第 31 卷 第 1 期 石家庄铁道大学学报(自然科学版) Vol. 31 No.1
2018 年 3 月 Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition) Mar. 2018

粘滞质量阻尼器模型的频域与时域分析

曹智谋, 范 涛

(天津大学 建筑工程学院,天津 300350)

摘要:忽略摩擦力,考虑惯性效应和阻尼效应,建立了粘滞质量阻尼器的力学模型。提出 3 种带有阻尼器模型的单自由度系统,进行无量纲参数化分析,分别从频域和时域研究该类型阻尼器的减振效果。对比研究表明:阻尼器延长了结构的自振周期,所提出的阻尼器模型 3 对降低长周期地震作用下的结构位移反应和加速度反应都有显著的效果。

关键词:单自由度系统;粘滞质量阻尼器;自振周期;频域分析;时域分析

中图分类号:TB122; TU352 文献标志码: A 文章编号: 2095-0373(2018)01-0080-06

0 引言

最近几年,关于惯性质量阻尼器的应用在逐渐增加,相对以前的变刚度和变阻尼控制系统,粘滞质量阻尼器(Viscous Mass Damper,VMD)的出现成为一种可选的阻尼器类型,丰富了抗震形式,该装置利用滚珠丝杠将直线运动转化为高速的旋转运动,这种节点间的相对运动在产生阻尼力的基础上,还产生惯性力。常规的惯性质量装置,如调谐质量阻尼器[1](Tuned Mass Damper,TMD),多运用于降低由风载和地震引起的结构反应。其中,VMD 和 TMD 都通过改变振动方程的惯性力部分来改善系统的反应。两者也有不同之处,TMD 需要很大的质量和很大的空间,VMD 可以通过改变转子的尺寸获得很大的等效质量,因此,VMD 利用更小的空间获得相同的质量,同时,TMD 可以与主体结构发生共振,所以置有 TMD 的结构要承受大位移。Saitoh[2]研究惯性质量装置在基础隔震系统中的位移控制效果。Hwang et al[3]提出了具有滚珠丝杠放大机制的旋转惯性阻尼器(Rotational Inertia Damper,RID)的振动控制系统。Saito et al[4]研究具有惯性质量的粘滞阻尼器结构的反应控制。Ikago et al[5]提出了一种新型的抗震控制装置,调谐质量粘滞阻尼器(Tuned Mass Viscous Damper,TMVD),该阻尼器就是本文研究的 VMD 的拓展,并将 TMVD 运用到单自由度系统中研究它的性能。

1 粘滞质量阻尼器的力学模型

如图 1 所示,VMD 通过滚珠丝杠的旋转产生很大的阻尼力和惯性力[5]。本文研究 VMD 的惯性效应和阻尼效应,基于参考文献[5]的研究成果,忽略摩擦力,VMD 可以简化为一个惯性单元和一个阻尼单元,如图 2 所示。为更好地研究 VMD 的性能,将结合单自由度系统进行研究,这种单自由度系统类似于

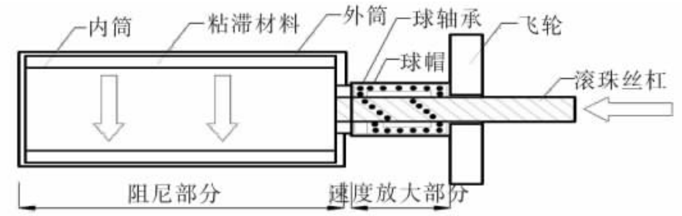


图 1 粘滞质量阻尼器示意图

收稿日期:2016-09-27 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.2018.01.14

作者简介:曹智谋(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向为结构抗震、减振。E-mail:caozhimou2010@163.com

曹智谋,范涛.粘滞质量阻尼器模型的频域与时域分析[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2018,31(1):80-85.

基础隔震系统，简化为一个集中质量，并附加有阻尼力和弹簧恢复力，多自由系统可以等效成单自由度系统。

$$P = m_r\ddot{u}_d + c_d\dot{u}_d \tag{1}$$

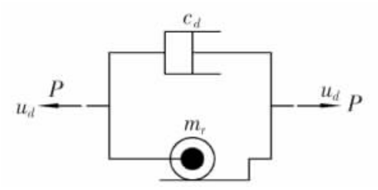


图 2　VMD 的力学模型

2　置有 VMD 的单自由度系统

基于参考文献[5]的 TVMD 模型，忽略摩擦力，本文提出 3 种不同配置有 VMD 的单自由度系统，阻尼器模型 1、2、3 分别如图 3～图 5 所示。采取无量纲参数化研究，对 3 种单自由度系统进行频域[6]和时域分析。在时域分析中，无量纲的参数化主要借鉴频域分析的结果。

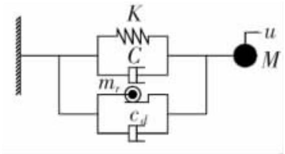


图 3　阻尼器模型 1

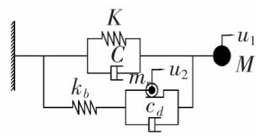


图 4　阻尼器模型 2

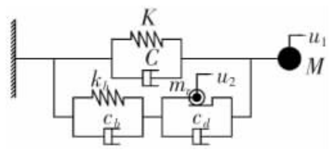


图 5　阻尼器模型 3

2.1　配有 VMD 的单自由度系统的频域分析

2.1.1　阻尼器模型 1

将单自由度系统简化为一个集中质量 M、水平刚度 K 和阻尼系数 C 的系统，VMD 简化为等效质量 m_r 和等效阻尼系数 c_d，两者并联在一起，受到激励时，单自由度系统的质量 M 相对地面的位移是 u。在地面加速度 $\ddot{u}_d$ 作用下，单自由度系统反应满足下面的控制方程

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku + m_r\ddot{u} + c_d\dot{u} = -M\ddot{u}_g \tag{2}$$

方程(2)可以写成下面的形式

$$\ddot{u} + 2(\bar{h}_s + \bar{h}_c)\bar{\omega}_s\dot{u} + \bar{\omega}_s^2 u = -\beta\ddot{u}_g \tag{3}$$

式中，单自由度系统的自振频率 $\bar{\omega}_s = \sqrt{K/(M+m_r)}$；阻尼比 $\bar{h}_s = C/2\sqrt{(M+m_r)K}$；$h_c = c_d/2\sqrt{m_r K}$，$\bar{h}_c = c_d/2\sqrt{(M+m_r)K}$；质量比是 $\beta = M/(M+m_r)$。假定激励的圆频率 ω，方程(3)可以写成如下的形式

$$u = \frac{\beta(\omega/\bar{\omega}_s)^2}{[-(\omega/\bar{\omega}_s)^2 + 2i(\bar{h}_s + \bar{h}_c)(\omega/\bar{\omega}_s) + 1]}u_g \tag{4}$$

相对于配有 VMD 的单自由度系统，传统阻尼器的单自由度系统，即传统阻尼器模型，如图 6。在地面加速度 $\ddot{u}_g$ 作用下的单自由度系统反应满足

$$\ddot{u} + 2h_s\omega_s\dot{u} + \omega_s^2 u = -\ddot{u}_g \tag{5}$$

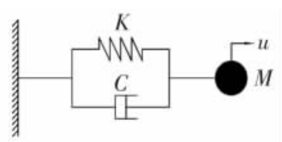


图 6　传统阻尼器模型

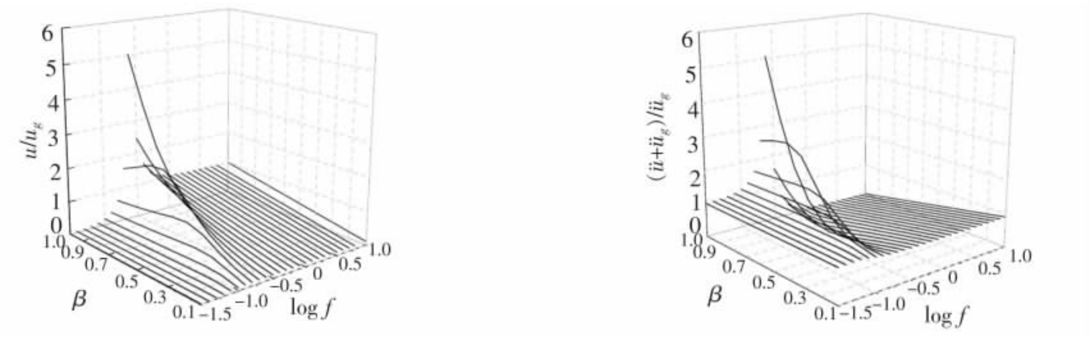
式中，圆频率是 $\omega_s = \sqrt{K/M}$；阻尼系数是 $h_s = C/2\sqrt{MK}$。当受到一个简谐激励时，方程(5)简化为

$$u = \frac{(\omega/\omega_s)^2}{[-(\omega/\omega_s)^2 + 2ih_s(\omega/\omega_s) + 1]}u_g \tag{6}$$

假定阻尼系数 $h_s = 0.1$、$h_c = 0.2$ 和自振频率 $f_s = 0.25$ Hz，绘出方程(4)表示的共振特性。方程(3)中其它的参数满足

$$\bar{\omega}_s = \sqrt{\beta}\omega_s \tag{7}$$

图 7(a)中，随着质量比 β 的减小，相对位移 u 显著减小，同时，共振频率向低频移动，即 VMD 延长结构的周期。从图 7(b)看出，在结构共振区之外，随着质量比的减小，加速度反应逐渐增大。因此，虽然置有 VMD 的单自由度结构能够显著降低相对位移，但也引起加速度反应的增大，因此，模型 1 有必要进一步优化。



(a) 相对位移相对于地面运动的放大率 (b) 加速度反应相对于地面运动的放大率

图7 $h_s=0.1$、$h_c=0.2$ 及 $f_s=0.25$ Hz 的阻尼器模型1

2.1.2 阻尼器模型2

阻尼器模型2是阻尼器模型1的有益改进,图4将一个弹簧单元 k_b 和VMD串联与单自由度结构结合。其中,弹簧单元的作用主要是降低VMD在高频区的效应,提高单自由度结构的减振性能。在地面加速度作用下,阻尼器模型2的运动方程

$$M\ddot{u}_1+C\dot{u}_1+K\dot{u}_1+P=-M\ddot{u}_g \tag{8}$$

$$P=m_r\ddot{u}_2+c_d\dot{u}_2=k_b(\dot{u}_1-\dot{u}_2) \tag{9}$$

假定某稳态激励的圆频率是 ω,阻尼器模型2的动态刚度(Dynamic Stiffness)

$$K^*=k_b\frac{-m_r\omega^2+ic_d\omega}{-m_r\omega^2+ic_d\omega+k_b} \tag{10}$$

在地面加速度作用下,阻尼器模型2的等效方程

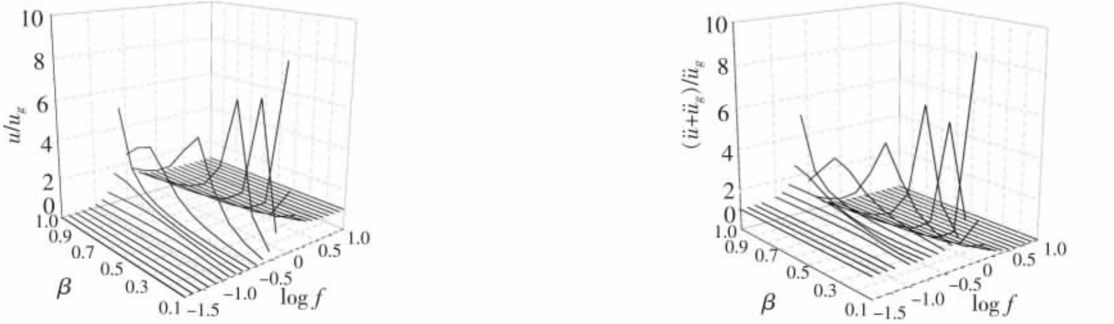
$$M(\ddot{u}+\ddot{u}_g)+C\dot{u}+Ku+K^*u=0 \tag{11}$$

假定简谐激励,图4所示系统的稳态响应可以写成

$$u=\frac{(\omega/\omega_s)^2f(\omega)}{c(\omega)f(\omega)+(1/\beta-1)d(\omega)\gamma_d^2}u_g \tag{12}$$

式中,$c(\omega)=-(\omega/\omega_s)^2+2ih_s(\omega/\omega_s)+1$,$f(\omega)=-(\omega/\omega_s)^2+2ih_d(\omega/\omega_s)\gamma_d+\gamma_d^2$,$d(\omega)=-(\omega/\omega_s)^2+2ih_d(\omega/\omega_s)\gamma_d$,$h_d=c_d/2\sqrt{m_rk_b}$;$\gamma_d=\omega_d/\omega_s$,$\omega_d=\sqrt{k_b/m_r}$。

阻尼器模型2中,假定阻尼系数 $h_d=0.2$ 和频率比 $\gamma_d=1.0$,其它的假定与图7相同,绘制地面位移与质点响应的放大率关系图,见图8,随着质量比的下降,有两个明显的放大区域:低频的放大区域主要是由VMD和单自由度结构引起的共振;高频的放大区域主要是由弹簧单元和单自由度结构引起的共振。图8(b)表明超过高频区的共振频率后,随着激励频率的增加,加速度反应趋向于零。这些性质表明弹簧单元与VMD相连能够减少VMD在高频区的影响,因此,基于弹簧单元的 ω_d,可以调整导致VMD效应降低(高频区加速度增大效应)的高频区域的频率值。



(a) 相对位移相对于地面运动的放大率 (b) 加速度反应相对于地面运动的放大率

图8 $h_s=0.1$、$h_d=0.2$、$\gamma_d=1.0$ 及 $f_s=0.25$ Hz 的阻尼器模型2

2.1.3　阻尼器模型 3

与阻尼器模型 2 不同,阻尼器模型 3 增加了一个阻尼单元,如图 5,阻尼单元主要吸收由弹簧单元和单自由度系统产生的第二放大区域的地震能量,适用于长周期地震波作用下的区域。如同阻尼器模型 2,假定某稳态激励的圆频率为 ω,阻尼器模型 3 的动态刚度

$$K^* = \frac{(ic_b\omega + k_b)(-m_r\omega^2 + ic_d\omega)}{-m_r\omega^2 + ic_d\omega + ic_b\omega + k_b} \tag{13}$$

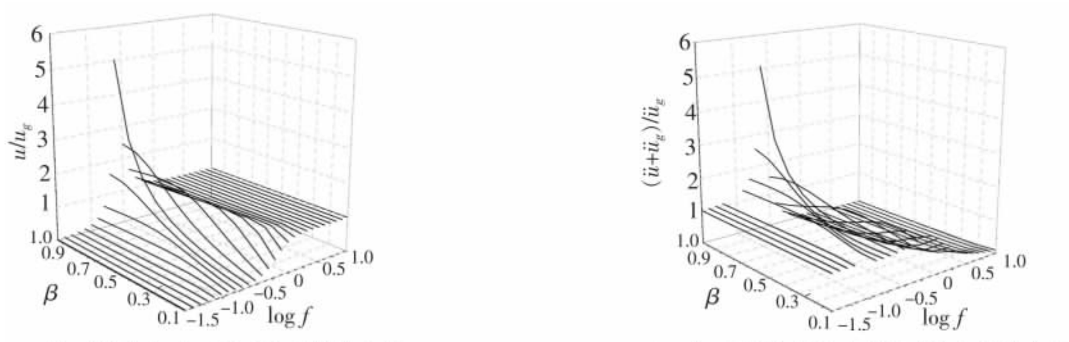
式中,c_b 是与弹簧单元并联的阻尼器的阻尼系数。

在地面加速度 $\ddot{u}_g$ 作用下,系统的稳态响应,相对位移 u 可简化如下形式

$$u = \frac{(\omega/\omega_s)^2 f(\omega)}{c(\omega)f(\omega) + (1/\beta - 1)d(\omega)e(\omega)} \tag{14}$$

式中,$c(\omega)$、$d(\omega)$同方程(12);$f(\omega) = -(\omega/\omega_s)^2 + i2h_d(\omega/\omega_s)\gamma_d + i2h_b(\omega/\omega_s)\gamma_d + \gamma_d^2$,$e(\omega) = 2ih_b(\omega/\omega_s)\gamma_d + \gamma_d^2$,$h_d = c_d/2\sqrt{m_r k_b}$。

假定阻尼系数 $h_b = 0.2$,其它的参数与图 8 相同,绘出方程(14)表示的共振特性。图 9 可以看出,在第二放大区域,将阻尼器与弹簧单元并联组成弹簧/阻尼单元能够明显降低相对位移和加速度反应。



(a) 相对位移相对于地面运动的放大率　　(b) 加速度反应相对于地面运动的放大率

图 9　$h_s = 0.1$, $h_b = 0.2$, $h_d = 0.2$, $\gamma_d = 1.0$, $\beta = 0.5$ 和 $f_s = 0.25$ Hz 的阻尼器模型 3

2.2　置有 VMD 的单自由度系统的时域分析

利用实际地震纪录,对上述系统进行时程分析来验证 VMD 装置的减振效果。阻尼器模型 1 和传统阻尼器模型是单自由度结构,其运动方程分别是方程(3)、方程(5),同样地,阻尼器模型 2 和阻尼器模型 3 是双自由度结构,因此,矩阵形式的运动方程可以很好地评估时程反应。阻尼器模型 2 的运动方程如下

$$\begin{bmatrix} M + m_r & -m_r \\ -m_r & m_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C + c_d & -c_d \\ -c_d & c_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & k_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = -M \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{u}_g \tag{15}$$

式中,u_1 和 u_2 分别是单自由度体系中结构质量与 VMD 等效质量的相对位移,如图 4。方程无量纲化

$$\begin{bmatrix} \beta^{-1} & -(\beta^{-1} - 1) \\ -(\beta^{-1} - 1) & \beta^{-1} - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{bmatrix} + \omega_s \begin{bmatrix} 2h_s + 2h_d(\beta^{-1} - 1)\gamma_d & -2h_d(\beta^{-1} - 1)\gamma_d \\ -2h_d(\beta^{-1} - 1)\gamma_d & 2h_d(\beta^{-1} - 1)\gamma_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{bmatrix} +$$

$$\omega_s^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & (\beta^{-1} - 1)\gamma_d^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{u}_g \tag{16}$$

同样地,模型 3 的运动方程如下

$$\begin{bmatrix} M + m_r & -m_r \\ -m_r & m_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C + c_d & -c_d \\ -c_d & c_d + c_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & k_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = -M \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{u}_g \tag{17}$$

方程(17)无量纲化后,得到

$$\begin{bmatrix} \beta^{-1} & -(\beta^{-1} - 1) \\ -(\beta^{-1} - 1) & \beta^{-1} - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{bmatrix} + \omega_s \begin{bmatrix} 2h_s + 2h_d(\beta^{-1} - 1)\gamma_d & -2h_d(\beta^{-1} - 1)\gamma_d \\ -2h_d(\beta^{-1} - 1)\gamma_d & 2(h_b + h_d(\beta^{-1} - 1)\gamma_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{bmatrix} +$$

$$\omega_s^2\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & (\beta^{-1}-1)\gamma_d^2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_1\\ u_2\end{bmatrix}=-\begin{bmatrix}1\\ 0\end{bmatrix}\ddot{u}_g \tag{18}$$

时程分析采用线性加速度的 Newmark-β 法，$\Delta=0.005$ s，加到模型中的地面加速度纪录如下：(1)Lucerne(1992)，(2)Managua(1972)，(3)Chi-Chi(1999)(如图 10)。可以看出：Lucerne 有最大的加速度幅值的脉冲时程；Chi-Chi 有长周期效应的脉冲时程；Managua 则有上面两者之间的幅值和短周期效应的时程。时域分析所需的参数与前面的频域分析的参数相同，$h_s=0.1$，$h_b=0.2$，$h_d=0.2$，$\gamma_d=1.0$，$\beta=0.5$ 和 $f_s=0.25$ Hz。

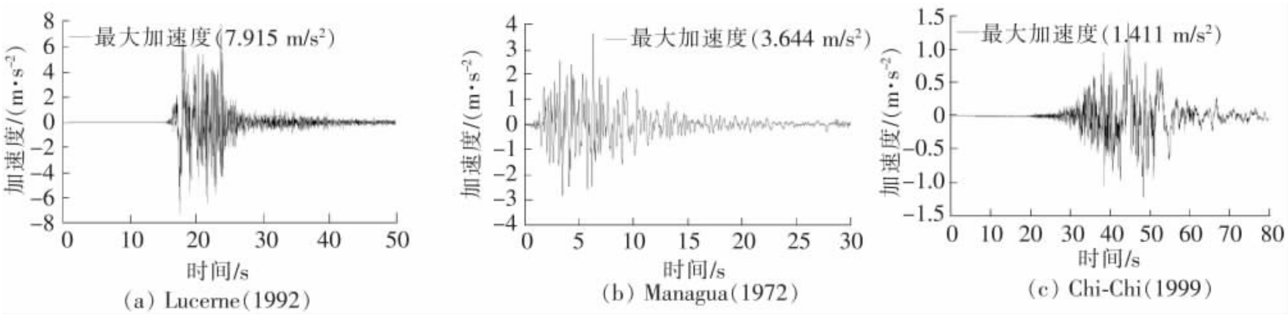


图 10 时域分析的地震纪录的时程

通过时域分析，获得单自由度结构的相对位移 u_1 和加速度反应($\ddot{u}_1+\ddot{u}_g$)。图 11 为单自由度结构的最大反应幅值；图 12(a)表明其它模型与传统模型的相对位移的最大幅值的比值，图 12(b)表明各模型的最大加速度反应值与地震时程最大值的比值，用以表示幅值比。

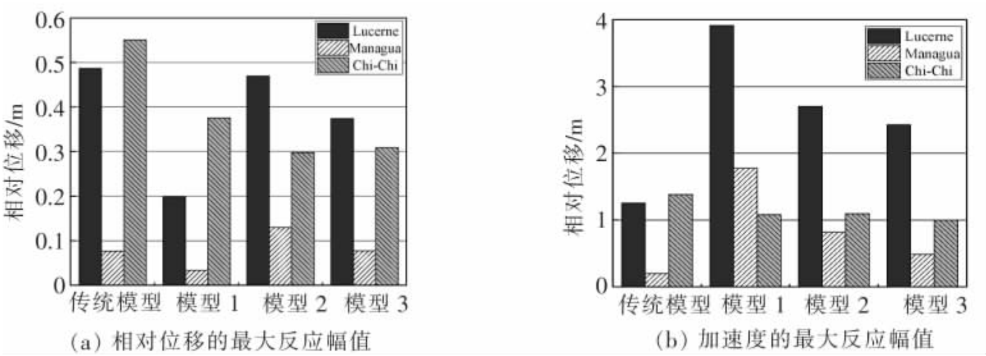


图 11 传统模型与其它模型的最大反应幅值

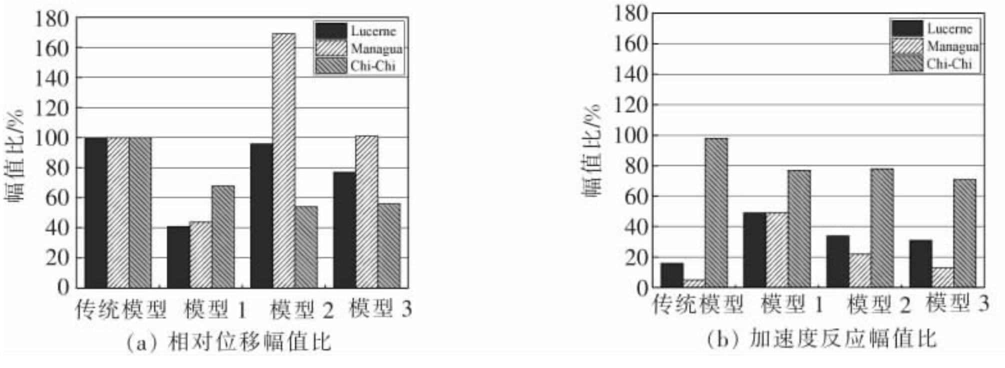


图 12 传统模型与其它模型的反应幅值比对比

图 12(a)可见，阻尼器模型 1 和 3 均有效地降低了相对位移(模型 1 幅值比 59%)。而 Managua 则由于其包含的频率成分扩大了阻尼器模型 2 的相对位移(模型 2 的相对位移比传统模型大 69%)。对于 Chi-Chi 来说，即长周期地震下，图 11 和图 12 表明模型 3 能够显著地降低相对位移和加速度反应。图 12(b)表明，Lucerne 所包含的频率成分导致阻尼器模型 1、2 和 3 的共振(模型 1 的最大加速度甚至达

到 3.912 m/s^2)。阻尼器模型 2 的提出,初衷是为了解决阻尼器模型 1 导致的高频区加速度增大的问题,虽然相对位移和加速度都在随质量比减小,但总体仍呈增大趋势。在长周期时程作用下,模型 3 的相对位移幅值比是 56%,加速度幅值比是 71%,可见,模型 3 中,弹簧/阻尼单元与 VMD 串联可以有效地降低结构的相对位移和加速度反应。

3　结论

(1)忽略摩擦力效应,依据 VMD 的力学模型,提出了 3 种置有 VMD 的模型,阻尼器模型延长了结构的自振周期。

(2) 通过频域分析和时域分析,模型 3 既有效地降低了结构的相对位移,又有效地降低了结构的加速度反应,适用于长周期地震作用下的抗震结构。在 Chi-Chi 等长周期地震时程作用下,模型 1 没有显著地减少结构的相对位移及加速度反应,因此,在软土场地,应该小心地使用该类型阻尼器元件。

参　考　文　献

[1]王淼,顾萍.半穿式钢桁梁桥横向振动 TMD 阻尼减振研究[J].石家庄铁道学院学报,2006,19(1):14-17.

[2]Saitoh M. On the performance of gyro-mass devices for displacement mitigation in base isolation systems[J]. Structural Control & Health Monitoring, 2012, 19(2):246-259.

[3]Hwang J S, Kim J, Kim Y M. Rotational inertia dampers with toggle bracing for vibration control of a building structure [J]. Engineering Structures, 2007, 29(6): 1201-1208.

[4]Saito K, Sugimura Y, Inoue N. A study on response control of a structure using viscous damper with inertial mass[J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 54:623-648.

[5]Ikago K, Saito K, Inoue N. Seismic control of single-degree-of-freedom structure using tuned viscous mass damper[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41(3): 453-474.

[6]涂文戈,邹银生.MTMD 减震结构体系的频域分析[J].工程力学,2003,20(3):78-88.

Frequency-domain and Time-domain Analysis of Viscous Mass Damper Model

Cao Zhimou,　Fan Tao

(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: In this study, ignoring the effect of friction, considering inertial effectiveness and damping effectiveness, a mechanical model of viscous mass damper (VMD) is founded. Three single degree of freedom(SDOF) systems equipped with VMD are proposed to make analysis on non-dimensional parameters. Frequency-domain and time-domain analysis of VMD is used to study vibration-reduction effect. Finally, the effectiveness of three SDOF systems is compared. The result shows that VMD extends the vibration period, particularly, the proposed damper model 3 of SDOF systems can significantly reduce displacement response and acceleration response for long-period earthquakes.

Key words: SDOF systems; viscous mass damper; natural vibration period; frequency-domain analysis; time-domain analysis