超星·期刊

第25卷第3期 华东交通大学学报 Vol. 25 No. 3
2008年6月 Journal of East China Jiaotong University Jun. ,2008

文章编号:1005-0523(2008)03-0032-04

# 粘弹性阻尼器隔震结构的振动控制研究

胡智渊

(南昌市第一建筑工程公司,江西 南昌 330009)

**摘要:** 对设置粘弹性阻尼且基础隔震结构的混合振动控制问题进行了研究. 采用开尔文模型模拟粘弹性阻尼器所产生的非线性力,推导出混合控制的运动微分方程,结合线性二次型最优控制理论(LQR),用MATLAB编制相应的动态仿真程序进行动态仿真. 研究结果表明:设置粘弹性阻尼器隔震结构采用混合控制是有效的,结构的隔震层相对位移和顶层位移反应大大降低.

**关 键 词:** 混合控制;粘弹性阻尼;基础隔震;线性二次型

**中图分类号:** TU352.1 **文献标识码:** A

近年来,结构振动控制从理论到实践取得了长足的发展,其中结构混合控制更成为研究的热点. 混合控制系统可以由主动控制、半主动控制和被动控制三者互相结合,取长补短,以达到控制的最优效果[1].

粘弹性阻尼器是一种有效的耗能减震装置,作为典型的速度相关型阻尼器,它是通过粘弹性材料的滞回变形来减小结构振动反应的,其力-位移滞回曲线为椭圆型[2],消能能力比与位移相关的消能减振装置强得多,并且只要有微小的振动,就能减振. 橡胶垫基底隔震技术是目前工程减震中最常用的技术. 采用叠层橡胶隔震时,怎样确保橡胶垫隔震层的安全是一个非常重要的问题[3],因为橡胶垫在强烈地震作用下可能由于水平变形过大而发生破坏. 基于这种思想,同时考虑到对上部结构进行控制,研究了在隔震层连接作动器,通过作动器施加控制力来控制橡胶垫的水平变形,并在上部结构布置粘弹性阻尼器来控制上部结构的变形的混合控制系统.

## 1 粘弹性阻尼器的计算模型

粘弹性阻尼器由粘弹性材料和约束钢板组成[4]. 常用的粘弹性阻尼器如图1所示. 其耗能性能见文献[5],常用开尔文模型来描述其耗能性能.

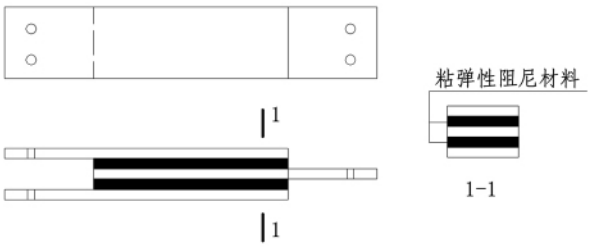


图1 粘弹性阻尼器基本形式

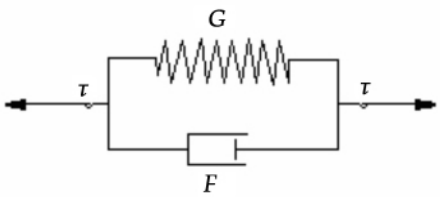


图2 开尔文模型

开尔文模型将粘弹性阻尼器模拟成一个弹性元件和粘壶元件相并联(如图2所示),其本构方程为

$$\tau = G\gamma + F\dot{\gamma} \tag{1}$$

式中:$G$ 和 $F$ 分别为由粘弹性材料性能确定的系数.

由式(1)可写出粘弹性阻尼器的力-位移关系式

$$r = A'_1\Delta + A'_2\dot{\Delta} = k_e\Delta + c_e\dot{\Delta} \tag{2}$$

式中:$A'_1$,$A'_2$ 为系数,$k_e$,$c_e$ 分别为粘弹性阻尼器的等价刚度和等价阻尼. 用随机等价线性化理论

收稿日期:2008-01-17

作者简介:胡智渊(1976-),男,江西南昌人,南昌市第一建筑工程公司工程师,研究方向为高层建筑抗震.

超星·期刊



可得

$$k_e = \frac{nnG'A}{t} \tag{3}$$

$$c_e = \frac{nnG''A}{\omega t} \tag{4}$$

式中: $G'$,$G''$分别为粘弹性材料的储能剪切模量和损耗剪切模型; $nn$ 为粘弹性阻尼器的粘弹性层数; $t$ 为粘弹性层厚度; $A$ 为粘弹性层面积; $\omega$ 为激励频率,常取结构的第 1 自振频率.

## 2　设置粘弹性阻尼器隔震结构的混合控制系统的分析模型

### 2.1　在地震作用下的动力方程

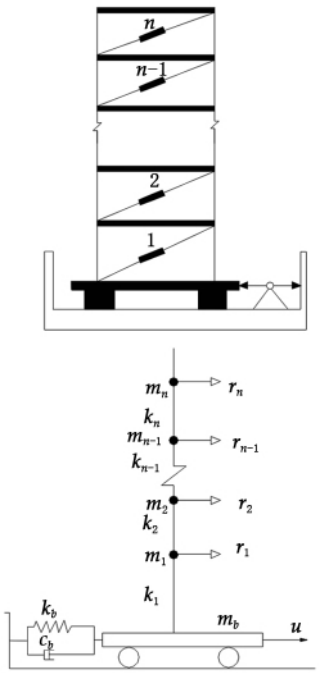


图 3　混合控制系统结构及计算模型

图 3 为 $n$ 层基础隔震结构,在每层设置粘弹性消能支撑[6],在隔震层放置作动器组成混合控制体系,隔震层采用叠层橡胶支座,并假设为等效线性化模型. 则该结构的一维水平振动方程具有 $n+1$ 个自由度,其运动微分方程为[7,8]

$$M_0\ddot{x} + C_0\dot{x} + K_0x + r = D_sF + B_sU \tag{5}$$

$$r = A_1\dot{x} + A_2x \tag{6}$$

$$x(0) = \dot{x}(0) = 0 \tag{7}$$

式中: $M_0$,$C_0$ 和 $K_0$ 分别为原结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $x$、$\dot{x}$、$\ddot{x}$ 分别为层间的位移、速度、加速度向量; $D_s$、$B_s$ 为控制力的位置矩阵; 地震干扰力 $F = -M_0\{L\}\ddot{x}_g$; $L$ 为元素均为 1 的 $n+1$ 维列向量; $U$ 为控制力向量; $r$ 为阻尼器贡献给结构的非线性力矩阵; $A_1$,$A_2$ 为非线性力的系数矩阵,由式(2)中的 $A'_1$,$A'_2$ 求得. $M_o$、$C_o$、$K_o$、$D_s$、$B_s$、$U$、$A_1$、$A_2$ 的组集方法详见文献[8、9].

定义

$$Z = \begin{bmatrix} X \\ \dot{X} \end{bmatrix}_{2(n+1)\times 1} \tag{8}$$

为结构的状态向量,在状态空间中,由式(5)描述的运动方程可以用如下状态方程表示

$$\dot{Z} = AZ + BU + DF \tag{9}$$

式中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_0^{-1}(K_0 + A_2) & -M_0^{-1}(C_0 + A_1) \end{bmatrix},$$

$B = \begin{bmatrix} 0 \\ -M_0^{-1}B_s \end{bmatrix}$; $D = \begin{bmatrix} 0 \\ -M_0^{-1}D_s \end{bmatrix}$. 其中 0 和 $I$ 分别为 $(n+1)\times(n+1)$ 维的零矩阵和单位矩阵,$n$ 为结构物层数.

### 2.2　混合控制算法

对于混合控制系统的状态方程(9),采用线性二次型经典最优控制(LQR),定义系统的二次性能泛函为[9]

$$J = \frac{1}{2}\int_0^\infty [Z^TQZ + U^TRU]\,\mathrm{d}t \tag{10}$$

其中: $Q$、$R$ 分别为结构状态响应加权矩阵和控制力向量加权矩阵

$$Q = \alpha\begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix};\ R = \beta I$$

式中: $\alpha$、$\beta$ 为待定系数,取值方法详见文献[1]. 根据极值条件 $\frac{\partial J}{\partial U} = 0$,可求得系统的最优控制力为

$$U = -GZ \tag{11}$$

式中: $G$ 是最优状态反馈增益矩阵

$$G = R^TB^TP(t) \tag{12}$$

式中: $P$ 是如下形式的 Riccati 矩阵代数方程的解

$$-PA - A^TP + PBR^{-1}B^TP - Q = O \tag{13}$$

## 3　算例分析

某 5 层钢筋混凝土框架结构,在框架结构下安置叠层橡胶隔震器. 按 8 度设防考虑,1 至 5 层质量均为 $2.8\times10^4$ kg,层间剪切刚度为 $3.2\times10^6$ N/m,层高均为 3.3 m,隔震层的质量和层间刚度分别为 $2\times10^4$ kg 和 $4\times10^5$ N/m. 上部框架阻尼采用 Rayleigh 阻尼,由前二阶振型阻尼比确定,假定阻尼比为 $\zeta_1 = \zeta_2 = 0.05$,隔震层阻尼比为 0.1. 在隔震层实

超星·期刊



施主动控制，控制参数调至 $\alpha = 150$，$\beta = 1 \times 10^{-5}$，粘弹性阻尼器采用 2 层粘弹性层的常用阻尼器，其特性参数为储能剪切模量 $G_1 = 1.5 \times 10^7$ N/m$^2$、损耗剪切模量 $G_2 = 2.01 \times 10^7$ N/m$^2$、粘弹性阻尼器中粘弹性层的剪切面积 $A_v = 3 \times 10^{-3}$ m$^2$、粘弹性层的厚度 $h_v = 1.3 \times 10^{-2}$ m，工作温度为 25℃. 地震波选用 El－Centro( NS，1940) 地震波，加速度峰值调至 200 Gal，基于上述条件，对结构采取以下工况① 基础隔震；② 隔震层施加主动控制；③ 设置粘弹性阻尼器的混合控制；采用 Matlab 语言对各工况进行数值仿真，结果见表 1 和图 4～图 7.

表 1 隔震结构最大地震响应

| | 最大位移( cm) | | | 最大加速度( m/s$^2$) | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 隔震层 | 顶层位移 | 层间位移 | 隔震层 | 顶层加速度 |
| 工况① | 7.00 | 8.51 | 0.73 | 1.85 | 2.08 |
| 工况② | 3.53 | 6.85 | 1.95 | 2.60 | 2.69 |
| 工况③ | 0.98 | 2.34 | 0.5 | 1.04 | 2.56 |

注：0 为隔震层

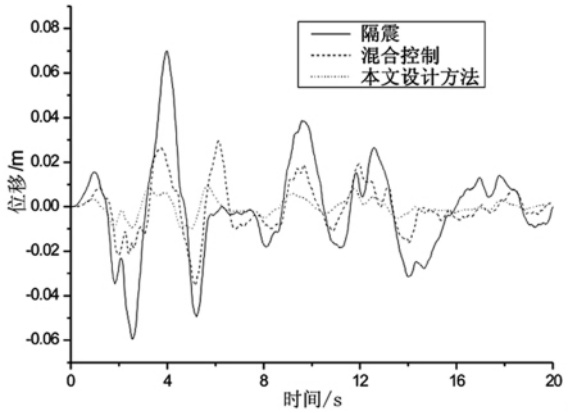


图 4 隔震层位移响应曲线

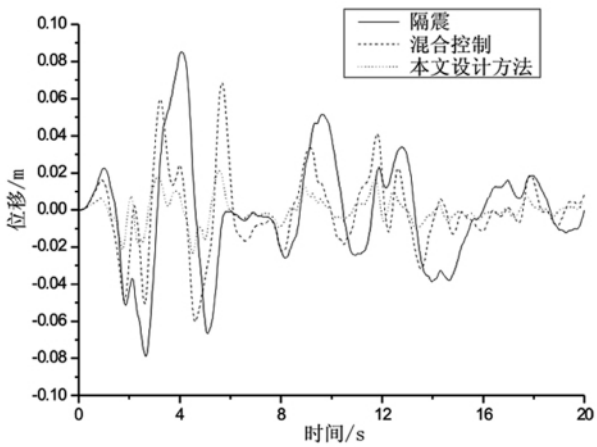


图 5 顶层位移响应曲线

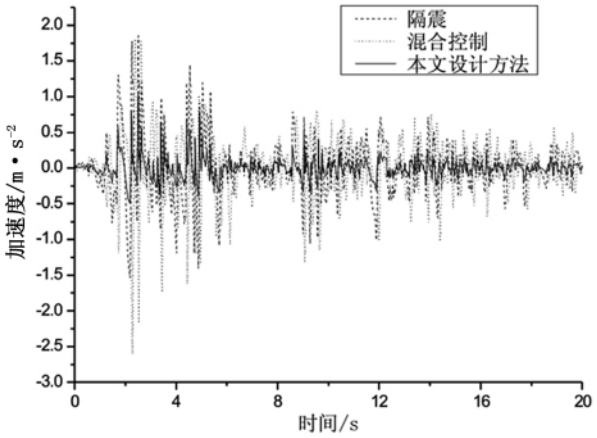


图 6 隔震层加速度响应曲线

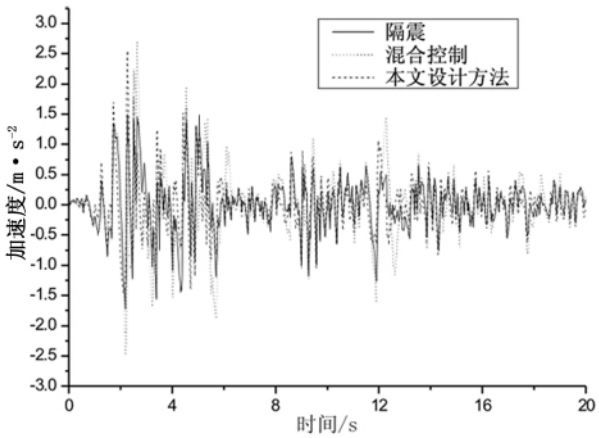


图 7 顶层加速度响应曲线

### 3.1 控制效果分析

从仿真数据可以看出，单独采用基础隔震，底部的隔震层位移和加速度较大，同时层间位移和顶层加速度都很大. 当对隔震层进行主动控制后，隔震层位移明显减小，约 50%. 同时顶层位移也得到了控制，然而层间位移和隔震层加速度反而增大，说明混合控制对加速度起到了放大的作用. 按照本设计方法，对上部结构安装了粘弹性阻尼器后，隔震层位移减小了约 80%，同时顶层位移和隔震层加速度也减小了，层间位移仅为原来的 68%，且层间变形沿高度方向分布较均匀，从 1 层到 5 层分别为 0.5、0.4、0.3、0.2、0.1( 单位: cm) ，这样有利于结构各部件受力较均匀，所有楼层构件都能发挥其抗震作用. 因此，对上部结构设置粘弹性阻尼器的混合控制对隔震层的位移及加速度起到了很好的控制效果，并且粘弹性阻尼器具有安装简单、造价低廉、性能优良、不会使结构系统发生不稳定等特点，具有广泛的工程应用前景.

超星·期刊



## 4　结论

通过以上实例分析与计算,可以得出以下结论:

(1) 对隔震结构隔震层进行主动控制后,大大减小了隔震层的位移,提高了隔震层的安全性,然而增大了层间位移和隔震层加速度.

(2) 对隔震建筑物上部结构引入粘弹性阻尼器,能够产生较强的耗能控制力,减小了隔震层及顶层位移与加速度,显著地增加了整个结构的耗能能力,并提高了整体室内舒适度,达到了对整个结构振动控制的目的.

**参考文献:**


[1] 赵　斌,吕西林,等. 基础隔震建筑混合控制的变结构趋近律方法 [J]. 地震工程与工程振动,2000,19(3):96 – 101.

[2] 王烨华,周　云,等. 粘弹性阻尼减震结构研究与应用的新进展 [J]. 防灾减灾工程学报,2006,26(1):109 – 120.

[3] 马玉宏,刘　季,等. 主动 – 基底隔震混合控制系统的研究 [J]. 哈尔滨建筑大学学报,2000,33(4):8 – 10.

[4] 徐赵东,赵鸿铁,等. 粘弹性阻尼结构的现代控制理论分析 [J]. 西安建筑科技大学学报,2000,32(2):108 – 111.

[5] B. Samali, K. C. S. Kwok. Use of viscoelastic dampers in reducing wind and earthquake induced motion of building structures [J]. Engineering Structures, 1995, 17(9): 639 – 654.

[6] 常业军,张富有,等. 粘弹性消能结构的抗震设计反应谱及其工程应用 [J]. 振动与冲击,2006,25(3):54 – 57.

[7] 吴子燕,赵玉立. 抗震结构振动混合最优控制 [J]. 西北工业大学学报,2000,18(4):539 – 543.

[8] 邹立华. 工程结构减振控制研究 [D]. 成都: 西南交通大学,2004.

[9] 欧进萍. 结构振动控制 [M]. 北京: 科学出版社,2003.


# Study on the Vibration Control of a Base – isolation Structure with Viscoelastic Damper


**HU Zhi – yuan**

(Nanchang No. 1 Construction Engineeling Company, Nanchang 330009, China)



**Abstract:** In this paper, the hybrid control of a viscoelastic structure with base – isolation has been researched. The energy dissipation ability of the visco – elastic damper is simulated by KELVIN model. Based on the modern control theories, the differential equations of the motion of the hybrid controlled structure are derived with dynamic simulation carried out through the MATLAB. The study results show that the hybrid control for the base – isolation structure with viscoelastic damper can improve efficiency of control for vibration.



**Key words:** hybrid control; viscoelastic damper; base – isolation; linear quadratic

(责任编辑: 刘棉玲)