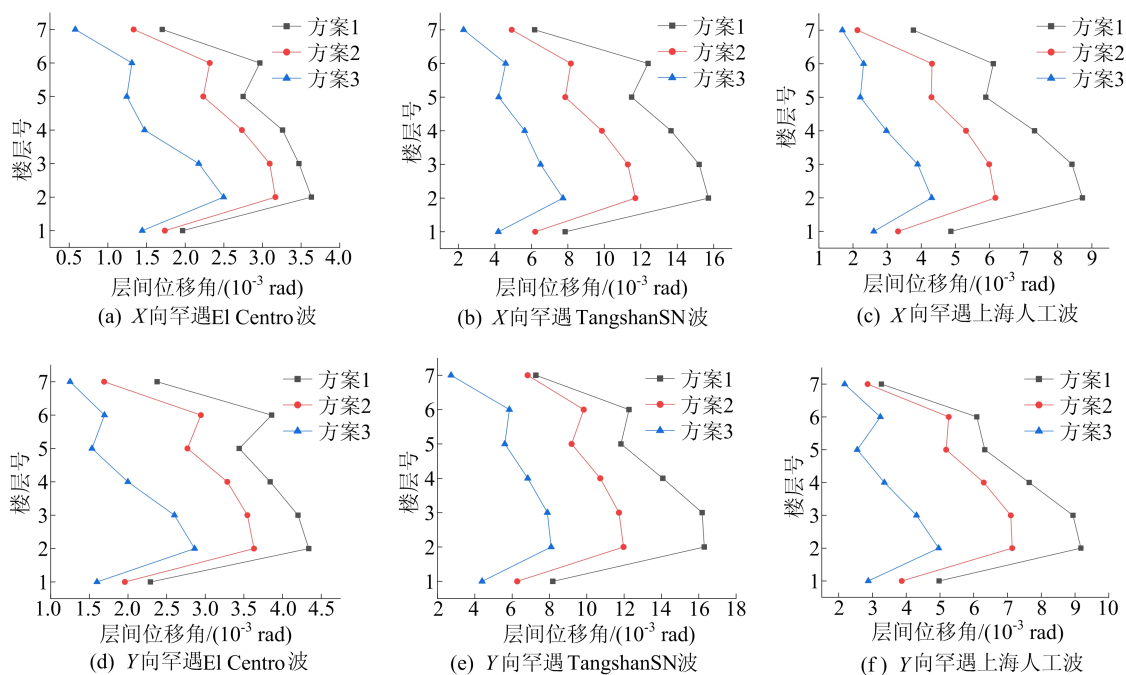


图 5 罕遇地震波下各方案的层间位移角

从图 5 可以看出:在罕遇地震下方案 2、方案 3 均能控制改善框架结构的位移响应,相较而言,采用 VD 和金属阻尼器混合消能的结构在大震中的减震效果更佳;在各地震波下,最大层间位移角仍出现在第 2 层,也即柱变截面刚度变化处。结构总位移及最大层间位移角见表 2 所列。

表 2 各方案下最大层间位移角、总位移

| 地震波 | 方案 | 最大层间位移角 | | 总位移/mm | |
|--------------|----|---------|-------|--------|--------|
| | | X 向 | Y 向 | X 向 | Y 向 |
| El Centro 波 | 1 | 1/254 | 1/214 | 77.88 | 95.59 |
| | 2 | 1/297 | 1/249 | 63.69 | 78.43 |
| | 3 | 1/369 | 1/325 | 43.23 | 52.58 |
| TangShanSN 波 | 1 | 1/59 | 1/55 | 312.62 | 351.78 |
| | 2 | 1/81 | 1/76 | 236.72 | 249.15 |
| | 3 | 1/126 | 1/112 | 140.58 | 164.01 |
| 上海人工波 | 1 | 1/102 | 1/98 | 168.74 | 184.03 |
| | 2 | 1/151 | 1/126 | 120.56 | 148.06 |
| | 3 | 1/206 | 1/184 | 74.36 | 90.75 |

由表 2 可知:方案 1 在 El Centro 波、TangShanSN 波、上海人工波下层间位移角最大值分别为 1/214、1/55、1/98,尤其在 TangShanSN 波下接近于罕遇地震下弹塑性层间位移角的国家规范限值(1/50)^[5],结构抗震安全储备不是十分充足;但在设 VD 后结构最大层间位移角在各地震波下分别降至 1/249、1/76、1/126,分别为原结构最大层间位移角的 85.9%、72.4%、77.8%,而同时增加 VD 和金属阻尼器后结构的最大层间位移角在各地震波下分别降至 1/325、1/112、1/184,分别为原结构最大层间位移角的 65.8%、49.1%、53.2%。由此可见同时布置 VD 和金属阻尼器的结构在大震下控制薄弱层变形方面效果突出,最大可以实现 55%左右的层间位移角降幅。

由图 5、表 2 可知,加 VD 加固后各楼层层间位移角比原结构降幅在 14%~35%之间,在 3 种地震波作用下总位移分别为 78.43、249.15、148.06 mm,为方案 1 总位移的 82.0%、70.8%、80.5%;同时增加 VD 和金属阻尼器后各层间位

移角比原结构降幅在 26.0%~64.0%,在 3 种地震波下总位移分别为 52.58、164.01、90.75 mm,为方案 1 总位移的 55.0%、46.6%、49.3%。从整体层间位移变化趋势可以看出,大震时混合减震结构在其他层位移的控制改善上也有显著效果,在不同峰值及波形的地震波下可基本达到 52.0%左右的位移控制效果。

3.5.2 加速度及层间剪力响应

3 种方案在罕遇地震下的最大加速度 a_{max} 及基底剪力 F_s 见表 3 所列。与多遇地震下的加速度反应相同,在大震的情况下最大加速度仍出现在 7 层^[6]。

表 3 各方案最大加速度与基底剪力

| 地震波 | 方案 | $a_{max}/(m/s^2)$ | | a_{max} 降幅/% | | F_s/kN | F_s 降幅/% |
|--------------|----|-------------------|------|----------------|------|----------|------------|
| | | X 向 | Y 向 | X 向 | Y 向 | | |
| El Centro 波 | 1 | 3.04 | 3.97 | | | 9 175 | |
| | 2 | 2.30 | 3.02 | 24.5 | 23.8 | 7 027 | 23.4 |
| | 3 | 2.06 | 2.42 | 31.8 | 39.1 | 5 990 | 34.7 |
| TangShanSN 波 | 1 | 8.25 | 9.98 | | | 33 673 | |
| | 2 | 6.68 | 8.32 | 19.1 | 19.0 | 24 512 | 27.2 |
| | 3 | 5.07 | 6.45 | 38.5 | 37.3 | 16 552 | 50.8 |
| 上海人工波 | 1 | 5.75 | 6.27 | | | 19 085 | |
| | 2 | 4.17 | 5.17 | 27.5 | 17.4 | 14 264 | 25.3 |
| | 3 | 3.00 | 3.72 | 48.6 | 40.7 | 10 743 | 43.7 |

由表 3 可知,方案 2、方案 3 均有效降低楼层加速度以及基底剪力,很好地发挥了 VD 以及金属阻尼器的耗能减震作用。方案 3 中的最大加速度要远小于方案 2 和方案 1,在不同波形、峰值的地震波下方案 3 相对于原结构最大加速度减少了 31.8%~48.6%,方案 2 相对于原结构减少了 17.4%~27.5%,说明在大震中 VD 和金属阻尼器共同作用更能有效降低混凝土框架结构的加速度响应^[7],吸收耗散更多的地震能量;单独增加 VD 后的结构,其基底剪力比原结构下降 23.4%~27.2%,而增加 VD 和金属阻尼器共同作用后结构基底剪力降幅能达 34.7%~50.8%。

3 种地震波下层间剪力变化如图 6 所示。

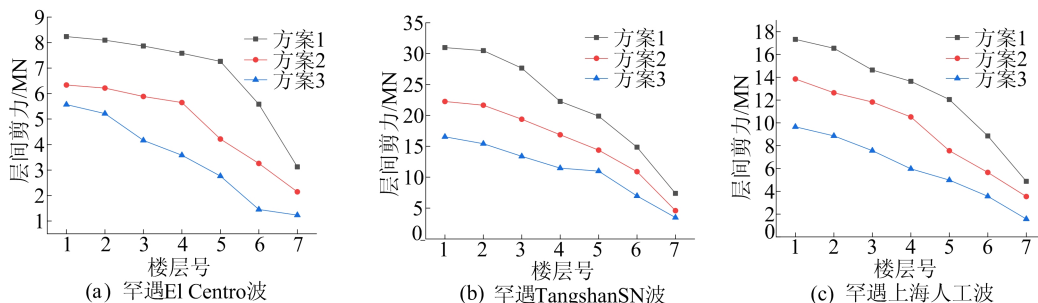


图 6 3 条地震波下的层间剪力

由图 6 可知,3 种方案按层间剪力由大到小排序依次为方案 1、方案 2、方案 3。在同样的地震波下采用联合布置 VD 和金属阻尼器的结构,可以吸收耗散更多输入结构的能量,从而保护框架柱等主要构件,大大降低柱的剪力,达到大震不倒及强柱弱梁的目的^[8]。

3.5.3 地震能量耗散和滞回曲线

金属阻尼器和 VD 罕遇地震下的滞回曲线如图 7 所示。

由图 7a 可知,金属阻尼器在罕遇地震下滞回曲线饱满,充分发挥了滞回耗能作用。由图 7b 可知,VD 在罕遇地震下已完全屈服,滞回曲线饱满,承载力 192 kN,对应的最大变形为 21.8 mm。可见在罕遇地震下 VD 也发挥了良好的耗能作用。

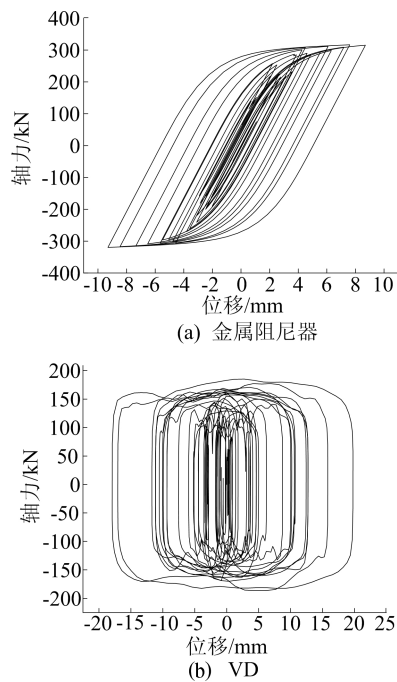


图 7 罕遇地震下滞回曲线

不同的阻尼器在不同水准地震作用下结构的耗能情况如图 8 所示。

从图 8 可以看出:阻尼器在多遇和罕遇地震下耗能占比分别为 68.2% 和 49.4%,这是由于在大变形下 VD 的耗能效率会逐步降低;而金属阻尼器在多遇地震下几乎不承担耗能作用,耗能占比仅为 1.2%,但其在罕遇地震下充分滞回,承担 14.8% 的相对耗能占比。可见随地震作用的增强,金属阻尼器耗能占比逐渐增加,可弥补 VD 在大变形下耗能逐渐减小的趋势,有效提升结构在罕遇地震下的抗震效果^[9]。

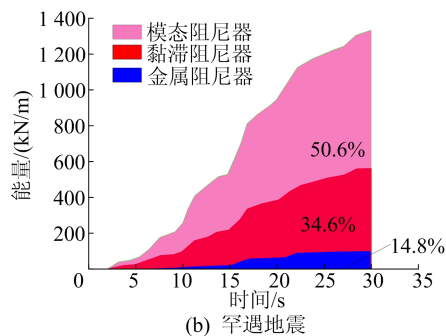
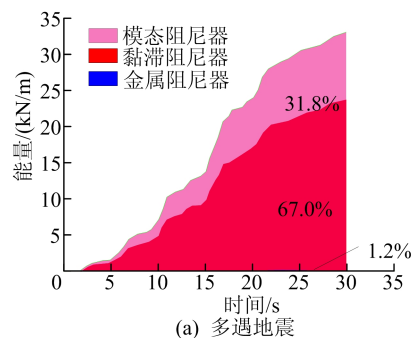


图 8 多遇和罕遇地震下的耗能

4 结 论

通过采用 ETABS 软件分析可以发现,在解决现有混凝土框架结构的需求问题上,采用 VD 和金属阻尼器进行混合减震加固,能发挥良好的减震效果。

1) 由反应谱分析可知,在方案 2 和方案 3 混合加固后结构整体刚度增加,地震作用减小,层间位移角和层剪力都有明显的减小。

2) 在混合布置 VD 与金属阻尼器时,可以在多遇地震下,VD 进行耗能,金属阻尼器提供结构刚度;在罕遇地震下,金属阻尼器提供刚度的同时充分屈服与 VD 协同耗能,从而达到分阶段耗能联合减震的目的。

3) 在多遇地震下的能量图中可以明显看出,黏滞阻尼器对整个地震耗能的占比为 67.0%,但在罕遇地震下耗能占比为 34.6%,可以看出单独布置 VD 的结构还略显不足,相较而言,采用 VD 和金属阻尼器混合布置的结构分别为 68.2% 和 49.4%,表现出更好的减震效果。

[参 考 文 献]

- [1] 朱晓莹,吴浩,周颖. 附加黏弹性阻尼与金属阻尼耗能的自复位墙结构抗震性能对比分析[J]. 地震工程学报, 2022, 44(6):1317-1324.
- [2] 卜海峰,蒋欢军,和留生. 剪切型金属阻尼器恢复力模型研

- 究[J]. 工程力学, 2022, 39(10): 131-139.
- [3] 王鑫, 李慧峰, 都来盼. 基于设置黏滞阻尼器的钢筋混凝土框架结构耗能减震分析[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(21): 7-9.
- [4] 胡尚韬, 李新, 杨孟刚, 等. 黏滞软钢阻尼器组合系统的协同减震性能研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(4): 51-60.
- [5] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [6] 王扬帆, 陈道政. VDW 在框架结构中的减震性能分析及工程应用[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(2): 259-266.
- [7] 周长东, 李亚鹏, 阿斯哈, 等. 多维地震作用下大型摄影棚混合结构减震控制[J]. 北京交通大学学报, 2022, 46(1): 123-131.
- [8] 叶丽影, 刘云华, 戴国强. 高烈度区医疗类建筑的消能减震技术应用研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(6): 100-105, 130.
- [9] 邹胜利, 王红群, 唐旭阳, 等. 渭南市中心西片区档案馆混合减震设计分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(11): 105-110.

(责任编辑 吴亮)

(上接第 1078 页)

[参 考 文 献]

- [1] OLDROYD G E D, LEYSER O. A plant's diet, surviving in a variable nutrient environment[J]. *Science*, 2020, 368(6486): ea-ba0196.
- [2] DADASHI-SILAB S, LORANDI F, DITUCCI M J, et al. Conjugated cross-linked phenothiazines as green or red light heterogeneous photocatalysts for copper-catalyzed atom transfer radical polymerization [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2021, 143(25): 9630-9638.
- [3] YANG H, LU Z, FU X, et al. Visible light-triggered PET-RAFT polymerization by heterogeneous 2D porphyrin-based COF photocatalyst under aqueous condition[J]. *European Polymer Journal*, 2022, 173: 111306.
- [4] QIAO L, ZHOU M, SHI G, et al. Ultrafast visible-light-induced ATRP in aqueous media with carbon quantum dots as the catalyst and its application for 3D printing[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2022, 144(22): 9817-9826.
- [5] HE J, WANG Y, YUAN J, et al. Ferrocene-integrated conjugated microporous polymer nanosheets: active and regenerative catalysts for photomediated controlled radical polymerization [J]. *Applied Materials Today*, 2020, 18: 100507.
- [6] LU Z, YANG H, FU X, et al. Fully- π conjugated covalent organic frameworks as catalyst for photo-induced atom transfer radical polymerization with ppm-level copper concentration under LED irradiation [J]. *European Polymer Journal*, 2021, 157: 110670.
- [7] ZHANG Y, CHEN D, GUO Z, et al. Visible-light-induced controlled radical polymerization of methacrylates mediated by zirconium-porphyrinic metal-organic frameworks [J]. *New Journal of Chemistry*, 2020, 44(14): 5235-5242.
- [8] JIANG J, YE G, LORANDI F, et al. Localized surface plasmon resonance meets controlled/living radical polymerization: an adaptable strategy for broadband light-regulated macromolecular synthesis[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2019, 58(35): 12096-12101.
- [9] WOO S W, KIM J Y, HWANG T G, et al. Effect of weakly coordinating anions on photo-stability enhancement of basic dyes in organic solvents[J]. *Dyes and Pigments*, 2019, 160: 765-771.
- [10] LIU B, FANG Y, LI Z, et al. Visible-light nanostructured photocatalysts—a review [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2015, 15(2): 889-920.
- [11] TRUNG N N, LUU Q P, SON B T, et al. Preparation and characterization of silicone resin nanocomposite containing CdSe/ZnS quantum dots [J]. *Polymer Composites*, 2012, 33(10): 1785-1791.
- [12] THERIOT J C, LIM C H, YANG H, et al. Organocatalyzed atom transfer radical polymerization driven by visible light [J]. *Science*, 2016, 352(6289): 1082-1086.
- [13] SZCZEPANIAK G, TAGODZIŃSKA M, DADASHI-SILAB S, et al. Fully oxygen-tolerant atom transfer radical polymerization triggered by sodium pyruvate [J]. *Chemical Science*, 2020, 11(33): 8809-8816.
- [14] CHEN M, ZHONG M, JOHNSON J A, et al. Light-controlled radical polymerization: mechanisms, methods, and applications [J]. *Chemical Reviews*, 2016, 116(17): 10167-10211.
- [15] LI B, GONG R, WANG W, et al. A new strategy to microporous polymers: knitting rigid aromatic building blocks by external cross-linker [J]. *Macromolecules*, 2011, 44(8): 2410-2414.
- [16] JIANG X, LIU Y, LIU J, et al. Hypercrosslinked conjugated microporous polymers for carbon capture and energy storage [J]. *New Journal of Chemistry*, 2017, 41(10): 3915-3919.
- [17] 方华, 章婷婷, 王韬葶, 等. 水中氧化石墨烯稳定性研究 [J]. *化工新型材料*, 2019, 47(2): 157-161.
- [18] DADASHI-SILAB S, LEE I H, ANASTASAKI A, et al. Investigating temporal control in photoinduced atom transfer radical polymerization [J]. *Macromolecules*, 2020, 53(13): 5280-5288.

(责任编辑 吴亮)