

DOI: 10.7672/sgjs2025200095

磁流变阻尼器在某住宅项目中的应用研究^{*}

栾海涛¹, 闻陈宝², 俞果¹, 凌研方¹, 侯彦果², 朱博莉³

(1. 北京城建集团有限责任公司, 北京 100088; 2. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 3. 北京科技大学未来城市学院, 北京 100083)

[摘要] 阻尼器是一种重要的结构减震技术, 可为结构提供附加阻尼, 消耗输入的地震能量, 实现减震目标, 具有独特优势和广阔应用前景。黏滞阻尼器因结构简单、性能稳定而被广泛应用于多个领域; 磁流变阻尼器则在汽车、机械和航空领域有广泛应用, 在建筑与桥梁工程中应用仍相对较少。总结黏滞阻尼器和磁流变阻尼器的发展历程及其应用现状, 对阻尼器及带有阻尼器的框架结构进行精确的有限元模拟, 结合北京市某更新改造项目中磁流变阻尼器应用案例, 对其减震效果进行研究。提出 5 种不同阻尼器布置方案, 通过改变该住宅项目中的阻尼器布置进行对比分析, 给出阻尼器在框架结构中的优化布置建议。

[关键词] 住宅; 更新改造; 阻尼器; 框架结构; 减震; 有限元分析; 布置; 优化

[中图分类号] TU352

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)20-0095-09

Application Research of Magnetorheological Damper in a Residential Project

LUAN Haitao¹, WEN Chenbao², YU Guo¹, LING Yanfang¹, HOU Yanguo², ZHU Boli³

(1. Beijing Urban Construction Group Co., Ltd., Beijing 100088, China;

2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. School of Future Cities, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Damper is an important structural damping technology, which can provide additional damping for the structure, consume the input seismic energy, and achieve the damping target. It has unique advantages and broad application prospects. Viscous dampers are widely used in many fields because of their simple structure and stable performance. Magnetorheological dampers are widely used in the fields of automobile, machinery and aviation, but are still relatively rare in construction and bridge engineering. The development history and application status of viscous dampers and magnetorheological dampers are summarized. The accurate finite element simulation of dampers and frame structures with dampers is carried out. Combined with the application case of magnetorheological dampers in a renovation project in Beijing, the damping effect is studied. Five different damper layout schemes are proposed, and the damper layout changes in the residential project are compared and analyzed, and the optimal layout of the damper in the frame structure is given.

Keywords: residential; renovation; dampers; frame structure; damping; finite element analysis; layout; optimization

0 引言

地震作用是一种运动极其不规则的随机过程, 会造成房屋破坏与人员伤亡。为保证地震作用下结构不发生严重的破坏和倒塌, 通常需对结构进行

振动控制。结构振动控制技术按是否需外部能量输入可分为被动控制、主动控制、混合控制和半主动控制^[1-2]。被动控制无需输入外部能源, 一般利用结构构件自身的响应生成被动控制力, 概念清晰, 构造简单, 造价低廉, 经济可靠, 是目前应用最广泛、研究最成熟的减隔震措施。主动控制是实时测量被控结构响应或环境干扰, 根据反馈利用控制

^{*} 国家自然科学基金(52378164)

[作者简介] 栾海涛, 高级工程师, E-mail: 2353916282@qq.com

[收稿日期] 2025-07-06

算法实时施加外部能源操纵作动器对结构施加主动控制力。主动控制的方式依赖于较大外部能源,控制过程复杂,价格高昂。半主动控制通过反馈被控结构的响应,实时调节半主动控制装置动力特性,再将控制激励反作用于被控结构达到减震目的。半主动控制既有被动控制的可靠性和经济性,又可利用很少的外部能源获得接近于主动控制的效果。混合控制通过组合不同控制方法或控制装置,充分发挥各控制系统优点。

黏滞阻尼器是一种典型的被动控制装置^[3]。当结构发生振动时,黏滞阻尼器两端活塞的运动推动阻尼液而产生阻尼力,构造简单、性能稳定、制作成本低,在机械、航空和建筑等领域中应用广泛。磁流变阻尼器属于新型的半主动控制装置。与黏滞阻尼器类似,磁流变阻尼器也同样利用活塞运动产生阻尼力,但其通过改变线圈电流调节磁场强度从而实时控制流体性质,进而调整输出的阻尼力。黏滞阻尼器简单可靠,适合结构长期稳定消能减震,而磁流变阻尼器智能可控,响应速度快,适合动态调节需求的减震场景。磁流变阻尼器最初应用于汽车、机械与航空领域,近年来也开始在建筑与桥梁工程中应用。

北京某更新改造项目是北京首个高层钢结构及装配式内装租赁住房项目。为保证钢结构框架减隔震效果,在该更新改造项目中首次采用磁流变阻尼器作为半主动减震装置,共设置 36 个阻尼器以保证其减震效果。然而,目前仍缺乏有关磁流变阻尼器在框架结构中的应用研究,对于磁流变阻尼器的减震效果和最佳布置方案有待探索与研究。

本文总结黏滞阻尼器和磁流变阻尼器发展历程及应用现状,并采用 ABAQUS 有限元分析软件对阻尼器及带阻尼器的框架结构进行精确模拟,分析磁流变阻尼器在框架结构中的减震效果。最后,提出 5 种不同阻尼器布置方案进行优化分析,给出阻尼器在框架结构中的布置建议。

1 黏滞阻尼器与磁流变阻尼器的发展与应用

1.1 黏滞阻尼器

早在 20 世纪 50 年代,美国 Taylor 公司对黏滞阻尼器展开了研究^[4-5],并将其应用于建筑结构中。1970 年,Taylor 公司成功研发了线性黏滞阻尼器并开展试验测试。随后,黏滞阻尼器在多个建筑工程项目中得到了应用^[6]。1984 年,为抵御核攻击,美国北美防空司令部大楼在结构设计中采用了 Taylor 公司生产的黏滞阻尼器。1990 年,美国西雅图西大桥安装了多个输出阻尼力为 1 000~2 500kN 大吨位

黏滞阻尼器。2003 年,墨西哥市长大楼应用了 Taylor 公司生产的黏滞阻尼器,并经受住了墨西哥遭遇的 7.6 级地震。

国内有关黏滞阻尼器的研究开始相对较晚。欧进萍等^[7]设计出一款双出杆油缸孔隙式黏滞阻尼器。该阻尼器解决了单出杆黏滞阻尼器存在的“真空”或“顶死”构造缺陷,并通过统计分析确定了阻尼力计算模型的幂指数参数。叶正强等^[8]成功开发出双出杆型黏滞阻尼器,如图 1 所示。该阻尼器经测试验证,具备出色的耗能性能与工作稳定性。此后,黏滞阻尼器在众多工程项目中逐步得到推广应用。国内多项重点工程均采用了该减震技术^[9-10],如北京工人体育场加固改造、北京火车站加固改造、北京银泰中心主塔楼、北京盘古大观及武汉保利文化广场等项目,均通过黏滞阻尼器显著提升了结构抗震性能。

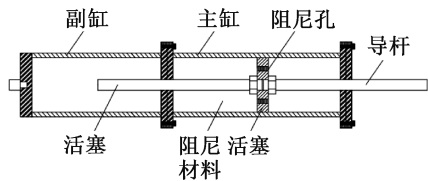


图 1 黏滞阻尼器构造

Fig. 1 Structure of viscous damper

1.2 磁流变阻尼器

磁流变阻尼器作为典型的半主动控制装置,其设计原理是借助磁流变液随磁场变化可实现快速流-固逆变的特性达到减震目的^[11-12]。磁流变液是一种混合流体,由非导磁性载体液、具备高导率和低磁滞性特点的磁性介质微粒及表面活性剂组成。

如图 2a 所示,在施加磁场前,磁流变液呈牛顿体特性,黏度较低,能自由流动,其中的磁性颗粒也处于自由排列状态。而施加磁场后,磁性颗粒会被磁化并相互作用,沿磁场方向相互吸引,在垂直于磁场的方向相互排斥,从而形成沿磁场方向较为规则、类似纤维的链状结构,进而在宏观上转换为横跨极板间的柱状结构,如图 2b 所示。施加磁场后,磁流变液表观黏度大幅增加,可提升 2 个数量级以上,同时呈现出类似固体的力学性质;当撤去外加磁场后,磁流变液恢复为流动性良好的液体。磁流变液特性为:①连续性,其屈服应力能随着磁场强度的变化而连续改变;②可逆性,其会随磁场强度的增加而“变硬”,也会随磁场强度的减小而“变软”;③频响时间短,屈服剪应力随场强正逆向变化所需时间仅在毫秒数量级内;④能耗小,通常只需数十瓦功率的直流电源,即可满足工程应用需求。

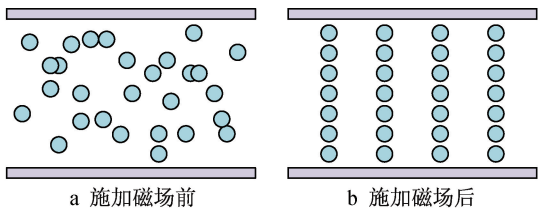


图2 磁性颗粒微观变化示意

Fig. 2 Microscopic changes of magnetic particles

美国 Lord 公司于 1996 年成功研发出全球首个 200kN 磁流变阻尼器^[13]。该阻尼器采用 3 级线圈双出杆剪切阀式结构,如图 3 所示。此后,该公司又推出 SD-1000 型单线圈单出杆剪切阀式磁流变阻尼器^[14]。这 2 种阻尼器具有磁路设计清晰、构造简单、工作原理明确的特点,且制作与安装过程便捷,因而成为磁流变阻尼器的主流设计模式。

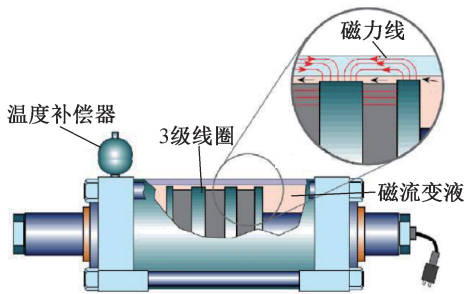


图3 200kN 磁流变阻尼器

Fig. 3 200kN magnetorheological damper

为进一步提升磁流变阻尼器最大输出力,日本开发了旁通阀式磁流变阻尼器^[15],该阻尼器在主缸体旁单独设置了 1 条阻尼通道,有效解决了缸体空间对线圈数量的限制问题,能为阻尼间隙处的磁流变液提供更大磁场,从而增加阻尼器最大输出力,可达 400kN。

随后,众多学者对磁流变阻尼器进行了研究和改进,提出了多种形式磁流变阻尼器。欧进萍等^[16]研发了一种混合式磁流变阻尼器,并开展了相应性能试验。Xu 等^[17]设计制作了 5 级线圈剪切阀式磁流变阻尼器,其最大输出力可达 260kN。瞿伟廉等^[18]通过对阻尼器结构优化,设计制作出最大输出力达 500kN 的磁流变阻尼器。陈政清等^[19]采用永磁铁替代阻尼器中的励磁线圈,通过调节永磁体磁环数量及磁感应强度实现阻尼力调控。Cho 等^[20]利用永磁铁和感应线圈设计了一种自供能式磁流变阻尼器。Yan 等^[21]在磁流变阻尼器内部增设永磁铁,研制出具有失效自保护功能的逆变型磁流变阻尼器:正常工作时由励磁线圈控制,当外部电源失效时,永磁铁自动接管对磁流变液施加磁场,既

提升了阻尼器可靠性,又降低了能耗。Guan 等^[22]设计开发了一种基于滚珠丝杠和旋转永磁直流电机的自供能式磁流变阻尼器,通过集成振动能量收集机构,将外部振动能量转化为电能,为阻尼器运行提供能量支持。

磁流变减震技术经多年理论与试验研究,已具备工程应用可行性,国内外均有成功案例。2001 年,东京新兴科技博物馆首次将其应用于工程,安装 2 个磁流变阻尼器控制结构振动^[23]。同年,中南大学与香港理工大学合作,将美国 Lord 公司的磁流变阻尼器安装于洞庭湖大桥,用于抑制斜拉索风振响应^[24]。日本 Sanwa Teki 公司将最大输出力 400kN 的磁流变阻尼器应用于 Keio 大学某居民楼^[25]。李金海等^[26]、张纪刚等^[27]将磁流变减振系统用于山东滨州黄河大桥,控制风雨激振引发的斜拉索振动;陈政清^[28]将研发的永磁式磁流变阻尼器应用于浏阳河大桥斜拉索风振控制;瞿伟廉等^[29]在武汉天兴洲长江大桥安装 6 个磁流变阻尼器,控制列车运行引起的纵向振动,实测数据显示其有效抑制了主梁纵向位移。

2 阻尼器减震技术在框架结构中的应用

2.1 阻尼器在框架结构中的布置形式

如图 4 所示,阻尼器常设置于框架梁和框架柱间,既可像斜撑一样布置于框架中,也可依托斜撑或墙体形成门架式或墙式连接方式。当框架结构在地震作用下产生层间相对位移时,阻尼器会同步产生轴向变形,这种变形将转化为抵抗力并附加至框架结构,通过消耗地震能量有效减小结构地震响应。

从阻尼器工作机制来看,其输出力与轴向变形呈正相关。当结构自身变形较小时,阻尼器输出力也会相应减小,导致减震效果受限。这是因为研究人员设计了一些增幅机构式连接形式,如图 4d 所示,该构造通过机械放大原理,将阻尼器变形显著放大,从而大幅提升其减震效能,为结构抗震设计提供了更优的技术方案。

在实际工程应用中,阻尼器还可灵活设置于伸臂桁架、框架柱间及梁柱节点处。对于剪切式阻尼器,其布置方式类似连梁,可在剪力墙间承担剪力传递功能。

2.2 阻尼器与框架结构的相互作用

带阻尼器框架的抗侧承载力与阻尼器的布置形式有关。当阻尼器采用斜撑式布置时,框架的抗侧承载力可按图 5 所示方式分解。其中, V_0 为无阻尼器框架的受剪承载力, V_1 为有阻尼器框架的受剪

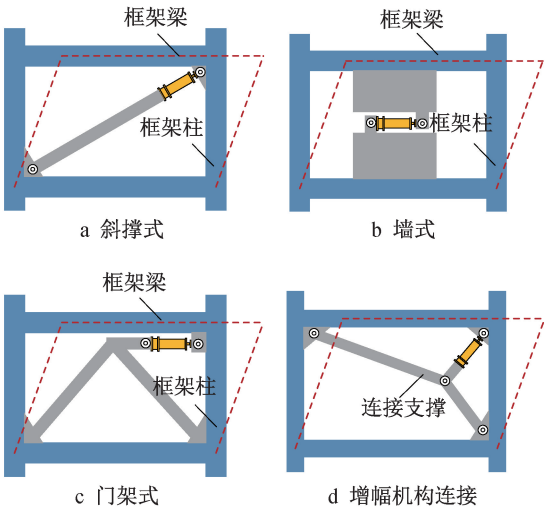


图 4 常见阻尼器在框架结构中的布置形式
Fig. 4 Typical damper configuration patterns in frame structures

承载力, F_d 为阻尼器自身提供的反力, F_{dx} 为 F_d 沿水平方向的分量。

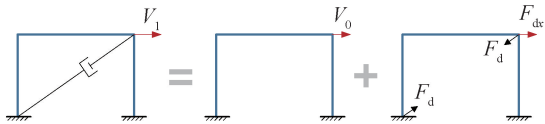


图 5 斜撑式阻尼器与框架的相互作用示意
Fig. 5 Interaction between diagonal brace dampers and frame structure

根据叠加关系, 可得:

$$V_1 = V_0 + F_{dx} \quad (1)$$

$$V_1 = V_0 + \frac{b_f}{\sqrt{b_f^2 + h_f^2}} F_d \quad (2)$$

式中: b_f 为框架梁长度; h_f 为框架柱高度。

当阻尼器在框架中按墙式连接布置时, 带有阻尼器的框架抗侧承载力可按图 6 所示方式分解, 相应的计算公式如式(3), (4)所示。

$$V_1 = V_0 + F_{dx} \quad (3)$$

$$F_{dx} = F_d \quad (4)$$

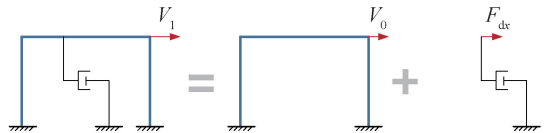


图 6 墙式阻尼器与框架的相互作用示意
Fig. 6 Interaction between wall-mounted dampers and frame structure

2.3 阻尼器有限元模拟方法

为精确分析阻尼器减震效果, 需建立有限元模型对阻尼器减震作用进行模拟。首先以黏滞阻尼器为例, 建立有限元模型进行计算并与理论计算结

果进行对比。

采用通用有限元软件 ABAQUS 对阻尼器进行有限元模拟。有限元模型中建立 2 个参考点(RP1, RP2), 间距假设为 1 000mm。对于参考点 RP1, 完全约束 6 个自由度; 对于 RP2, 释放沿 x 方向的平动位移, 约束其余 5 个自由度。为保证进行动力计算, 在 RP1 位置建立 1 块平钢板, 将其与 RP1 完全耦合连接, 按钢材属性设置其密度和材料属性。采用有限元模型中的 Dashpot 模拟阻尼器, 并利用修改关键词添加非线性属性。黏滞阻尼器的力-速度关系如式(5)所示, 其中, F 为阻尼器输出力, v 为阻尼器两端相对速度; C 为阻尼系数; α 为阻尼指数, 一般为 0.1~1.0。模型采用隐式动力分析步。加载时在 RP2 施加水平位移, 定义位移幅值变化, 实现简谐振动加载。有限元模型如图 7 所示。

$$F = C v^\alpha \quad (5)$$

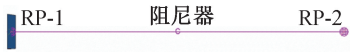


图 7 单个阻尼器有限元模型
Fig. 7 Finite element model for a single damper

有限元计算结果与根据式(5)计算结果对比如图 8 所示, 可见, 有限元计算结果与理论计算结果吻合良好。

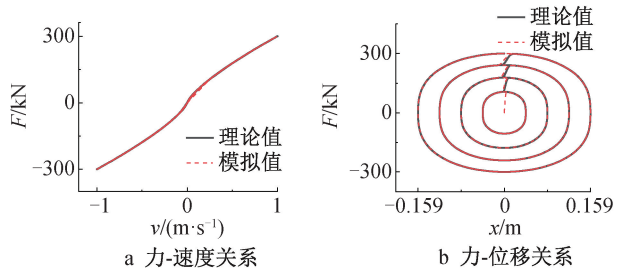


图 8 黏滞阻尼器输出力有限元模拟与理论计算结果对比
Fig. 8 Comparison between finite element simulation and theoretical calculation of viscous damper output force

进一步, 以斜撑式阻尼器为例, 如图 4a 所示, 建立带阻尼器的框架结构有限元模型, 验证阻尼器对框架滞回性能的影响。框架采用 B31 梁单元模拟, 钢材属性采用双折线模型, 弹性模量 $E = 206\text{GPa}$, 屈服强度 $f_y = 235\text{MPa}$, 切线刚度 $E_t = 1\%E$ 。钢材取为随动强化。模型中添加瑞利阻尼, 模拟结构阻尼对结构振动响应的影响, 振型阻尼比取为 0.03。带阻尼器的框架结构有限元分析结果如图 9 所示。图 9c 中实线为带阻尼器的框架结构有限元分析结果, 虚线为根据式(2)的叠加结果。从图中可以看出, 添加阻尼器后, 框架整体滞回能力有一定程度的提

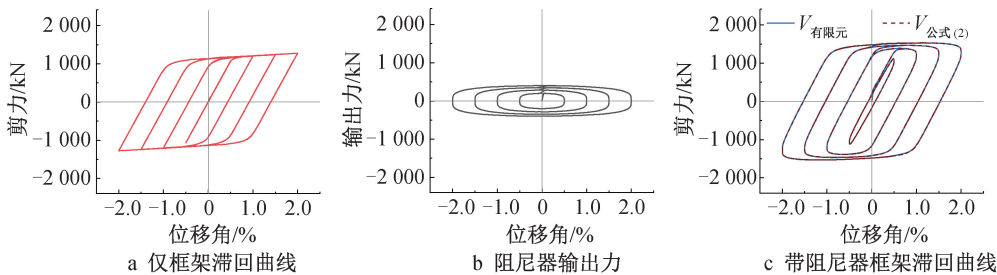


图 9 带阻尼器的框架结构有限元分析结果

Fig. 9 Finite element analysis results of frame structure with dampers

升;有限元计算的滞回曲线与根据式(2)叠加得到的滞回曲线完美重合,验证了式(2)所示相关作用的正确性。

3 磁流变阻尼器在北京某更新改造项目中的应用

3.1 工程概况

北京某更新改造项目采用钢框架结构,并设置磁流变阻尼器进行减震。该楼地下3层,地上6层,建筑高度23.8m,总建筑面积7 134m²,主要层层高3.8m,建筑三维效果如图10所示。钢柱主要采用箱形截面,主要截面规格为□700×700×25。钢梁主要采用H形截面,主要截面规格为H900×300×16×28等,最大跨度约8.25m。主要钢材材质为Q355B。

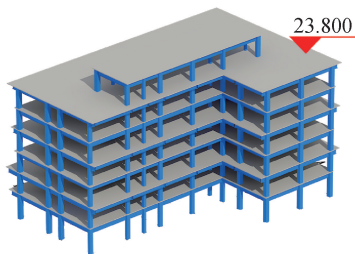


图 10 建筑三维效果

Fig. 10 3D effect of the building

北京抗震设防烈度为8度,基本地震加速度为0.2g,建筑场地类别为Ⅱ类,多遇地震下特征周期为0.4s,设计地震分组为第2组。进行多遇地震作用下的抗震变形验算时,其楼层内最大弹性层间位移角<1/250。

本项目采用MRSTF1规格磁流变阻尼器,设计阻尼力为100~150kN,阻尼系数为100~600kN/(m/s)^α,阻尼指数α为0.1~0.5,行程为20~1 000mm,速度为100~1 000mm/s,被动输出力为50~135kN,主动电流为1~6A,主动输出力增加值为10%~50%,主动输出力为100~200kN。阻尼器采用墙式连接,位置如图11所示,沿高度方向均匀布置,共6层,平面上共6个位置,共36个。

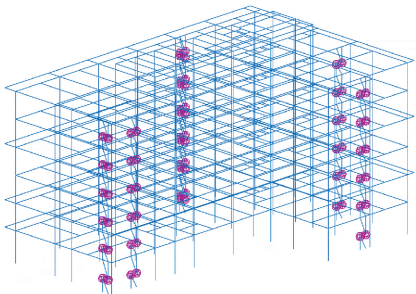


图 11 阻尼器布置示意

Fig. 11 Layout of dampers

3.2 有限元模型

采用ABAQUS有限元分析软件建立该住宅项目2G-2号楼结构有限元模型。其中钢框架采用B31梁单元模拟,钢梁设置形心偏移使主梁与次梁上表面重合。有限元模型中钢材和阻尼器的模拟方法与2.3节一致。进行有限元分析时,约束柱底所有自由度进行自振分析,然后释放柱底部x,y方向变形,施加x,y方向加速度模拟地震作用。由于北京市海淀区特征周期为0.4s,因此选用Kocaeli地震波(1999年土耳其伊兹米特7.6级地震)作为典型示例,研究磁流变阻尼器减震效果。地震波x,y方向加速度曲线如图12所示。以罕遇地震为例进行分析,其中峰值最大加速度为400cm/s²。选取图13中A~D 4个典型位置,分析阻尼器减震效果。

3.3 自振分析

结构自振模态如图14所示。一阶自振模态为长边沿x方向的L形变形,二阶自振模态为整体沿y方向的变形,三阶模态表现为明显的扭转变形。前三阶自振频率分别为3.156,3.255,3.518Hz,自振频率较接近。

3.4 减震效果分析

以图13中B点为例,加速度时程曲线如图15所示(有控模型指有阻尼器的模型,无控模型指无阻尼器的模型),位移时程曲线如图16所示。在一阶自振模态中,B点具有明显的x方向变形,且B点距离x方向的阻尼器较远。因此,阻尼器对于B点

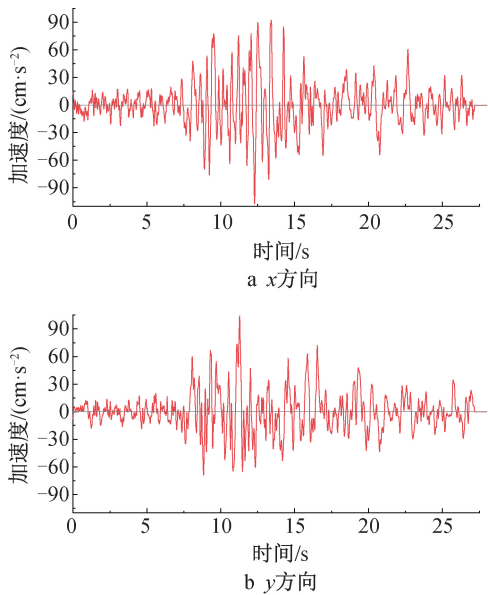


图 12 地震波加速度时程曲线

Fig. 12 Acceleration time-history curves of seismic waves

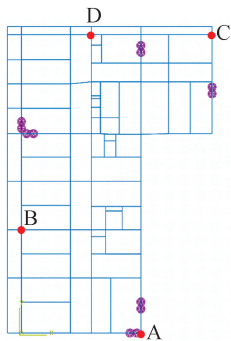


图 13 阻尼器平面布置及典型位置示意

Fig. 13 Plan layout of dampers and typical positions

沿 x 方向的减震效果较弱。在过 B 点平行于 y 轴的线上,有 y 方向的阻尼器,因此阻尼器对于 y 方向的加速度和位移具有较好的减弱作用。

分析 A,C,D 位置减震效果可知,A 点附近框架中有 2 个方向的阻尼器,设置阻尼器后,A 点加速度和位移均显著减小,阻尼器具有明显的减震效果。C 点结构边缘附近有 2 个 y 方向的阻尼器,因此设置了阻尼器后,C 点沿 y 方向的加速度和位移均明

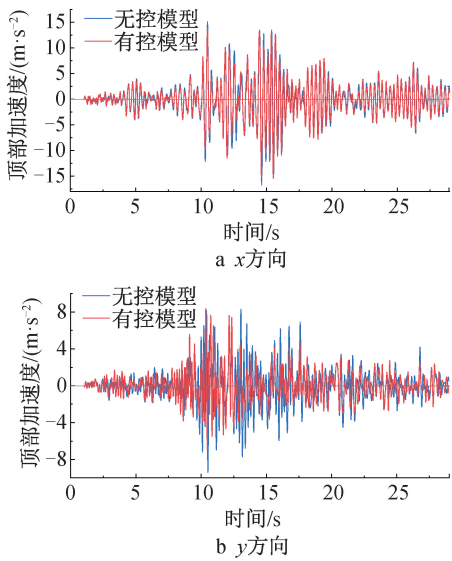


图 15 B 点加速度时程曲线

Fig. 15 Acceleration time-history curves at point B

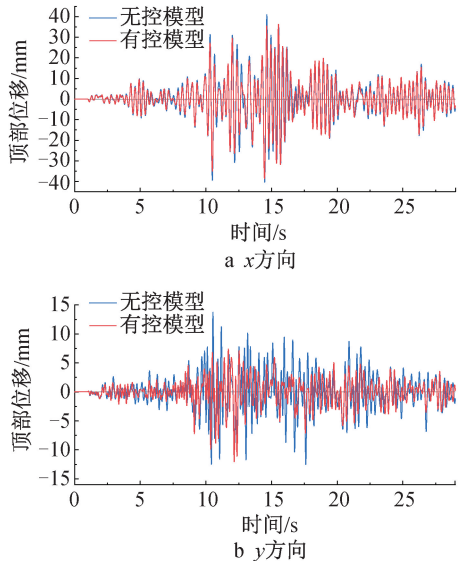


图 16 B 点位移时程曲线

Fig. 16 Displacement time-history curves at point B

显减小,但 x 方向的减震效果较弱。而 D 点所在位置距离 2 个方向的阻尼器均较远,D 点加速度和位移减震效果不明显。

有限元计算结果表明,由于结构平面为 L 形,

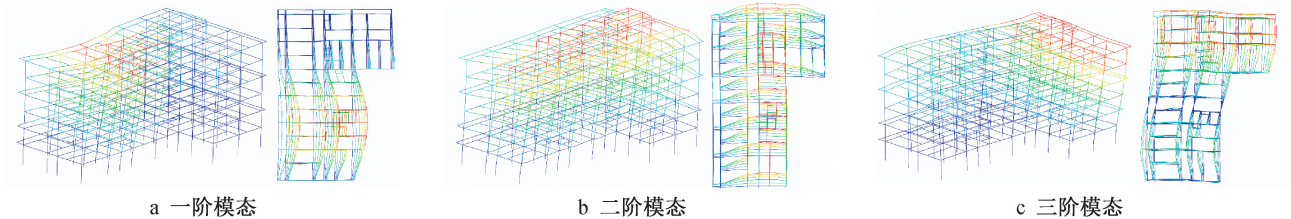


图 14 结构自振模态

Fig. 14 Natural vibration modes of structure

在地震荷载作用下,结构有可能会出现一阶、二阶、三阶模态的耦合,容易表现为整体的扭转变形。

4 磁流变阻尼器在框架结构中的布置优化

4.1 阻尼器布置方案

为更方便地调整磁流变阻尼器位置,采用斜撑式方案设置阻尼器,共采用 5 种布置方案,如图 17 所示。为提高可比性,不同布置方案中阻尼器数量均相同。方案 1 的布置位置与实际结构阻尼器位置相同,但阻尼器均采用斜撑式布置方式。方案 2 调整了阻尼器平面上的布置位置,将阻尼器置于一阶自振模态和二阶自振模态变形较大处。方案 3 将所有阻尼器均布置于底层,方案 4 将所有阻尼器均布置于顶层。方案 5 在 1,3,5 层布置阻尼器,布置位置也集中于一阶自振模态和二阶自振模态的变形较大处。

4.2 减震效果对比与讨论

对 5 种方案中 D 点的最大加速度、水平位移及基底剪力进行对比分析,相关数据如表 1,2 所示。结合第 3 节讨论内容,可得出如下结论:原结构设计阻尼器布置方案与方案 1 的减震效果相对有限,尽管能在一定程度上削减 x 方向的最大基底剪力,但对其他关键指标的改善作用不明显。

方案 2,5 的阻尼器布置策略较科学,其阻尼器大多分布于自振模态变形显著区域,因而减震效果突出,对 x,y 2 个方向的加速度、位移和基底剪力均展现出良好的抑制作用。方案 2 D 点时程曲线如图 18~20 所示。方案 5 采用间隔楼层布置阻尼器的方式,在高度方向上实现了与连续布置相近的减震效果。

方案 3 将全部阻尼器集中设置于底层,虽对加速度和位移具有一定的减震作用,但在减小基底剪

力方面无明显效果,尤其是对 y 方向基底剪力的控制效果欠佳。而方案 4 将所有阻尼器布置于顶层,其减震效果较差。

表 1 不同布置方案计算结果对比

Table 1 Comparison of calculation results among different layout schemes								
指标	方向	无控模型	有控模型					
			原结构	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
加速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	x	11.59	11.77	11.09	8.81	7.14	9.91	9.08
	y	12.93	19.53	14.04	6.67	12.74	11.95	6.49
位移/ mm	x	24.81	25.49	23.76	14.97	13.37	20.50	15.96
	y	29.88	35.44	25.71	13.03	25.46	28.42	14.06
基底剪力/ kN	x	8 384	7 284	6 018	4 906	5435	7 087	4 859
	y	5 455	7 288	5 895	4 646	6 062	6 709	4 767

表 2 不同布置方案减震率对比

Table 2 Comparison of vibration reduction ratios among different layout schemes								%
指标	方向	原结构	有控模型					
			方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	
加速度	x	1.57	-4.29	-23.98	-38.40	-14.47	-21.70	
	y	50.99	8.54	-48.39	-1.51	-7.62	-49.85	
位移	x	2.73	-4.23	-39.65	-46.11	-17.37	-35.66	
	y	18.63	-13.94	-56.40	-14.79	-4.86	-52.93	
基底剪力	x	-13.12	-28.22	-41.48	-35.17	-15.47	-42.05	
	y	33.61	8.07	-14.82	11.13	22.99	-12.62	

5 结语

1)黏滞阻尼器和磁流变阻尼器是有效的减震装置,均为速度型阻尼器,将其应用于高层建筑、体育场馆、桥梁及建筑结构抗震改造等众多领域,可有效提高建筑在地震中的稳定性,减少地震破坏。黏滞阻尼器具有构造简单、性能稳定、成本低廉等优点,磁流变阻尼器则具有凭借其阻尼力可实时调节、响应迅速、能耗低等特性,同样具有良好的应用前景。

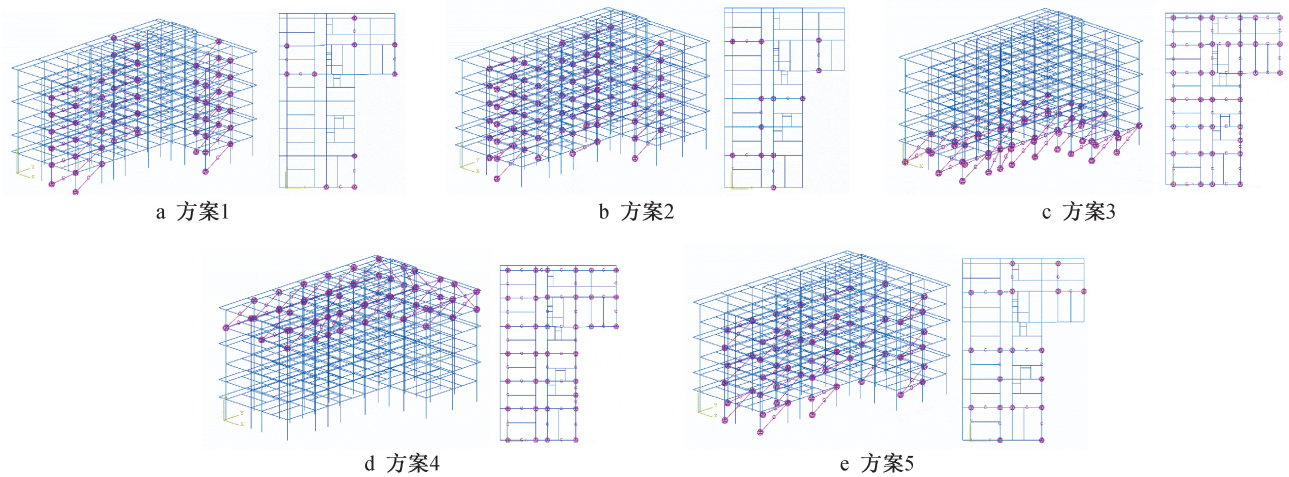


图 17 不同阻尼器布置方案
Fig. 17 Different damper layout schemes

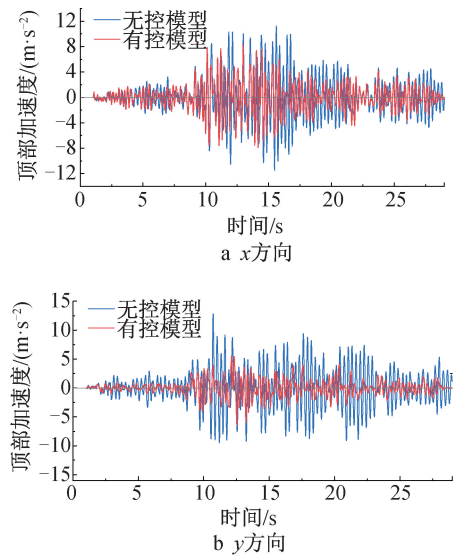


图 18 方案 2 D 点加速度时程曲线

Fig. 18 Acceleration time-history curves at point D for scheme 2

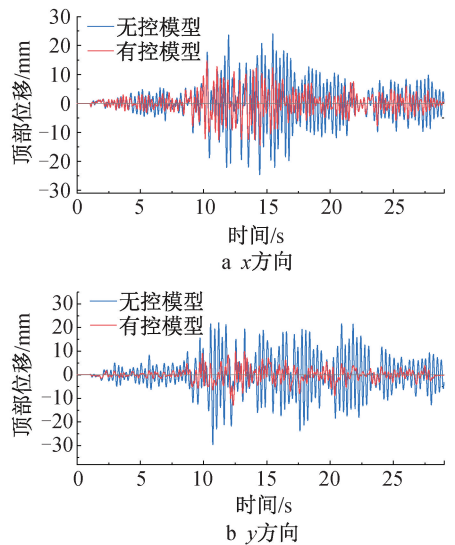


图 19 方案 2 D 点位移时程曲线

Fig. 19 Displacement time-history curves at point D for scheme 2

2)带阻尼器的框架结构整体抗侧承载力由框架自身承载力与阻尼器提供的附加抗侧贡献共同决定。阻尼器常采用斜撑式或墙式设置于框架结构中,构成简单、安装方便。阻尼器可提高框架整体抗侧承载力,黏滞阻尼器和磁流变阻尼器的抗侧贡献主要与阻尼器两端的相对运动速度、阻尼系数、阻尼指数、阻尼器布置角度等因素有关。

3)设置磁流变阻尼器可减小结构地震响应,但减震效果与结构形状、阻尼器布置位置等有关。以北京某更新改造项目为例,由于结构平面呈 L 形,且阻尼器布置位置显著影响阻尼器减震效果。本

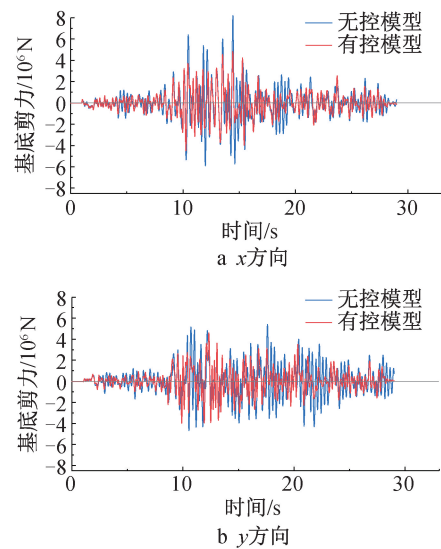


图 20 方案 2 D 点基底剪力时程曲线

Fig. 20 Base shear time-history curves at point D for scheme 2

文提出 5 种布置方案,方案 2、5 的阻尼器主要集中于自振模态中变形较大位置,比其他方案可明显减小结构地震响应。对设有阻尼器的框架结构进行设计时,需对阻尼器位置进行优化分析,以保证阻尼器减震效果。

参考文献:

[1] 付杰. 负刚度磁流变阻尼器减震系统的理论与实验研究[D]. 武汉:华中科技大学,2014.

FU J. Theoretical and experimental study on damping system of negative stiffness magnetorheological damper [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2014.

[2] 杨万庆. 大型磁流变液阻尼器的研究及其工程应用[D]. 武汉:武汉理工大学,2008.

YANG W Q. Research and engineering application of large magnetorheological fluid damper[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2008.

[3] 潘鹏,叶列平,钱稼茹,等. 建筑结构消能减震设计与案例[M]. 北京:清华大学出版社,2014.

PAN P, YE L P, QIAN J R, et al. Seismic design of building structures equipped with energy dissipation devices[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2014.

[4] REINHORN J A M, LI C, CONSTANTINO M C. Experimental and analytical investigation of seismic retrofit of structures with supplemental damping: part. 1-fluid viscous damping devices [R]. 1995.

[5] TAYLOR D P, CONSTANTINO M C. Test methodology and procedures for fluid viscous dampers used in structures to dissipate seismic energy[M]. New York: Taylor Devices, 1994.

[6] 苏皓. 采用黏滞阻尼器开敞式布置机构的钢框架结构减震性能与设计方法研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2024.

SU H. Study on seismic performance and design method of steel frame structure with viscous damper open arrangement

mechanism[D]. Xi'an; Xi'an University of Architecture and Technology, 2024.

[7] 欧进萍,丁建华. 油缸间隙式粘滞阻尼器理论与性能试验[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(4): 82-89.

OU J P, DING J H. Theory and performance experiment of viscous damper of clearance hydrocylinder [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 1999, 19(4): 82-89.

[8] 叶正强,李爱群,程文灏,等. 采用粘滞流体阻尼器的工程结构减振设计研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(4): 61-66.

YE Z Q, LI A Q, CHENG W R, et al. Study on vibration energy dissipation design of structures with fluid viscous dampers [J]. Journal of building structures, 2001, 22(4): 61-66.

[9] 北京火车站抗震加固与改造设计项目组. 北京火车站抗震鉴定与加固技术[J]. 工程抗震, 2003, 25(1): 25-29.

Beijing Railway Station Seismic Reinforcement and Reconstruction Design Project Team. The seismic evaluation and strengthening technique of the Beijing Railway Station [J]. Earthquake resistant engineering, 2003, 25(1): 25-29.

[10] 陈永祁,曹铁柱. 液体黏滞阻尼器在盘古大观高层建筑上的抗震应用[J]. 钢结构, 2009, 24(8): 39-46.

CHEN Y Q, CAO T Z. Vibration reduction of fluid viscous dampers on high-rise building in Pangu Plaza [J]. Steel construction, 2009, 24(8): 39-46.

[11] ASHOUR O, ROGERS C A, KORDONSKY W. magnetorheological fluids: materials, characterization, and devices[J]. Journal of intelligent material systems and structures, 1996, 7(2): 123-130.

[12] YOSHIDA O, DYKE S J, GIACOSA L M, et al. Experimental verification of torsional response control of asymmetric buildings using MR dampers [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2003, 32(13): 2085-2105.

[13] DYKE S J, SPENCER B F J, SAIN M K, et al. Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction[J]. Smart materials and structures, 1996, 5(5): 565.

[14] YANG G, SPENCER B F, CARLSON J D, et al. Large-scale MR fluid dampers; modeling and dynamic performance considerations[J]. Engineering structures, 2002, 24(3): 309-323.

[15] SODEYAMA H, SUNAKODA K, FUJITANI H, et al. Dynamic tests and simulation of magneto-rheological dampers [J]. Computer-aided civil and infrastructure engineering, 2003, 18(1): 45-57.

[16] 欧进萍,关新春. 磁流变耗能器性能的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(4): 76-81.

OU J P, GUAN X C. Experimental study of magnetorheological damper performance[J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 1999, 19(4): 76-81.

[17] XU Z D, SHA L F, ZHANG X C, et al. Design, performance test and analysis on magnetorheological damper for earthquake mitigation [J]. Structural control and health monitoring, 2013, 20(6): 956-970.

[18] 瞿伟廉,刘嘉,涂建维,等. 500kN 足尺磁流变液阻尼器设计的关键技术[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(2): 124-130.

QU W L, LIU J, TU J W, et al. Crucial techniques for design of 500kN large-scale MR damper [J]. Journal of earthquake engineering and engineering vibration, 2007, 27(2): 124-130.

[19] 陈政清,曹宏,禹见达,等. 磁流变阻尼器在洪山大桥拉索减振中的应用[J]. 中南公路工程, 2005, 30(4): 27-30, 103.

CHEN Z Q, CAO H, YU J D, et al. The application of MR damper in cable vibration mitigation on Hongshan Bridge [J]. Central south highway engineering, 2005, 30(4): 27-30, 103.

[20] CHO S W, JUNG H J, LEE I W. Smart passive system based on magnetorheological damper [J]. Smart materials and structures, 2005, 14(4): 707.

[21] YAN W M, JI J B, DONG B, et al. Theoretical and experimental studies on a new reversible magnetorheological damper [J]. Structural control and health monitoring, 2011, 18(1): 1-19.

[22] GUAN X C, HUANG Y H, RU Y, et al. A novel self-powered MR damper; theoretical and experimental analysis[J]. Smart materials and structures, 2015, 24(10): 105033.

[23] 张香成. 铅—磁流变复合阻尼器性能试验及建筑结构减震研究[D]. 南京:东南大学, 2013.

ZHANG X C. Study on performance test of lead-magnetorheological composite damper and seismic reduction of building structure[D]. Nanjing: Southeast University, 2013.

[24] NI Y Q, DUAN Y F, CHEN Q Z, et al. Damping identification of MR-damped bridge cables from in-situ monitoring under wind-rain-excited conditions [C]//Smart Structures and Materials 2002: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways, 2002.

[25] FUJITANI H, SODEYAMA H, TOMURA T, et al. Development of 400kN magnetorheological damper for a real base-isolated building[C]//Proceedings of SPIE, 2003.

[26] 李金海,关新春,刘敏,等. 斜拉索磁流变液阻尼器半主动振动控制系统的设计与应用[J]. 功能材料, 2006, 37(5): 827-830.

LI J H, GUAN X C, LIU M, et al. Design and application of MR fluid damper controlled stay-cable system [J]. Journal of functional materials, 2006, 37(5): 827-830.

[27] 张纪刚,吴斌,欧进萍. 海洋平台冰振控制试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2005, 35(S1): 31-34.

ZHANG J G, WU B, OU J P. Experimental study on ice vibration control of offshore platform [J]. Journal of Southeast University (natural science edition), 2005, 35(S1): 31-34.

[28] 陈政清. 斜拉索风雨振现场观测与振动控制[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(4): 5-10.

CHEN Z Q. On-site observation of wind-rain induced vibration of stay cables and its control [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2005, 22(4): 5-10.

[29] 瞿伟廉,秦顺全,涂建维,等. 武汉天兴洲公铁两用斜拉桥主梁和桥塔纵向列车制动响应智能控制的理论与关键技术[J]. 土木工程学报, 2010, 43(8): 63-72.

QU W L, QIN S Q, TU J W, et al. Theory and crucial technologies of intelligent control for responses in deck and towers of Wuhan Tianxingzhou Cable-stayed Bridge subjected to train braking [J]. China civil engineering journal, 2010, 43(8): 63-72.