

框-剪偏心结构平-扭耦联反应半主动控制试验研究

李秀领^{*1,2}, 李宏男¹

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 山东建筑大学 土木工程学院, 山东 济南 250101)

摘要: 针对采用磁流变阻尼器(MRD)控制框架-剪力墙偏心结构在地震作用下的平-扭耦联反应, 基于 Matlab/Simulink 软件平台和 dSPACE 实时仿真系统进行模拟地震振动台试验, 分别验证结构在不同地震动输入下被动控制方式和半主动控制系统的有效性. 试验结果表明: 结构水平及扭转地震反应均能得到显著降低; 被动控制对地震动输入较为敏感, 而半主动控制的效果要优于被动控制; MRD 的位置对控制效果具有重要影响.

关键词: 框-剪偏心结构; 半主动控制; 磁流变阻尼器; 平-扭耦联反应; 振动台试验

中图分类号: TU352.1 **文献标志码:** A

0 引言

现代建筑的功能日益复杂, 平立面布置越来越不规则, 结构质量中心与刚度中心常常不重合, 使得水平地震作用下的结构产生较大扭转反应, 导致结构某些构件应力集中而破坏. 理论与震害经验表明^[1], 扭转反应会加速偏心结构在地震作用下的破坏, 在某些情况下甚至成为建筑物破坏的主要因素. 如何控制结构在地震作用下的扭转作用, 是结构抗震设计中经常遇到的问题.

为了控制偏心结构在水平地震作用下的扭转作用, 可以从结构设计措施和结构振动控制方法(诸如设置粘弹性阻尼器^[2]、TMD^[3]、TLCD^[4]、偏心支撑^[5]、磁流变阻尼器^[6]及其他装置^[7]等)着手解决. 采用磁流变阻尼器(以下简称 MRD)对结构进行半主动控制, 是当前国际振动控制领域研究的热点, 并且国内外已有不少工程应用实例^[8].

采用 MRD 进行结构的半主动控制时, 建立较为精确的 MRD 计算模型是成功设计半主动控制器首先要解决的问题. 但流变后的 MRD 呈现出很强的非线性, 难以建立其精确的计算模型^[8].

本文采用双 sigmoid 模型^[9]来辨识 MRD 的力学性能, 该模型综合考虑了激励性质和控制电流等因素的影响, 能较好地描述 MRD 的滞回非线性.

为了验证 MRD 对偏心结构扭转反应控制的有效性, 本文对一安装有 MRD 的三层钢筋混凝土框架-剪力墙偏心结构进行振动台试验研究, 考虑 MRD 的数量、安装位置以及地震动的强度和类型等因素, 了解磁流变阻尼-偏心结构的动力特性, 探讨 MRD 及半主动控制策略的有效性, 并对比分析未控结构与磁流变阻尼结构的动力反应试验结果.

1 MRD 动力模型

数值仿真可以计算出需要 MRD 提供的最大出力, 本试验选用 LORD 公司生产的 RD-1005 型 MRD, 属于剪切阀式单出杆式阻尼器. 活塞杆行程为 52 mm, 最大输入电流 2 A. MRD 的动力特性可以采用双 sigmoid 模型^[9]来辨识, 其数学表达式为

$$f_d = f_y \frac{1 - e^{-k(\dot{x} + \dot{x}_h)}}{1 + e^{-k(\dot{x} + \dot{x}_h)}} + C_b \cdot \dot{x} \quad (1)$$

式中: f_y 为 MRD 的屈服力; k 为常数; $\dot{x}$ 为任意时

收稿日期: 2006-10-15; 修回日期: 2008-08-12.

基金项目: 高等学校学科创新引智计划资助项目(B08014); 教育部创新团队资助项目(IRT0518); 国家“十一五”科技支撑计划重大资助项目(2006BAJ03A03; 重点项目 2006BAJ06B03).

作者简介: 李秀领^{*}(1977-), 男, 博士, E-mail: dlutiem@163.com; 李宏男(1957-), 男, 长江学者奖励计划特聘教授, 博士生导师.

刻的速度; C_b 为 MRD 的阻尼系数; $\dot{x}_b$ 为 f_d - v 曲线的穿越速度.

图 1(a)、(b)分别列出了 MRD 在随机波激励下 f_d - d 和 f_d - v 曲线模拟值与试验值的对比. 从图 1 中可以看出,在随机波的激励下,双 sigmoid 模型对阻尼力的预测是比较准确的.

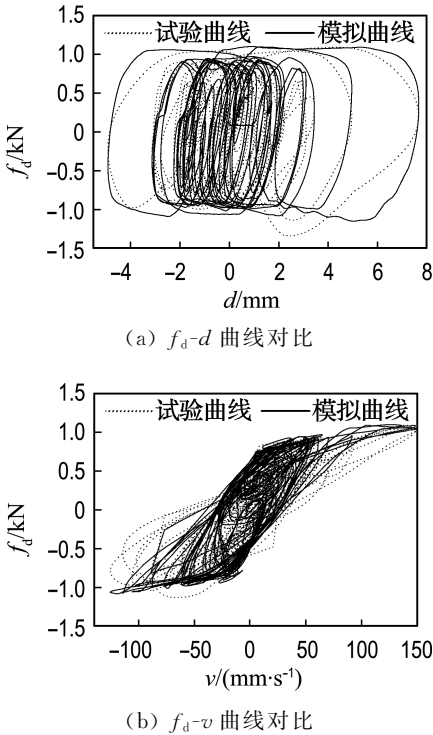


图 1 随机波激励下 MRD 试验值与模拟值比较

Fig. 1 Comparison of the model results and the experimental data under the random wave excitation

2 MRD 半主动控制策略

由于控制系统性能好坏极大地依赖于所选择的控制策略,如何设计 MRD 的加压方式,即控制策略的问题是关系到 MRD 能否充分发挥其优点的关键^[8],其中开关控制(如 Bang-Bang 控制、Clipped-Optimal 控制)是一种比较常用的控制策略^[10],但理论分析和振动台试验结果均表明,这种控制策略易引起小震时及地震动初期、末期作动器参数超调,导致结构的加速度反应局部放大^[11]. 在比较其他控制策略优缺点的基础上^[12、13],提出以速度响应作为状态控制参数的多态控制策略. 具体表达式为

$$I_i = \begin{cases} I_{\max}; & \dot{x} \cdot \ddot{x} \geq 0 \text{ 且 } |\dot{x}| \geq [\dot{x}_i] \\ \alpha \cdot I_{\max}; & \dot{x} \cdot \ddot{x} \geq 0 \text{ 且 } |\dot{x}| < [\dot{x}_i] \\ 0; & \dot{x} \cdot \ddot{x} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

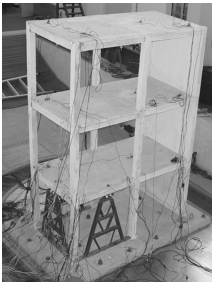
式中: $\dot{x}$ 为 MRD 活塞相对于缸体的速度; $[\dot{x}_i]$ 为所设定的速度阈值; α 为控制电流调节系数,大量计算分析表明 $0.4 < \alpha < 0.6$.

多态控制策略可以避免双态控制的较小扰动引起较大参数改变的问题,只有当速度超过一定阈值时才有可能给 MRD 施加最大电流,当小于这一阈值时给 MRD 施加一中等大小电流,因此能够避免加速度局部放大现象的发生. 这种控制策略不依赖于结构特性,直接采用结构响应的量测值来实施控制电流的变化,保证控制的鲁棒性. 仅设置 3 个电流挡,有利于操作,实用性较强.

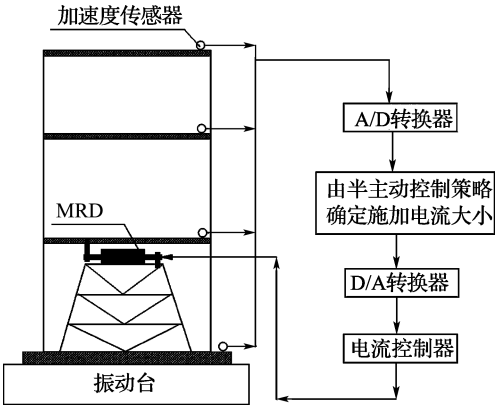
3 试验建立

3.1 结构模型制作

模型试验是在大连理工大学土木水利学院国家重点实验室中的 $3\text{ m} \times 4\text{ m}$ 模拟地震振动台上完成的. 结构模型为 $1:4$ 缩尺的三层钢筋混凝土框架-剪力墙结构,层高 1.0 m ,楼板尺寸 $2.1\text{ m} \times 1.1\text{ m} \times 0.03\text{ m}$,柱横截面尺寸 $0.08\text{ m} \times 0.08\text{ m}$,梁横截面尺寸 $0.06\text{ m} \times 0.1\text{ m}$,剪力墙厚 0.03 m ,底板厚 0.1 m ,剪力墙仅布置在结构一侧以形成偏心,如图 2(a)所示.



(a) 试验照片



(b) 结构控制系统流程图

图 2 模型结构试验

Fig. 2 Model structure test

模型结构的底板通过螺栓与振动台台面连接. 在底板和每层横梁上预埋 4 个螺栓, 钢架支撑由这些螺栓固定于楼面上, MRD 的缸筒与钢架支撑相连, 而活塞杆通过螺栓与上层横梁相连. 在试验进行中, 可以通过拆卸螺栓进行阻尼器安装在不同楼层的试验和无控试验.

3.2 传感器布设与 dSPACE 系统

在模型质心处沿地震动输入方向布设 1 个加速度传感器, 在远离以及靠近剪力墙端的 Y 向(地震动输入方向)和 X 向(垂直于地震动输入方向)各布设 1 个加速度传感器, 这样每层布设 5 个加速度传感器, 图 3 为加速度传感器的布置示意图. 在振动台台面沿地震动输入方向布设 1 个加速度传感器, 这样结构共需 16 个加速度传感器.

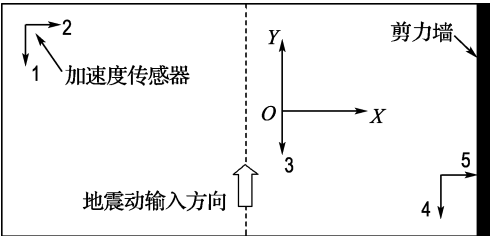


图 3 加速度传感器布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of accelerators location

试验选用的电流控制器为与 MRD 配套的 Wonder Box Controller RD-3002-03 型, 该电流控制器采用脉宽调制方式, 其输出电流与控制电压成线性关系. 图 2(b)中的“ A/D 转换器、由半主动控制策略确定施加电流大小及 D/A 转换器”等功能均由 dSPACE 实时系统来完成. dSPACE(digital Signal Processing And Control Engineering)实时仿真系统是由德国 dSPACE 公司开发的一套基于 Matlab/Simulink 的开发及测试工作平台, 实现了与 Matlab/Simulink 的完全无缝连接. dSPACE 实时系统拥有高速计算能力的硬件系统, 包括处理器、I/O 等, 还拥有方便易用的实现代码生成/下载和试验/调试的软件环境^[14].

建立了控制系统的半实物仿真模型后, 在 Matlab/Simulink 选择 RTW 中 Build 命令, 系统就会自动完成目标 DSP 系统的实时 C 代码的生成、编译、连接和下载, 该过程一般仅需几分钟即可完成. 同时应将 dSPACE 的硬件系统与外部对应的端口相连, 构成半实物仿真系统的控制回路. 通过 ControlDesk 试验工具软件, 可以进行数据观测和文件输出等操作.

3.3 试验工况

本文采用的单向地震动输入为 El-Centro (1940-05-18)、迁安 (1976-08-31)、天津 (1976-11-15) 记录, 加速度峰值均调为相等, 输入方向如图 3 所示. 分别进行如下工况的试验: 无控结构、Passive-off、Passive-on、多态控制 (MSC). 其中 Passive-off 控制时 MRD 的输入电流始终为零, Passive-on 控制时 MRD 的输入电流始终为 2.0 A, 多态控制时系数 α 取 0.55, 而 $[\dot{x}_i]$ 在 1 m/s^2 时取 12 mm/s , 在 2 m/s^2 时取 23.6 mm/s . 共进行了 85 个试验工况, 限于篇幅, 本文仅列出几组典型试验结果.

4 试验结果与分析

4.1 动力特性分析

对模型结构进行白噪声激振, 由加速度反应频谱分析^[15]可以得到未控结构和阻尼器安装在不同楼层时的前若干阶自振频率、阻尼比和相应振型的变化情况. 表 1 给出了模型结构在各工况下的自振频率, 表中计算值是利用简化有限元法根据弯剪模型^[8]计算框剪结构所得到的结果. 图 4 为模型结构的前三阶振型.

从表 1 和图 4 可以得到: 模型结构自振频率的理论计算值与试验值比较接近, 说明按简化有限元方法以弯剪模型计算框架-剪力墙偏心结构弹性阶段的反应是可行的.

MRD 安装于结构之中会改变结构的抗侧移刚度, 结构各阶自振频率比未控结构的稍有增加,

表 1 模型结构的前三阶自振频率

Tab. 1 The first three orders of natural frequencies of the model Hz

阶次	未控结构		MRD 在底层	MRD 在次层	MRD 在顶层
	计算值	试验值			
一阶	5.92	5.44	5.81	5.88	5.76
二阶	16.18	17.69	18.81	17.88	22.61
三阶	22.60	21.35	35.30	22.76	19.25

而结构的振型形状也有所变化。这是 MRD 钢架支撑和阻尼器本身所组成系统影响的结果,但总的

看来结构刚度变化幅度不是很大,在做半主动控制仿真计算时可以采用未控结构的刚度矩阵。

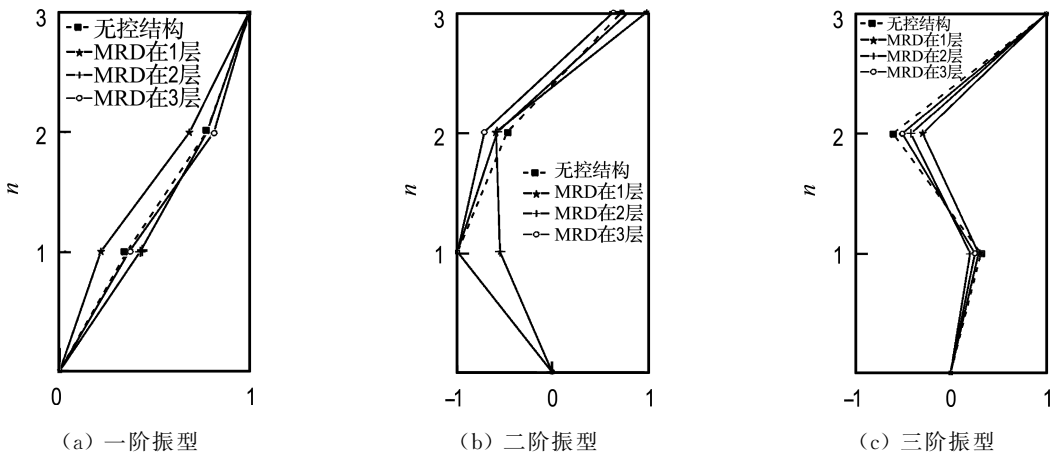


图 4 模型结构的前三阶振型

Fig. 4 The first three orders of experimental mode shapes of the model

4.2 结构 Y 向反应峰值

以远离剪力墙端的 1 点(如图 3 所示)Y 向(地震动输入方向)反应为研究对象,将未控结构和不同控制策略下磁流变阻尼结构的加速度峰值和位移峰值试验结果列于图 5~7。

由图 5~7 可以看出:MRD 对结构加速度反

应和位移反应均有较好的控制效果,如在 El-Centro 地震动输入下,顶层加速度峰值控制效果最大值可达 55.88%,而位移反应峰值控制效果最大值可达 74.62%;总体来说对位移的控制效果要大于对加速度的控制效果。

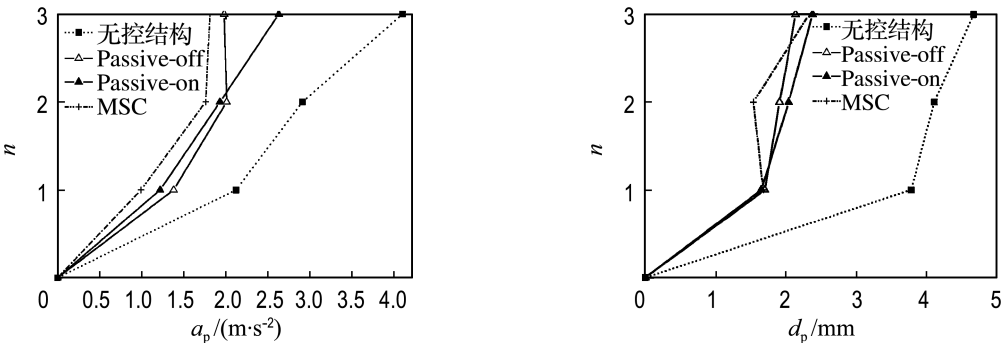


图 5 El-Centro 地震动下结构平动反应

Fig. 5 The translational responses due to El-Centro earthquake

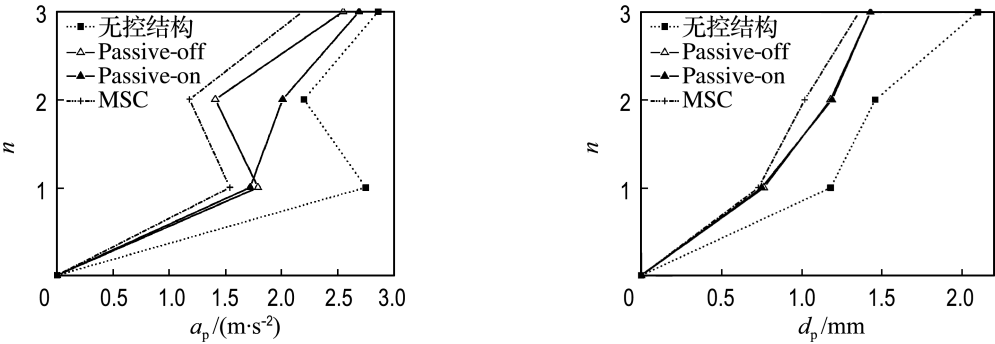


图 6 迁安地震动下结构平动反应

Fig. 6 The translational responses due to Qian'an earthquake

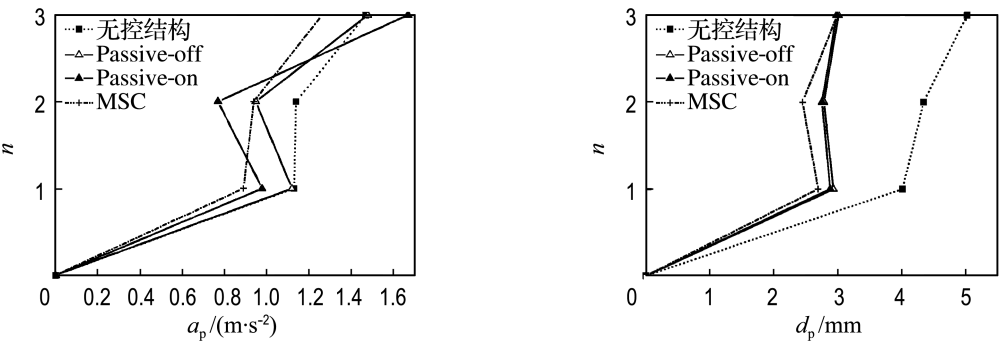


图7 天津地震动下结构平动反应
Fig.7 The translational responses due to Tianjin earthquake

当输入不同地震动时,被动控制效果变化较大,输入 El-Centro 地震动和迁安地震动的控制效果要优于输入天津地震动时的控制效果,在天津地震动输入时结构的加速度反应甚至出现放大现象.这说明被动控制仅对一定频谱范围内的地震动有效,当地震动发生变化时,被动控制就难以获得较好的控制效果;而半主动控制在输入 3 种地震动时均能取得很好的控制效果.这是由于半主动控制方式能够根据结构反应实时地调整 MRD 出力大小,避免了加速度局部放大现象的发生,体现了相对于被动控制的优越性.

4.3 结构扭转反应峰值

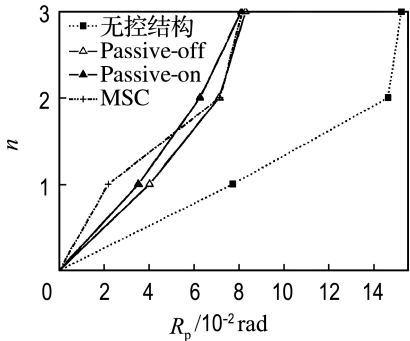
以结构扭转角为研究对象,图 8 为 El-Centro 地震动、迁安地震动和天津地震动输入下,MRD 安装在结构底层时不同控制策略下结构扭转角反应峰值 R_p .

由图 8 中数据可以得出:对于不同的地震动输入,半主动控制时结构的扭转反应均可获得良好的控制效果,最大可达 74.70%;而在两种被动控制策略下结构扭转反应减小很少,甚至出现放大作用,并且地震动对被动控制效果具有明显影响,在 El-Centro 地震动输入下的控制效果优于其他两种地震动输入时的结果.

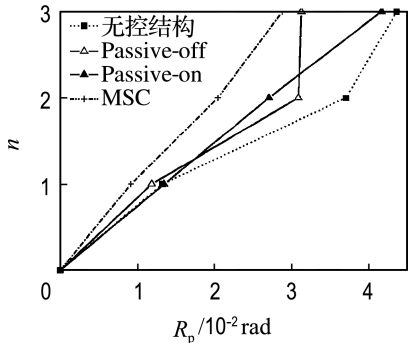
4.4 结构位移比

结构的扭转位移比 r_d 为楼层最大水平位移与楼层平均位移之比,对于规则结构此值等于 1.0.以远离剪力墙端的 1 点(如图 3 所示)Y 向扭转位移比为研究对象,图 9~11 分别为在迁安地震动和天津地震动输入下,MRD 安装在结构不同位置时扭转位移比.

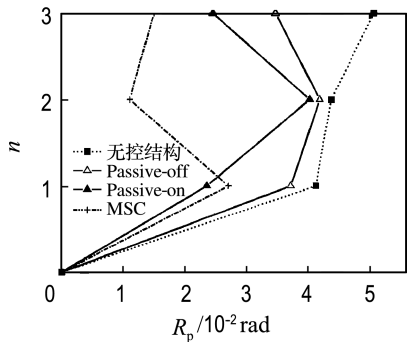
由图 9~11 可以得出:在结构不同位置安置 MRD 后,结构的扭转位移比明显得到抑制,达到规范^[16]的要求;地震动对结构的扭转位移比有明



(a) El-Centro 地震动输入

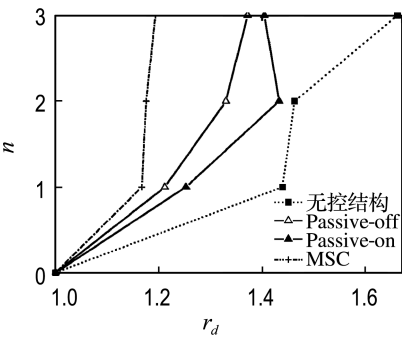


(b) 迁安地震动输入

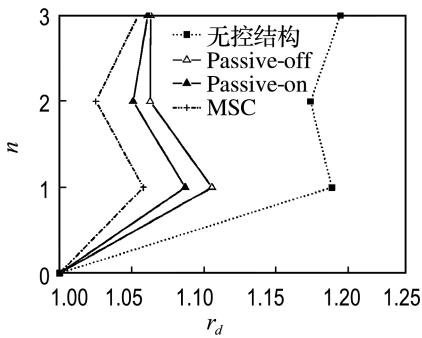


(c) 天津地震动输入

图8 不同控制策略下结构扭转反应峰值
Fig.8 The peak torsion responses under different control strategies



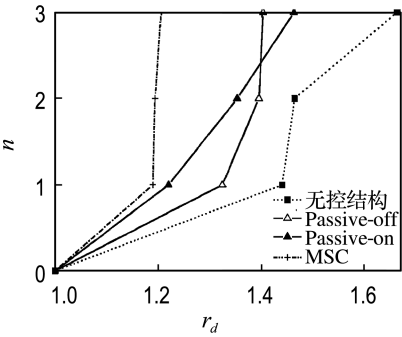
(a) 迁安地震动输入



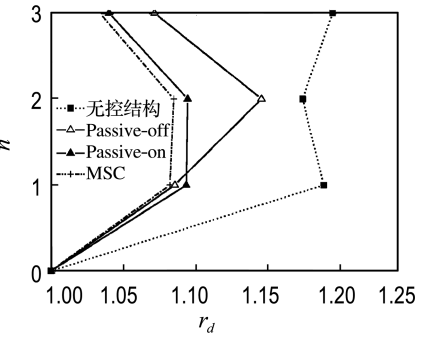
(b) 天津地震动输入

图 9 MRD 在第 1 层时结构的位移比

Fig. 9 The displacement ratio when MRD in the 1st floor



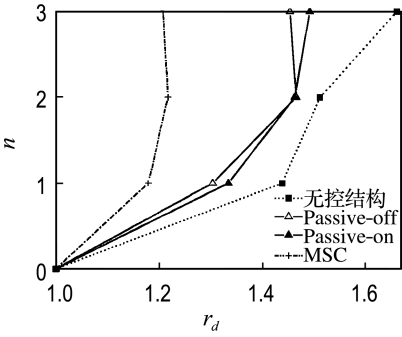
(a) 迁安地震动输入



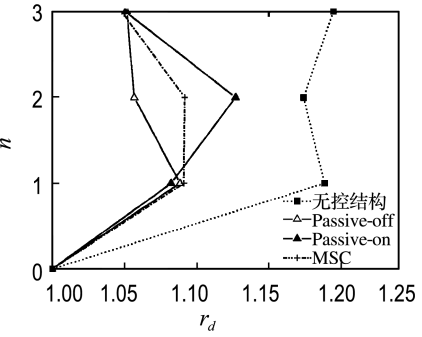
(b) 天津地震动输入

图 10 MRD 在第 2 层时结构的位移比

Fig. 10 The displacement ratio when MRD in the 2nd floor



(a) 迁安地震动输入



(b) 天津地震动输入

图 11 MRD 在第 3 层时结构的位移比

Fig. 11 The displacement ratio when MRD in the 3rd floor

显的影响作用,如迁安地震动输入下结构的扭转位移比要大于天津地震动输入时的情况;半主动控制策略下结构的扭转位移比控制效果比两种被动控制情况好,被动控制策略下个别工况甚至出现位移比放大现象;MRD 在结构中的不同位置对扭转位移比具有明显的影响,当 MRD 在结构底层时控制效果最好,当安置在结构的第 2 层和第 3 层时控制效果不是很好,甚至出现放大现象.这也说明在结构振动控制时特别是对于高层、不规则结构进行作动器位置和数量优化的必要性.

5 结 论

(1)设计制作的钢筋混凝土框架-剪力墙偏心结构能够满足研究的需要,结构在震动的作用下产生了明显偏心作用,最大扭转角为 0.152 rad,而扭转位移比最大可到 1.661.

(2)无论是结构的平动反应,还是扭转反应,施加 MRD 控制后均有较好的控制效果.但被动控制策略对震动频谱特性较敏感,在某些震动的输入下控制品质会变得很差.

(3)所提出的半主动控制方式简单易行,能够有效避免结构加速度局部放大现象的发生,在不同地震动输入下均能取得比被动控制策略更理想的控制效果,例如对Y向加速度峰值的控制效果可达55.88%,而位移峰值的控制效果为74.62%,对扭转角的控制效果达到74.70%。

(4)MRD的位置对结构控制效果具有明显的影响。对本试验而言,当MRD安装在结构底层时能取得最好的控制效果。说明结构振动控制中,传感器/作动器位置和数量优化的必要性,特别是对多高层和不规则结构更是如此。

参考文献:

- [1] 李宏男. 结构多维抗震理论[M]. 北京:科学出版社, 2006
- [2] 郑久建,魏 琰. 多高层建筑采用粘滞阻尼器减震结构的扭转分析[J]. 工程抗震, 2004(2):1-5
- [3] 黄世敏,魏 琰,衣洪建,等. 地震作用下不对称高层建筑平移-扭转耦联振动的控制研究[J]. 工程抗震, 2003(4):1-5
- [4] 霍林生. 偏心结构利用调液阻尼器减震控制的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2005
- [5] 郭仕群. 使用偏心支撑减小不规则高层建筑的扭转振动效应[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(3): 76-80
- [6] 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 and Structural Dynamics*, 2003, 32(13):2085-2105
- [7] JUAN C, ALMAZA J L. Torsional balance of plan-asymmetric structures with frictional dampers: analytical results [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2005, 34(9):1089-1108
- [8] 李秀领. 非对称建筑结构的磁流变阻尼器半主动控制[D]. 大连:大连理工大学, 2006
- [9] 李秀领,李宏男. 磁流变阻尼器的双sigmoid模型及试验验证[J]. 振动工程学报, 2006, 19(2):168-172
- [10] JANSEN L M, DYKE S J. Semi-active control strategies for MR dampers:a comparative study [J]. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 2000, 126(8):795-803
- [11] JANN N Y, KIM J H, ANIL K A. Resetting semi-active stiffness damper for seismic response control [J]. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 2000, 126(12):1427-1433
- [12] 徐赵东,沈亚鹏. 磁流变阻尼结构的双态控制和三态控制弹塑性分析[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(7):754-758
- [13] 任晓崧,许 奇. MR阻尼器的状态跳跃控制参数[J]. 力学季刊, 2004, 25(1):145-151
- [14] 李秀领,李宏男. MR阻尼结构振动控制的仿真试验研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(5):1343-1346
- [15] 李国强,李 杰. 工程结构动力检测理论与应用[M]. 北京:科学出版社, 2002
- [16] 中国建筑科学研究所. GB 50011-2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001

Experimental study of semi-active control of coupled translation and torsion response for frame-shear wall eccentric structure

LI Xiu-ling^{*1,2}, LI Hong-nan¹

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: The experimental system of frame-shear wall eccentric structure was built according to the coupled translation and torsion response control of this structural model using magnetorheological damper (MRD), and then the shaking table experiment of the structural model is implemented based on Matlab/Simulink software environment and hardware/software resources of dSPACE. The validity of two passive control strategies and the semi-active control strategy is verified under three input earthquake excitations with different peak values. The experimental results show that the coupled translation and torsion response is significantly mitigated, and the semi-active control strategy can achieve higher performance levels as compared to those of the two passive control strategies. Moreover, the location of the MRD has an important effect on the control results.

Key words: frame-shear wall eccentric structure; semi-active control; magnetorheological damper; coupled translation and torsion response; shaking table experiment