

基于自复位变摩擦阻尼器的结构减震控制

高毅超^{1,2}, 梅 真^{1,2}

(1. 华侨大学土木工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘 要 目的 针对常摩擦力摩擦阻尼器不能根据结构反应实时调整滑动摩擦力、导致减振效果不稳定的问题, 研发一种自复位变摩擦阻尼器. 方法 基于库仑摩擦定律建立自复位变摩擦阻尼器的恢复力模型, 通过对设置以及未设置阻尼器的结构分别进行确定性及随机地震反应分析, 研究该阻尼器的减振效果. 结果 确定性地震动作作用下, 自复位变摩擦阻尼器能够有效减小结构的层间位移反应, 而绝对加速度反应通常有所增大; 随机地震动作作用下, 自复位变摩擦阻尼器能明显减小无控时层间位移较大楼层的位移反应, 多数楼层绝对加速度均方根值的均值和标准差有所减小, 而楼层绝对加速度峰值大多增大. 结论 自复位变摩擦阻尼器能明显降低结构的位移反应, 且位移控制效果基本上不随输入地震动加速度峰值的变化而改变, 但受控结构的加速度反应通常较无控结构有一定增大.

关键词 摩擦阻尼器; 变摩擦力; 减振; 地震动

中图分类号 TU352

文献标志码 A

Seismic Response Control of Civil Structures with Self-centering Variable Friction Dampers

GAO Yichao^{1,2}, MEI Zhen^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen, China, 361021; 2. Key Laboratory for Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province, Xiamen, China, 361021)

Abstract: The sliding friction force of traditional constant-friction-force dampers cannot be adjusted in real time according to structural responses, resulting in unstable vibration control effect. In this paper, a novel self-centering variable friction damper (SCVFD) is developed, and then the hysteretic model of this damper is established based on the Coulomb's law. To investigate the seismic control effect of SCVFDs, seismic response analyses of structures with and without SCVFDs subjected to deterministic and random earthquake ground motions are carried out respectively. Numerical results show that the SCVFDs can effectively reduce inter-story drifts of the controlled structure subjected to deterministic ground motions, while the absolute accelerations of structures with control are usually greater than those without control. In the case of random seismic excitation, the

收稿日期: 2017-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51608212); 福建省自然科学基金项目(2015J01208); 华侨大学科研启动费项目(14BS105)

作者简介: 高毅超(1985—), 男, 博士, 主要从事工程结构防灾减灾方面研究.

SCVFDs can significantly mitigate displacement responses of the stories where the inter-story drifts are relatively large. Additionally, the mean and standard deviation of RMS absolute accelerations of most floors are reduced while the opposite is true for the peak absolute accelerations.

Key words:friction damper; variable friction force; vibration mitigation; earthquake ground motion

摩擦阻尼器是一种常见的消能减振装置. 目前工程中采用的摩擦阻尼器,如 Pall 摩擦阻尼器、Sumitomo 摩擦阻尼器等^[1-3],由于其摩擦面上的正压力和摩擦系数基本不变,在反复循环加载下的滞回曲线大多为矩形,即滑动摩擦力基本保持不变. 这些常摩擦力摩擦阻尼器在工程应用中最为关键的问题之一是如何根据外界动力作用的强度确定合适的起滑力. 然而,建筑结构在服役过程中可能遭受的地震作用的强度、频谱特性和持续时间都具有显著的不确定性^[4-5]. 因此,在建筑结构中采用常摩擦力阻尼器作为减振装置存在强振和弱振不能兼顾的问题^[6].

为克服常摩擦力阻尼器在工程应用中存在的问题,国内外学者在被动变摩擦阻尼器研发方面已经开展了一些有益探索. 例如,已经研制了向心式变摩擦阻尼器^[7]、凸面拟黏滞摩擦阻尼器^[8]、改进的拟黏滞摩擦阻尼

器^[9]、位移相关型筒式变摩擦阻尼器^[10]、管式变摩擦阻尼器^[11]、筒式变摩擦阻尼器^[12]、位移相关型变摩擦阻尼器^[13]等. 笔者研发了一种新型自复位变摩擦阻尼器,推导了该阻尼器的恢复力模型,通过对设置以及未设置自复位变摩擦阻尼器的结构分别进行确定性及随机地震反应分析,研究了该阻尼器的结构控制效果,为该阻尼器的工程应用与推广提供科学依据.

1 自复位变摩擦阻尼器

1.1 阻尼器构造

自复位变摩擦阻尼器的构造如图 1 所示. 该阻尼器由钢筒、钢轴、左端盖、右端盖、挡板、压缩弹簧、挤压楔块、摩擦楔块、调节螺母和连接接头组成. 其中,摩擦楔块采用黄铜制作,其余组件均为钢制.

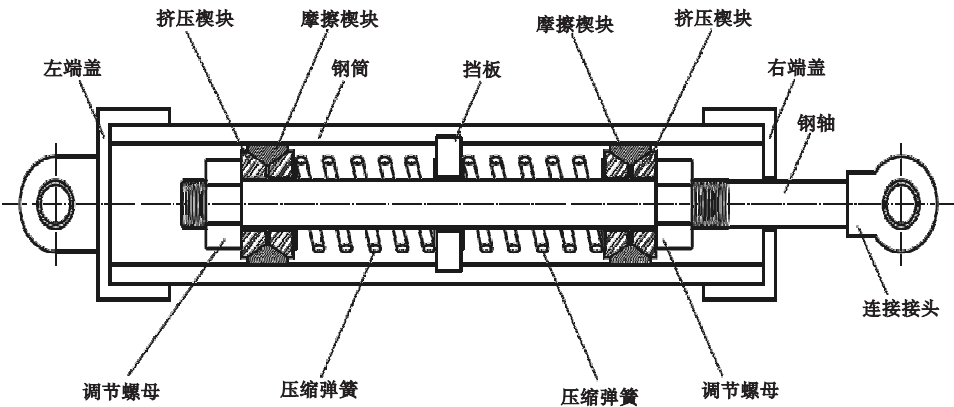


图 1 自复位变摩擦阻尼器

Fig. 1 Self-centering variable friction damper

1.2 阻尼器恢复力模型

由库仑摩擦定律可建立自复位变摩擦阻尼器的恢复力模型. 笔者仅以双三角形滞回模型作为研究对象. 当圆环形挡板两侧压缩弹簧的初始压缩量均为零时,阻尼器出力由

摩擦楔块与钢筒内壁之间的滑动摩擦力和挡板一侧压缩弹簧的弹性力两个部分组成.

在加载阶段,自复位变摩擦阻尼器的出力等于弹性力和滑动摩擦力之和,即

$$F_d = P_s + P_f = k_1 x.$$

(1)

其中:

$$k_1 = \frac{(1 + \alpha)k_s k_0}{(1 + \alpha)k_s + k_0} \tag{2}$$

式中: F_d 为阻尼器出力; P_s 为弹性力; P_f 为滑动摩擦力; k_1 为加载刚度; x 为阻尼器中钢轴相对于钢筒的位移; k_s 为挡板两侧压缩弹簧的刚度; k_0 为钢轴的刚度; α 为与阻尼器构造有关的系数.

$$\alpha = \frac{2\mu_2(1 - \mu_1 \tan \theta)}{(\mu_1 - \mu_2) + (1 + \mu_1 \mu_2) \tan \theta} \tag{3}$$

式中: μ_1 为摩擦楔块与挤压楔块之间的摩擦系数; μ_2 为摩擦楔块与钢筒内壁之间的摩擦系数; θ 为摩擦楔块和挤压楔块的接触面与钢轴轴线方向的夹角.

卸载时,摩擦阻力突然消失,钢轴的变形也随之减小,所以卸载瞬间的刚度为 k_0 .

当开始沿卸载方向滑动时,自复位变摩擦阻尼器的出力为弹性力和滑动摩擦力之差,即

$$F_d = P_s - P_f = k_2 x. \tag{4}$$

其中:

$$k_2 = \frac{(1 - \beta)k_s k_0}{(1 - \beta)k_s + k_0} \tag{5}$$

式中: k_2 为卸载刚度; β 为与阻尼器构造有关的系数.

$$\beta = \frac{2\mu_2(1 + \mu_1 \tan \theta)}{(\mu_2 - \mu_1) + (1 + \mu_1 \mu_2) \tan \theta} \tag{6}$$

2 确定性地震动作用下的结构振动控制

2.1 确定性地震动的加速度时程

图 2 给出了 3 条确定性地震动的加速度时程. 其中,El Centro 波和 Taft 波为两条典型的实际地震动记录(均为 N-S 分量),文中截取了加速度时程中幅值相对较大的 20.48 s. 均值参数地震动是一条人工地震波,由物理随机地震动模型生成^[14-15](模型中各参数都取均值,变异系数均取零),总时长为 20.48 s. 应当指出的是,图 2 中 3 条地

震动加速度时程的时间间隔均为 0.02 s,加速度峰值都调整为 1 m/s².

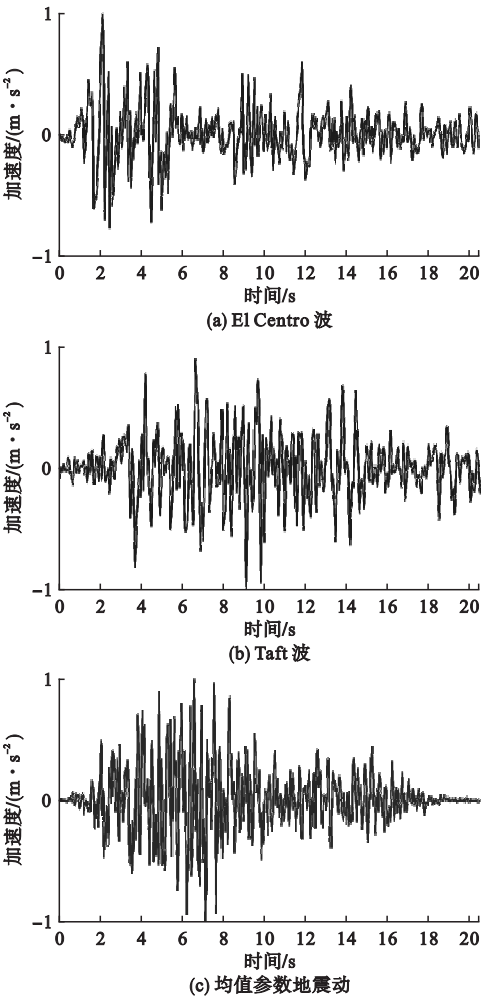


图 2 3 条确定性地震动的加速度时程
Fig. 2 Acceleration time histories of three deterministic ground motions

2.2 确定性结构控制效果

为研究自复位变摩擦阻尼器在确定性地震动作用下的结构控制效果,并与常摩擦力阻尼器的减振特性相比较,分别对有控和无控结构的地震反应进行分析. 笔者以一个地震模拟振动台试验中的 6 层钢框架结构作为被控对象^[16-17],与之相对应的 6 自由度(6-DOF)层间模型的质量矩阵可由该钢框架各部分的质量计算得到,刚度矩阵和阻尼矩阵可根据振动台试验结果参照文献[18]中的方法识别得到. 结构地震反应分析时采用图

2 中的 3 条地震动加速度时程作为单向水平地震动输入,且考虑地震动加速度峰值(取 0.55 m/s^2 、 1.5 m/s^2 、 3.1 m/s^2 ,分别对应设防烈度七度时的小震、中震和大震)对分析结果的影响.假设自复位变摩擦阻尼器的加载刚度 k_1 为 $9.6 \times 10^5\text{ N/m}$,过渡刚度 k_0 为

$10k_1$,卸载刚度 k_2 为 $0.25k_1$;常摩擦力阻尼器的滑动摩擦力为 $3.0 \times 10^3\text{ N}$.有控时,在 6-DOF模型的底层和第三层分别布置一个自复位变摩擦阻尼器或常摩擦力阻尼器.有控和无控结构的地震反应峰值见图 3~图 8.

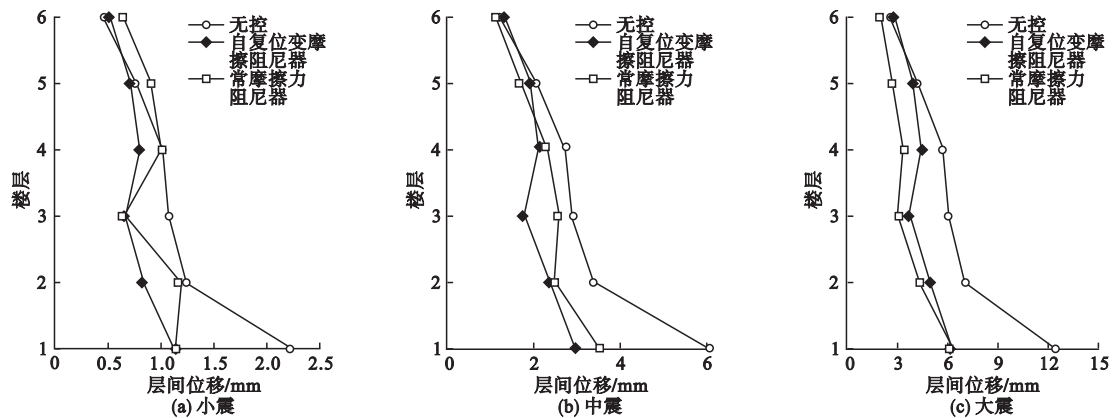


图 3 El Centro 波输入时结构层间位移峰值

Fig. 3 Peak inter-story drifts of structures under El Centro earthquake ground motion

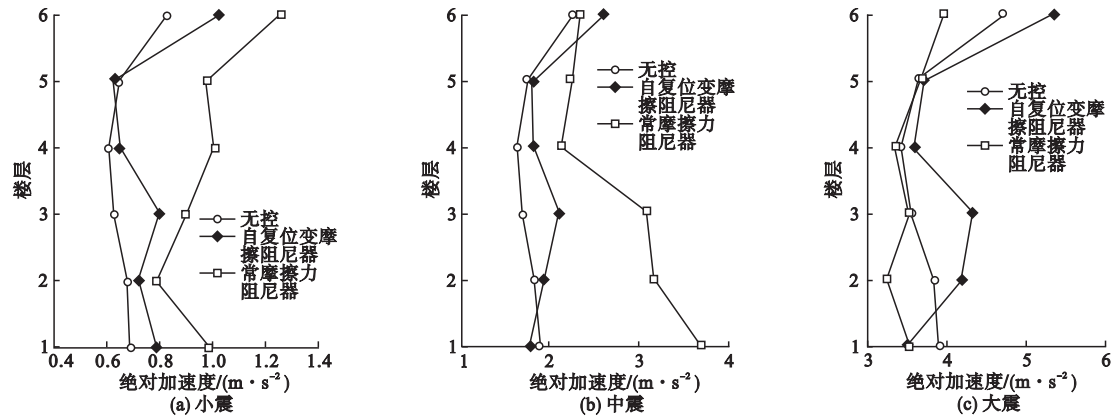


图 4 El Centro 波输入时结构绝对加速度峰值

Fig. 4 Peak absolute accelerations of structures under El Centro earthquake ground motion

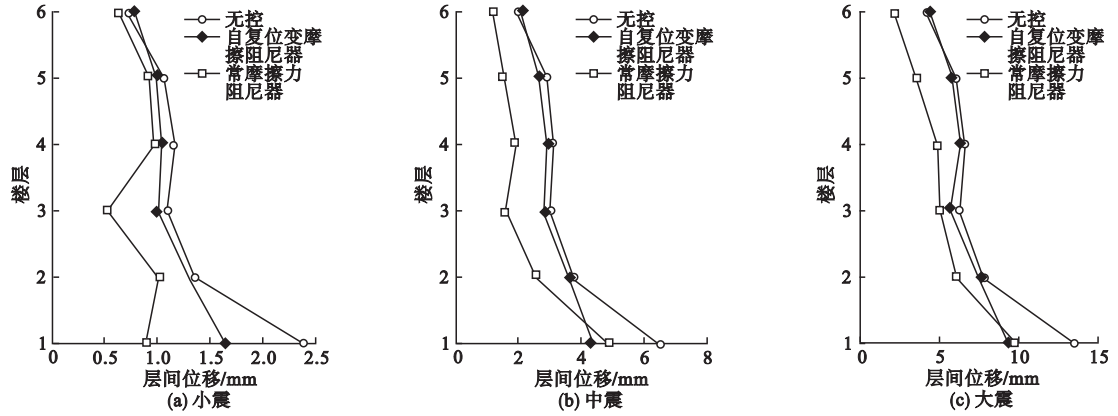


图 5 Taft 波输入时结构层间位移峰值

Fig. 5 Peak inter-story drifts of structures under Taft earthquake ground motion

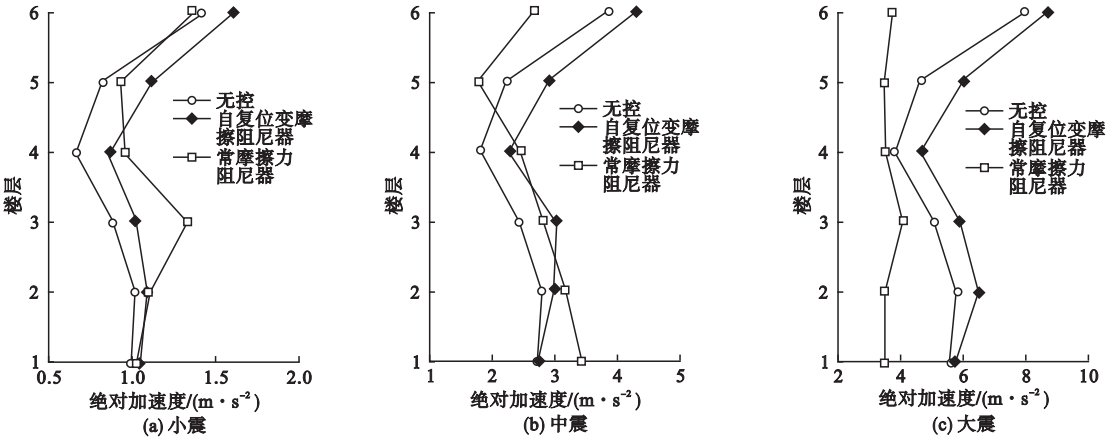


图 6 Taft 波输入时结构绝对加速度峰值

Fig. 6 Peak absolute accelerations of structures under Taft earthquake ground motion

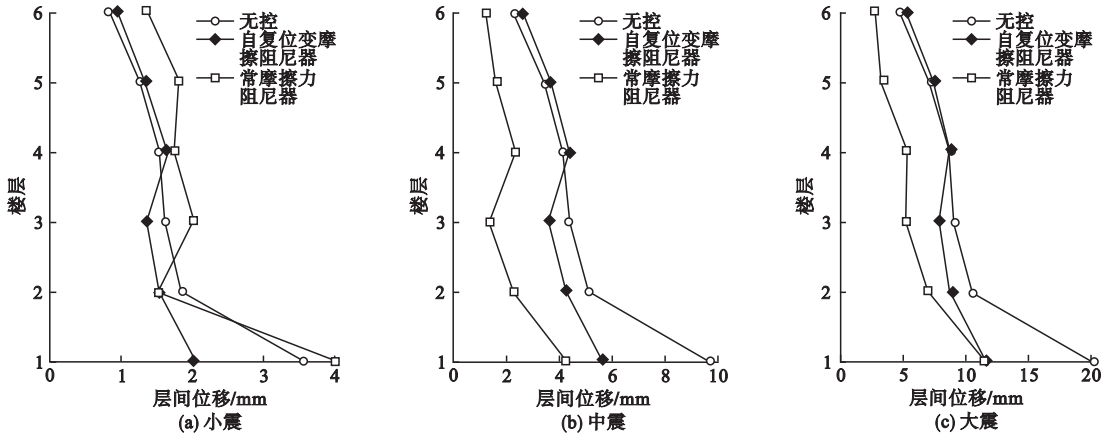


图 7 均值参数地震动输入时结构层间位移峰值

Fig. 7 Peak inter-story drifts of structures under mean-valued ground motion

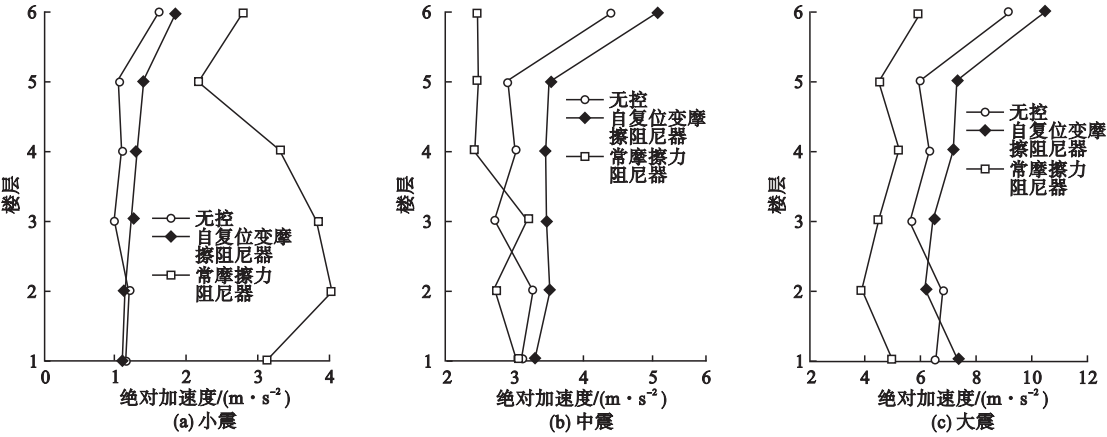


图 8 均值参数地震动输入时结构绝对加速度峰值

Fig. 8 Peak absolute accelerations of structures under mean-valued ground motion

由图 3 ~ 图 8 可见,从整体上看,自复位变摩擦阻尼器和常摩擦力阻尼器一般能有效减小结构层间位移峰值,尤其对于无控时层间位移相对较大的底下三层;然而,楼层绝对

加速度峰值较无控时大多出现了不同程度的放大. 不同加速度峰值的同一条地震动样本输入时,常摩擦力阻尼器取得的减振效果一般差异明显;而自复位变摩擦阻尼器的减振效果,特别是层间位移峰值的降低,随地震动加速度峰值的变化改变不大,这由表1中给出的分析结果可以得到. 例如,当采用 El Centro 波作为输入地震动小震、中震和大震

时,自复位变摩擦阻尼器对结构第四层层间位移的减振率分别为 21.5%、21.7% 和 21.7%,差异很小;而常摩擦力阻尼器的减振效果分别为 1.6%、15.3% 和 39.7%,差异显著. 此外,相同加速度峰值的不同地震动样本输入时,两种摩擦阻尼器的减振效果均具有明显差异,原因在于三条地震动的频谱特性不同.

表1 El Centro 波输入时结构层间位移峰值

Table 1 Peak inter-story drifts of structures under El Centro earthquake ground motion							mm
地震	工况	结构层间位移峰值					
		1 楼	2 楼	3 楼	4 楼	5 楼	6 楼
小震	无控	2.21	1.24	1.07	1.01	0.75	0.46
	有控 1	1.13	0.83	0.67	0.80	0.71	0.51
	减振率 1	48.9	33.5	37.2	21.5	5.4	-12.8
	有控 2	1.14	1.18	0.64	1.00	0.90	0.64
	减振率 2	48.4	4.9	40.5	1.6	-20.4	-40.2
中震	无控	6.03	3.39	2.92	2.76	2.05	1.24
	有控 1	2.99	2.37	1.80	2.16	1.92	1.35
	减振率 1	50.5	30.2	38.5	21.7	5.9	-8.6
	有控 2	3.53	2.48	2.60	2.34	1.70	1.12
	减振率 2	41.4	26.8	10.9	15.3	16.7	9.5
大震	无控	12.46	7.01	6.03	5.71	4.23	2.57
	有控 1	6.29	4.90	3.75	4.47	4.00	2.76
	减振率 1	49.5	30.2	37.9	21.7	5.3	-7.6
	有控 2	6.27	4.36	3.08	3.44	2.76	1.97
	减振率 2	49.7	37.8	49.0	39.7	34.7	23.4

注:1. 有控 1 和有控 2 指分别采用自复位变摩擦阻尼器和常摩擦力阻尼器作为减振装置;2. 减振率 = (无控结构反应 - 有控结构反应)/无控结构反应,表中减振率以百分数计.

3 随机地震动作用下的结构振动控制

3.1 地震动样本生成

采用物理随机地震动模型^[14-15]生成了 313 条地震动样本(不包括图 2(c)中的均值

参数地震动),并对其加速度峰值进行了调整. 物理随机地震动模型中有 4 个基本随机变量,即基底幅值、场地基本频率、场地等价阻尼比以及初始相角. 相关参数取值见表 2,4 个随机变量的变异系数分别取 0.25、0.4、0.3 和 1.2.

表2 随机地震动模型的相关参数均值

Table 2 Parameters mean value of stochastic ground motion model			
基底幅值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1/2}$)	场地基本频率/($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)	场地等价阻尼比	初始相角/rad
0.25	15	0.7	π

基于表2中选定的各参数,由物理随机地震动模型生成的地震动样本,其加速度时间间隔均为0.02 s,总时长均为20.48 s.应当指出的是,这些地震动样本的加速度峰值和频谱特性具有明显差异.调整后的313条地震动样

本加速度峰值的最小值、最大值、均值和标准差分别为0.38、4.78、1.50、0.56 m/s².图9中给出了其中两条典型地震动样本(第165条和第302条)的加速度时程.

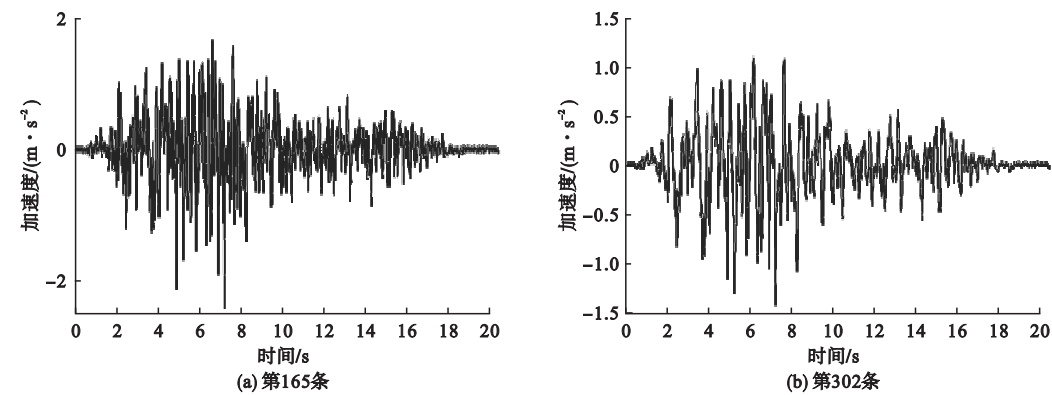


图9 两条典型地震动样本

Fig.9 Two typical groud motions

3.2 结构随机控制效果

为研究随机地震动作用时自复位变摩擦阻尼器在结构中的实际减振效果,采用由物理随机地震动模型生成的313条地震动样本作为单向水平地震输入,对无控和有控6-DOF模型分别进行了随机动力反应分析.有控时,在6-DOF模型的底层和第三层分别布置一个自复位变摩擦阻尼器,并且阻尼器参数均与第二节中的相同.

3.2.1 峰值反应对比

有控及无控时,6-DOF模型的峰值反应如表3所示.

表3 6-DOF模型峰值反应

Table 3 Peak responses of 6-DOF model								
楼层	层间位移/mm				绝对加速度/(m·s ⁻²)			
	均值		标准差		均值		标准差	
	无控	有控	无控	有控	无控	有控	无控	有控
1	9.8	5.9	2.7	1.6	2.9	3.0	0.9	0.8
2	5.3	4.5	1.4	1.2	3.1	3.0	0.9	0.8
3	4.6	3.8	1.2	1.0	2.8	3.1	0.8	0.9
4	4.4	4.6	1.2	1.3	2.7	3.4	0.7	0.9
5	3.4	3.6	0.9	1.0	2.9	3.6	0.8	1.0
6	2.2	2.4	0.6	0.6	4.2	4.6	1.2	1.2

由表可知,设置自复位变摩擦阻尼器后,结构底下三层的层间位移峰值的均值和标准差较无控时分别有不同程度减小.其中,底层位移峰值的均值和标准差分别减小了39.8%与41.4%,减振效果明显.有控时结构第4~6层的层间位移峰值的均值和标准差较无控时分别有一定增大,但均不超过10%.在绝对加速度峰值方面,有控时的均值和标准差较无控时大多有不同程度放大,但均不超过30%.

3.2.2 均方根反应对比

有控及无控时,6-DOF模型的均方根反应如表4所示.

表4 6-DOF模型均方根反应

Table 4 RMS responses of 6-DOF model								
楼层	层间位移/mm				绝对加速度/(m·s ⁻²)			
	均值		标准差		均值		标准差	
	无控	有控	无控	有控	无控	有控	无控	有控
1	4.3	2.4	1.1	0.6	0.7	0.7	0.2	0.2
2	2.4	1.7	0.7	0.5	0.8	0.8	0.2	0.2
3	1.9	1.3	0.5	0.3	0.8	0.8	0.2	0.2
4	1.7	1.3	0.5	0.3	0.9	0.8	0.2	0.2
5	1.1	0.9	0.3	0.3	1.0	0.9	0.3	0.2
6	0.7	0.6	0.2	0.2	1.2	1.0	0.3	0.3

由表可知,有控时的层间位移均方根值的均值和标准差较无控时明显降低,其中,底下三层尤为显著,均减小 30% 以上. 另一方面,多数楼层的绝对加速度均方根值的均值和标准差较无控时分别有一定程度减小,但降低均不超过 15%.

3.2.3 典型动力反应时程对比

有控及无控时,6-DOF 模型底层位移

以及顶层绝对加速度的均值与标准差时程对比如图 10 和图 11. 由图可见,采用自复位变摩擦阻尼器作为减振装置后,结构底层位移反应的一、二阶统计量在整个地震动作用时段内均显著减小. 然而,顶层绝对加速度反应的减振效果不明显,有控和无控时的均值与标准差从整体上看差异不大.

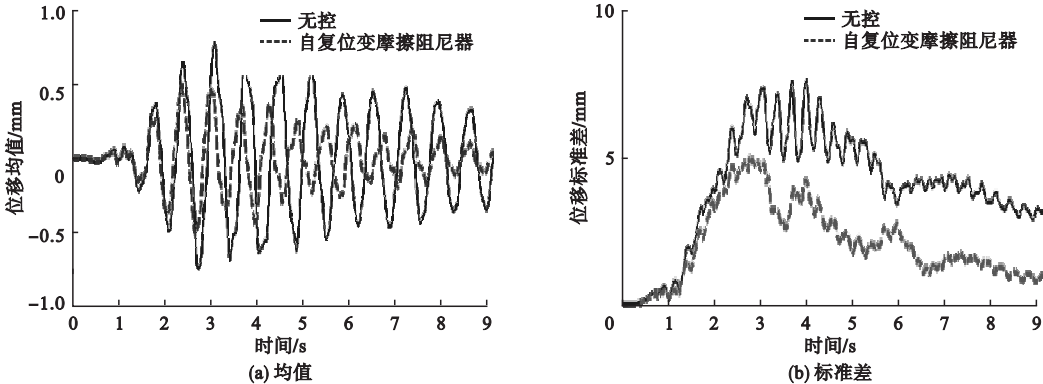


图 10 6-DOF 模型底层位移均值与标准差

Fig. 10 Means and standard deviations of bottom displacements of 6-DOF model

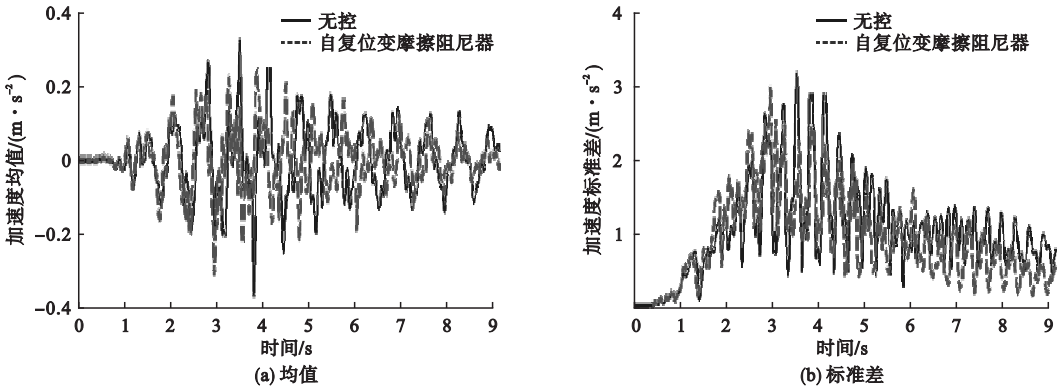


图 11 6-DOF 模型顶层绝对加速度均值与标准差

Fig. 11 Means and standard deviations of top absolute accelerations of 6-DOF model

4 结 论

(1) 确定性地震动作用下, 自复位变摩擦阻尼器一般能有效减小结构的层间位移反应, 尤其是阻尼器布置楼层, 而绝对加速度反应通常较无控时有所增大.

(2) 不同加速度峰值的同一条地震动样本作为外部激励输入时, 自复位变摩擦阻尼器的位移减振效果变化不大, 而常摩擦力阻

尼器的减振效果却差异显著. 由此可见, 前者相对于后者在一定程度上能够更好地适应地震作用的不确定性.

(3) 相同加速度峰值的不同地震动样本输入时, 自复位变摩擦阻尼器和常摩擦力阻尼器的减振效果均具有明显差异. 因此, 地震动的随机性对结构控制效果的影响不能忽视, 并且应该从概率意义上对结构随机地震反应的减振效果进行定量分析.

(4)随机地震动作用下,自复位变摩擦阻尼器能明显减小无控时层间位移较大楼层的位移反应(峰值和均方根值的均值与标准差均显著减小),多数楼层绝对加速度均方根值的均值与标准差较无控时有一定降低,而楼层绝对加速度峰值大多有不同程度增大。

参考文献

- [1] PALL A S, MARSH C. Response of friction damped braced frames [J]. Journal of the structural division, 1982, 108 (6): 1313 - 1323.
- [2] AIKEN I D, KELLY J M. Earthquake simulator testing and analytical studies of two energy-absorbing systems for multistory structures [R]. America; University of California, 1990.
- [3] 赵宝成, 计明明, 顾强, 等. 被动消能交错桁架滞回性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(1): 7 - 15.
(ZHAO Baocheng, JI Mingming, GU Qiang, et al. Experimental investigation of hysteretic behavior of passive energy dissipation staggered truss[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013, 29(1): 7 - 15.)
- [4] WANG Ding, LI Jie. Physical random function model of ground motions for engineering purposes [J]. Science China technological sciences, 2011, 54(1): 175 - 182.
- [5] WANG Ding, LI Jie. A random physical model of seismic ground motion field on local engineering site [J]. Science China technological sciences, 2012, 55(7): 2057 - 2065.
- [6] 彭凌云, 周锡元. 拟线性摩擦阻尼器性能试验与有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6): 188 - 194.
(PENG Lingyun, ZHOU Xiyuan. Experiment and FEA on performance of pseudo-linear friction damper[J]. Journal of building structures, 2010, 31(6): 188 - 194.)
- [7] NIMS D K, RICHTER P J, BACHMAN R E. The use of the energy dissipating restraint for seismic hazard mitigation [J]. Earthquake spectra, 1993, 9(3): 467 - 489.
- [8] 吴斌, 欧进萍. 拟粘滞摩擦耗能器的性能试验与分析[J]. 世界地震工程, 1999, 15(1): 1 - 12.
(WU Bin, OU Jinping. Behavior of pseudo-viscous frictional energy dissipators[J]. World information on earthquake engineering, 1999, 15(1): 1 - 12.)
- [9] 吴斌, 张纪刚, 欧进萍. 一种改进的拟粘滞摩擦阻尼器的试验研究与数值分析[J]. 土木工程学报, 2004, 37(1): 24 - 30.
(WU Bin, ZHANG Jigang, OU Jinping. Testing and numerical analysis of an improved pseudo-viscous frictional damper [J]. China civil engineering journal, 2004, 37(1): 24 - 30.)
- [10] ZHOU Xiyuan, PENG Lingyun. A new type of damper with friction-variable characteristics [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2009, 8(4): 507 - 520.
- [11] 彭凌云, 周锡元, 闫维明. 管式变摩擦阻尼器的减振性能试验与数值模拟[J]. 振动与冲击, 2012, 31(5): 12 - 16, 25.
(PENG Lingyun, ZHOU Xiyuan, YAN Weiming. Test and numerical simulation for performance of a tubular type of variable friction damper [J]. Journal of vibration and shock, 2012, 31(5): 12 - 16, 25.)
- [12] SHIRAI K, SANO T, SUZUI Y, et al. Development of friction damper with displacement dependent variable damping force characteristics [J]. Aij journal of technology & design, 2012, 18(38): 85 - 90.
- [13] 刘学凯, 赵东, 徐增海, 等. 反馈控制摩擦阻尼器的设计及分析[J]. 制造技术与机床, 2012, 11: 62 - 65.
(LIU Xuekai, ZHAO Dong, XU Zenghai, et al. Design and study of a feedback controlled friction damper [J]. Manufacturing technology & machine tool, 2012, 11: 62 - 65.)
- [14] 李杰, 艾晓秋. 基于物理的随机地震动模型研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(5): 21 - 26.
(LI Jie, AI Xiaoqiu. Study on random model of earthquake ground motion based on physical process [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2006, 26(5): 21 - 26.)
- [15] 艾晓秋, 李杰. 基于随机 Fourier 谱的地震动合成研究[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(2): 7 - 12.
(AI Xiaoqiu, LI Jie. Synthesis method of non-stationary ground motion based on random Fourier spectra [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2009, 29(2): 7 - 12.)
- [16] LI Jie, MEI Zhen, CHEN Jianbing, et al. Experimental investigations of stochastic control of randomly base-excited structures [J]. Advances in structural engineering, 2012, 15(11): 1963 - 1975.
- [17] MEI Zhen, GUO Zixiong. Verification of probability density evolution method through shaking table tests of a randomly base-driven structure [J]. Advances in structural engineering, 2018, 21(3): 514 - 528.
- [18] 梅真, 陈建兵, 李杰. 随机地震动作用下的结构振动控制试验设计[J]. 世界地震工程, 2012, 28(1): 157 - 163.
(MEI Zhen, CHEN Jianbing, LI Jie. Experimental design of structural vibration control subject to random earthquake ground motions [J]. World earthquake engineering, 2012, 28(1): 157 - 163.)