

• 水利与土木工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201901126



本刊网刊

基于主动控制优化被动黏滞阻尼器及混合隔震研究

张冠平^{1,2}, 刘彦辉^{1,2*}, 谭平^{1,2}, 金建敏^{1,2}

(1.广州大学 工程抗震研究中心, 广东 广州 510405; 2.广州大学 工程抗震减震与结构安全教育部重点实验室, 广东 广州 510405)

摘 要:针对隔震结构在超防烈度下隔震层位移响应过大问题, 提出了基于主动控制算法优化被动黏滞阻尼器的策略。并将被动黏滞阻尼器安装于基础隔震结构形成被动混合控制结构, 采用此被动混合控制能够基本实现主动混合控制的控制效果, 实现以更加经济简便的方式解决隔震结构在超防烈度下隔震层位移响应过大问题。首先, 将主动控制装置设置于隔震层形成主动混合隔震控制体系, 采用主动控制算法获取隔震层主动控制力与速度特性; 其次, 利用主动控制力与速度关系曲线, 通过最小二乘法拟合被动黏滞阻尼器的最优阻尼系数与速度指数, 最后将设计出的被动黏滞阻尼器安装于隔震层, 形成被动混合隔震控制体系。以 1 栋 7 层基础隔震结构为受控模型, 通过对主动混合隔震控制体系与被动混合隔震控制体系的仿真分析可知: 主动混合隔震控制对隔震层位移的减震率分别为 39.41%、45.04% 及 55.54%; 被动混合隔震控制对隔震层位移的减震率分别为 36.40%、44.30% 及 52.51%。被动混合隔震控制对于隔震层位移的减震率能够达到主动混合隔震控制效果的 90% 以上, 被动混合隔震控制对于隔震层加速度响应的减震率能够达到主动混合隔震控制的 60% 以上, 被动混合控制也同样实现了减小隔震层地震响应的同时不增加上部结构的响应。依据主动控制算法设计的被动黏滞阻尼器形成的被动混合控制结构能够基本实现主动控制的效果, 说明依据主动控制设计被动黏滞阻尼器实现主动控制效果的思想的可行性。

关键词:基础隔震结构; 主动控制算法; 被动黏滞阻尼器; 混合控制体系

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2020)03-0070-08

Study on Optimization of Passive Viscous Damper and Passive Hybrid Control Seismic Response

ZHANG Guanping^{1,2}, LIU Yanhui^{1,2*}, TAN Ping^{1,2}, JIN Jianmin^{1,2}

(1. Earthquake Eng. Research & Test Center, Guangzhou Univ., Guangzhou 510405, China; 2. Key Lab. of Earthquake Resistance, Earthquake Mitigation and Structure Safety, Guangzhou Univ., Guangzhou 510405, China)

Abstract: In order to solve the problem that the displacement response of isolation layer is too large in the case of the isolated structure under the super intensity, the strategy of optimizing the passive viscous damper based on the active control algorithm was proposed. The passive viscous damper was installed in the foundation isolation structure to form the passive hybrid control structure, and the passive hybrid control basically achieved the control effect of active hybrid control, so as to solve the problem that the displacement response of isolation layer was too large under the super intensity. First set the active control device in the isolation layer to form active hybrid vibration isolation control system, the active control method for isolation layer of active control and speed characteristic, secondly, using the active control force and velocity curve, fitting by the least squares method of passive viscous dampers optimal damping coefficient and the speed index, finally designing a passive viscous dampers installed in isolation layer, forming a passive hybrid vibration isolation control system. Taking a seven-story foundation isolation structure as the controlled model, and conducting the simulation analysis of the active hybrid isolation control system and the passive hybrid isolation control system, it could be seen that the active hybrid isolation control could reduce the displacement of the isolation layer by 39.41%, 45.04% and 55.54%.

收稿日期: 2019-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778163); 广州市属高校科研项目(1201620162); 广东省高校创新团队项目(2016KCXTD016)

作者简介: 张冠平(1991—), 男, 博士生. 研究方向: 结构工程隔震、减震以及抗震. E-mail: zhangguanping@e.gzhu.edu.cn

* 通信联系人 E-mail: liuyanhu2012@163.com

网络出版时间: 2020-04-20 15:49:00

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20200420.1100.004.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

respectively. The shock absorption rates of passive hybrid isolation control on the displacement of isolation layer were 36.40%, 44.30% and 52.51%, respectively. Passive hybrid vibration isolation control for displacement of isolation layer damping rate could reach more than 90% of the active hybrid vibration isolation control effect, passive hybrid vibration isolation control for the acceleration response of the isolation layer damping rate could reach more than 60% of the active hybrid vibration isolation control, passive hybrid control was also achieved at the same time reduce the earthquake response of the isolation layer not to increase the response of the upper structure, based on the active control algorithm design of passive viscous damper passive hybrid control structures basically achieved the effect of the active control. The feasibility of designing passive viscous damper based on active control was illustrated.

Key words: foundation isolation structure; active control algorithm; passive viscous damper; hybrid control system

结构振动是影响建筑物安全性及舒适性的主要因素之一,为了减小建筑结构在地震激励下的响应,有学者提出结构振动控制的概念^[1]。基础隔震是在上部结构与基础之间设置隔震垫,延长结构的自振周期,降低结构物的地震响应,实现对建筑物的振动控制。基础隔震技术近年来得到广泛的应用。但是,基础隔震结构在长周期地震波的激励下,隔震层会产生过大的层间位移,导致隔震支座失稳^[2],最终导致建筑物振动控制失效。为了解决基础隔震结构在强地震激励下隔震层产生过大位移问题,有学者提出在隔震层处设置阻尼器作为限位装置。Kelly^[3]在隔震层设置阻尼器以减小隔震层的位移,但是激发了结构的高阶震型,从而增加了基础隔震上部结构的响应。Hall^[4]证明了在隔震层设置阻尼器,可以在减小隔震层位移的同时减小上部结构的响应。Ziyaeifar等^[5]发现阻尼器会削弱隔震结构的减震效果,增加上部结构的地震响应。Providakis^[6-7]说明了基础隔震上部结构的响应与近震远震有关。Jangid等^[8]指出近震作用下,阻尼器虽然可以减小隔震层的位移,但同时增加了上部结构的响应。Politopoulos^[9]发现正确选用阻尼器的阻尼比能够降低上部结构的响应。

在解决隔震层设置阻尼器减小隔震层位移的问题时,除了研究设置的阻尼器对于隔震层及上部结构影响之外,王明旭等^[10]对阻尼器的安装位置,参数优化做了研究,其通过分步优化法,研究了振动系统中阻尼器位置及参数优化问题,得到了相应部位上的阻尼器优化参数。Chang等^[11]开发了一种基于主动控制算法的调谐质量阻尼器设计程序。此外,Chang等^[12-13]利用主动控制系统与被动控制系统之间的相似性,提出通过线性二次算法同时确定基础隔震体系刚度和阻尼系数的设计方法。刘彦辉等^[14]提出流体黏性阻尼器对提高隔层建筑抗震性能是有效的。利用主动控制算法设计被动阻尼器取得了一定的成果,但是利用主动控制算法优化黏滞阻尼器参数的研究相对较少。作者依据经典最优控制算法(linear quadratic regulator, LQR)^[15]设计被动黏滞阻尼器的策略。以1栋7层基础隔震结构作为仿真模型,将主动

控制装置设置于隔震层,获得隔震层速度与最优控制力,根据隔震层的速度和最优控制力拟合阻尼器的阻尼系数与速度指数,采用阻尼系数与速度指数设计阻尼器。将设计出的阻尼器安装于隔震层形成被动混合隔震控制结构,对被动混合隔震控制结构进行仿真,分析其对于隔震层及上部结构的减震效果,并与主动混合隔震控制结果相比较,根据被动混合隔震控制对隔震层及上部结构的减震率,以及被动混合隔震控制可以达到的主动混合隔震控制效果的百分率,证明以主动控制算法设计被动黏滞阻尼器策略是可行的。

1 运动方程及减震装置力学模型

1.1 运动方程的建立

为了论证以主动控制算法优化被动黏滞阻尼器参数思想的可行性,假设结构在混合控制下,上部结构与隔震层均发生弹性变形。采用层间切模型对结构进行简化。计算模型如图1所示。建立结构的运动方程如式(1)所示:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) + \mathbf{r}F_v(t) = -\mathbf{M}\mathbf{I}\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}$ 和 $\mathbf{K}$ 为结构的质量矩阵和刚度矩阵; $\mathbf{C}$ 为结构的阻尼矩阵; $\ddot{\mathbf{x}}(t)$ 、 $\dot{\mathbf{x}}(t)$ 和 $\mathbf{x}(t)$ 分别为结构各层的加速度、速度和位移向量; $\mathbf{r}$ 为控制力或阻尼力的位置向量,为 $[1, 0, \dots, 0]^T$; $F_v(t)$ 为控制力或阻尼力; $\mathbf{I}$ 为单位列向量 $[1, 1, \dots, 1]^T$; $\ddot{u}_g(t)$ 为地震动加速度。

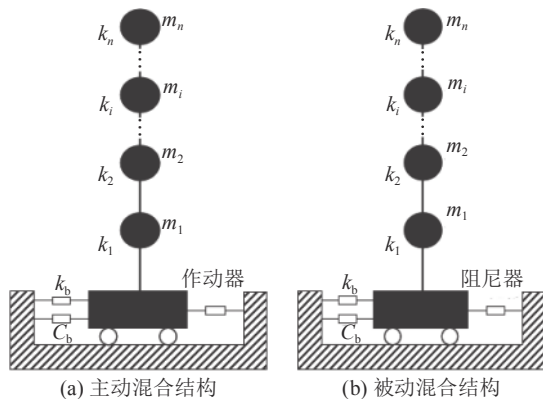


图1 计算模型

Fig. 1 Calculation model

由于基础隔震结构的上部结构与隔震层阻尼比相差较大,故采用分区瑞雷阻尼^[16]方法得到阻尼矩阵,基础隔震结构分区瑞雷阻尼模型的表达式为:

$$\boldsymbol{C}=\boldsymbol{C}_0+\boldsymbol{C}_r$$

(2)

其中: $\boldsymbol{C}_0$ 为瑞雷阻尼矩阵,如式(3)所示; $\boldsymbol{C}_r$ 为余项阻尼矩阵,如式(4)所示:

$$\boldsymbol{C}_0=\alpha_s\boldsymbol{M}+\beta_s\boldsymbol{K}$$

(3)

$$\boldsymbol{C}_r=\begin{bmatrix}c_{br}&0\\0&0\end{bmatrix}$$

(4)

$$c_{br}=(\alpha_b-\alpha_t)m_b+(\beta_b-\beta_t)k_b$$

(5)

式中, α_t 、 β_t 为上部结构的瑞雷阻尼比例系数, α_b 、 β_b 为隔震层的瑞雷阻尼比例系数, m_b 、 k_b 为隔震层的等效质量和等效刚度。 α_t 、 β_t 、 α_b 、 β_b 可以由式(6)、(7)求得:

$$\begin{Bmatrix}\alpha_t\\\beta_t\end{Bmatrix}=\frac{2\xi_s}{\omega_i+\omega_j}\begin{Bmatrix}\omega_i\omega_j\\1\end{Bmatrix}$$

(6)

$$\begin{Bmatrix}\alpha_b\\\beta_b\end{Bmatrix}=\frac{2\xi_b}{\omega_i+\omega_j}\begin{Bmatrix}\omega_i\omega_j\\1\end{Bmatrix}$$

(7)

式中, ξ_s 、 ξ_b 分别为上部结构和隔震层的阻尼比, ω_i 、 ω_j 分别为结构的第*i*阶、第*j*阶圆频率。为了便于运用状态空间法求解结构的反应,将式(1)化为状态方程的形式,令 $\boldsymbol{U}=(\boldsymbol{x}(t),\dot{\boldsymbol{x}}(t))^T$,则:

$$\dot{\boldsymbol{U}}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{U}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{F}_v(t)+\boldsymbol{H}\ddot{\boldsymbol{u}}_g(t)$$

(8)

式中,矩阵 $\boldsymbol{A}$ 、 $\boldsymbol{B}$ 、 $\boldsymbol{H}$ 分别可以展开为下列形式:

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}0&\boldsymbol{I}\\-\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{K}&-\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{C}\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}0\\-\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{r}\end{bmatrix},\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}0\\-\boldsymbol{I}\end{bmatrix}。$$

1.2 减震装置力学模型

利用主动控制算法设计的阻尼器为速度相关型黏滞阻尼器,其阻尼力表达式如下:

$$F_{vi}(t)=C|v|^{\alpha}\text{sign}(v)$$

(9)

式中, $F_{vi}(t)$ 为阻尼器产生的阻尼力; C 、 α 分别为阻尼器的阻尼系数与速度指数; v 为阻尼器两端相对速度; $\text{sign}(v)$ 为符号函数,当隔震层的速度为正时,符号函数取值为1,当隔震层速度为负时,符号函数取值为-1,符号函数具体表达式如式(10)所示:

$$\text{sign}(v)=\begin{cases}1,v\geq0;\\-1,v<0\end{cases}$$

(10)

2 主动控制算法及阻尼器参数

2.1 主动控制算法

结构主动控制是由传感器实时收集建筑物的震

动和环境干扰信息,将收集到的信息发送给计算机,计算机依据现代控制理论通过主动控制算法,决策出最优力,并利用主动控制装置的作动器将最优力作用到建筑物,使结构物的反应最小。利用经典最优控制算法,通过性能指标 $\min J$ 获取作动器的控制力。

$$\min J=\int_0^{t_f}\left[\boldsymbol{U}^T(t)\boldsymbol{Q}\boldsymbol{U}(t)+\boldsymbol{u}^T(t)\boldsymbol{R}\boldsymbol{u}(t)\right]dt$$

(11)

式中, $\boldsymbol{U}$ 为结构的状态矩阵, $\boldsymbol{Q}$ 、 $\boldsymbol{R}$ 分别为控制效果权矩阵和控制力权矩阵。

2.2 阻尼器参数拟合流程

为了获取阻尼器的最优参数,首先在隔震层安装主动控制装置,获取结构在地震激励下隔震层的速度向量及主动控制力向量。通过最小二乘法拟合阻尼器的阻尼系数及速度指数,根据拟合出的参数设计黏滞阻尼器,将阻尼器安装于隔震层,实现基于主动控制思想的被动混合控制。具体操作流程如图2所示:

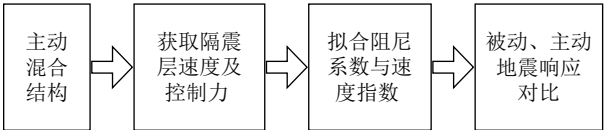


图 2 参数拟合流程

Fig. 2 Process of parameter fitting

3 黏滞阻尼器参数优化

3.1 仿真模型

以某基础隔震结构为例,上部结构为钢筋混凝土框架结构,第一层层高4 m,其余各层层高为3 m,共7层,设防烈度7度(0.15g)。隔震层及上部结构各层质量及刚度见表1。隔震支座的型号、数量和参数见表2。

表 1 结构参数

Tab. 1 Structure parameters

层号	层高/m	层间刚度/(10 ³ kN·m ⁻¹)	质量/t
隔震层	1.0	419.20	7 548.01
1	4.0	9 796.20	5 498.87
2	3.0	5 141.10	5 265.92
3	3.0	3 425.22	5 313.16
4	3.0	3 386.60	5 052.14
5	3.0	2 857.60	4 834.59
6	3.0	2 175.00	3 111.02
7	3.0	1 798.44	707.96

表 2 隔震支座参数

Tab. 2 Isolation bearings parameters

型号	数量	水平刚度/(kN·m ⁻¹)	等效阻尼比
GZY500	17	2 200	0.15
GZY600	44	2 500	0.15
GZY800	44	3 300	0.15
GZY900	22	3 900	0.15

选用3条地震波作为地震动输入,分别为El Centro波、Kobe波及TH002TG045波。其中,El Centro波和Kobe波是天然波,TH002TG045波为人工波。作者研究的是在超防烈度下混合结构的隔震层位移,故将地震波峰值加速度统一调幅为0.3g。

3.2 隔震层动力特性

为了得到隔震层各个响应速度对应的最优控制力,通过仿真分析获取隔震层的动力特性。将3条地震波依次输入主动混合控制结构,主动混合控制结构隔震层位移及加速度时程曲线如图3~5所示。

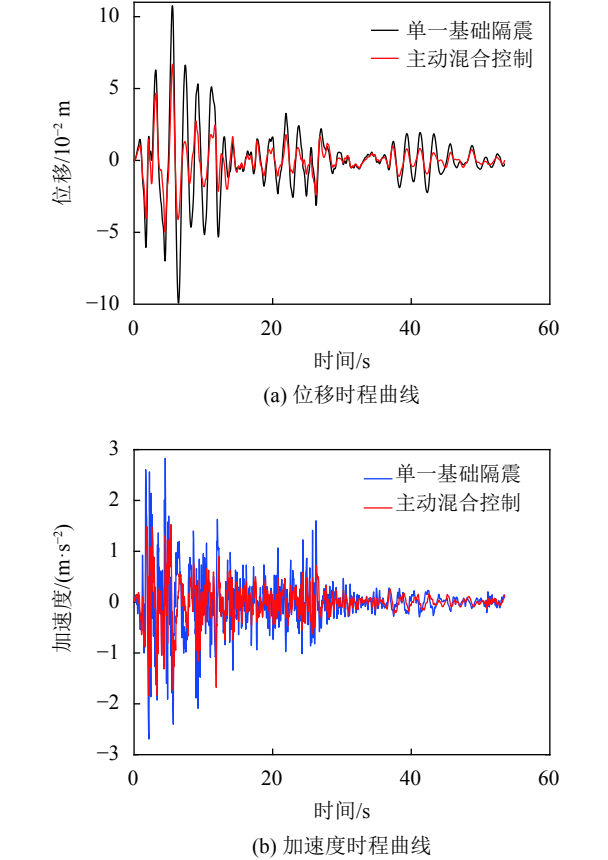


图3 EL Centro波作用下结构隔震层响应曲线
Fig. 3 Response curves of structural isolation layer under the action of EL Centro wave

由图3~5可以看出,主动混合控制可以有效的减小隔震层的位移及加速度地震响应,说明提出的混合控制方法对减小隔震层的地震响应是有效的,故可以依据主动控制算法设计被动黏滞阻尼器。对被动混合控制进行仿真分析,得出其对于隔震层的控制效果,比较被动混合控制与主动混合控制对于隔被动黏滞阻尼器震层的控制效果,说明以主动控制算法设计出的对于隔震层的控制效果接近主动。在3条地震波的激励下,基础隔震结构与主动混合隔震控制结构的隔震层位移,速度及加速度响应峰值如表3所示。

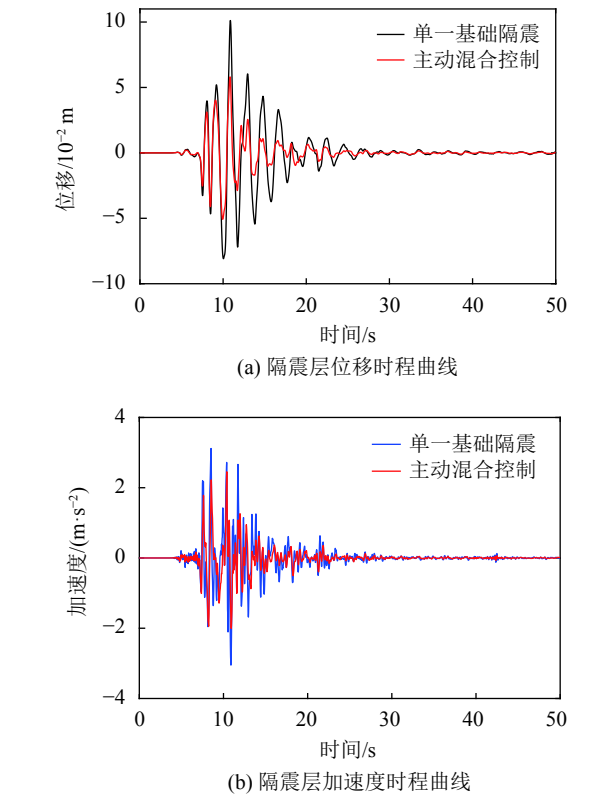


图4 Kobe波作用下结构隔震层响应曲线
Fig. 4 Response curves of structural isolation layer under the action of Kobe wave

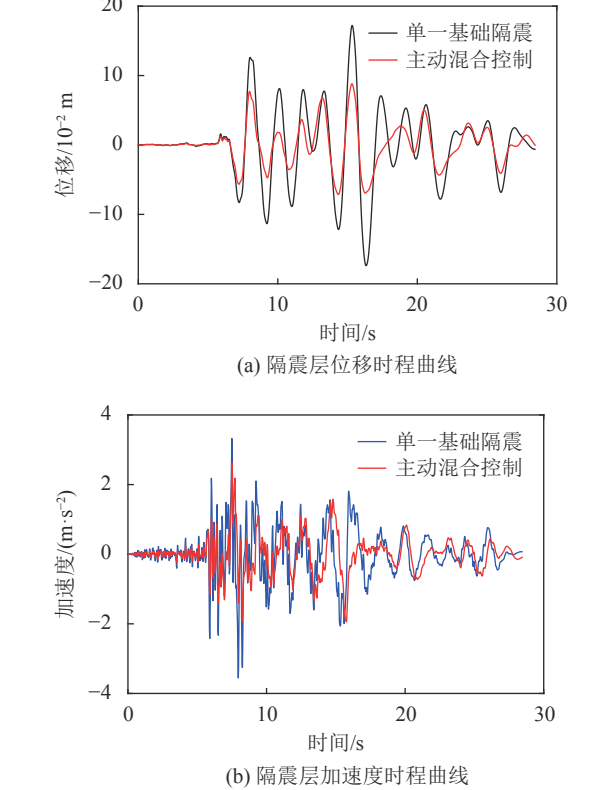


图5 TH002TG045波作用下结构隔震层响应曲线
Fig. 5 Response curves of structural isolation layer under the action of TH002TG045 wave

表 3 3条地震波作用下隔震层地震响应峰值
Tab. 3 Peak values of isolation layer responses under three different waves

	EL Centro波			Kobe波			TH002TG045波		
	位移/mm	速度/(m·s ⁻¹)	加速度/(m·s ⁻²)	位移/mm	速度/(m·s ⁻¹)	加速度/(m·s ⁻²)	位移/mm	速度/(m·s ⁻¹)	加速度/(m·s ⁻²)
基础隔震	107.63	0.37	2.83	101.12	0.48	3.12	173.79	0.65	3.55
主动混合控制	66.88	0.23	1.84	58.08	0.31	2.45	88.18	0.33	2.62

由表3可知,在3条地震波的激励下,主动混合控制对隔震层位移峰值减震率分别为37.86%、2.56%、48.90%;对加速度峰值的减震率分别为34.98%、21.47%、26.20%,主动混合控制能够有效的减小隔震层地震响应。根据隔震层速度与主动控制力的关系曲线,拟合阻尼器的最优阻尼系数与速度指数。隔震层在地震的激励下产生位移,阻尼器可以根据隔震层的速度响应产生相应于主动控制力的阻尼力。

3.3 参数优化

结构在所选用的3条地震波依次激励下,可以得到隔震层的主动控制力与隔震层速度的关系曲线,3条地震波激励下隔震层速度与主动控制力的关系曲线如图6所示。根据隔震层主动控制力与速度之间的关系拟合被动黏滞阻尼器的阻尼系数与速度指数。

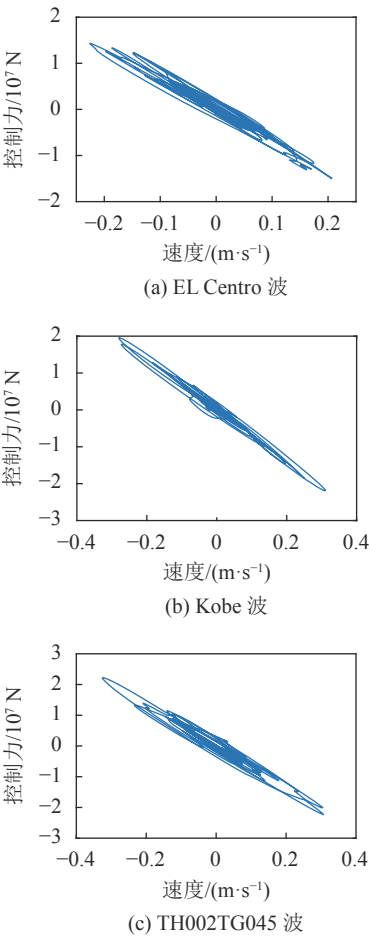


图 6 3条地震波激励下隔震层控制力-速度的关系曲线
Fig. 6 Curves of control force and velocity of isolation layer excited by three seismic waves

由图6可知,隔震层速度与控制力规律性一致。依据式(9),应用最小二乘法分别拟合3条地震波激励下阻尼器的阻尼系数与速度指数,并且整合3条地震波激励下隔震层的速度及控制力特性,拟合阻尼器阻尼系数与速度指数。拟合结果如表4所示。

表 4 阻尼系数与速度指数
Tab. 4 Damping coefficient and velocity exponent

地震波	阻尼系数C	速度指数α
EL Centro	68 940 000	0.99
Kobe	69 110 000	0.97
TH002TG045	67 320 000	0.98

由表4可知,在各条地震波的激励下拟合出的阻尼系数与速度指数较为接近,说明结构在不同地震波的激励下,呈现出隔震层控制力与隔震层速度相关性较强,而与地震波的相关性较弱。所以,将3条地震波激励下隔震层的速度与隔震层的控制力特性整合,拟合出具有代表性的阻尼器参数,拟合出的阻尼系数为 $6.818 \times 10^4 \text{ kN}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$,速度指数为0.98。

4 主动、被动混合隔震控制仿真对比分析

在不同的地震波作用下,隔震层速度与控制力具有差异,据此拟合出的阻尼系数与速度指数也具有一定的差异。为了在任意一条地震波激励下,结构取得良好的控制效果,故而需要应用具有代表性的阻尼系数与速度指数设计阻尼器。将此阻尼器作为被动控制装置,对结构进行被动混合控制分析,对比被动混合控制与主动混合控制的结果,证明利用主动控制技术设计被动黏滞阻尼器思想是可行性的。

采用具有代表性的阻尼系数与速度指数设计阻尼器,并将此阻尼安装于基础隔震结构隔震层构成被动混合控制结构。依次输入所选用的3条地震波,得出基础隔震结构在被动混合控制下的减震效果,并于主动混合控制结构的结果示于同一个图中(图7~9),以便对比分析主动、被动混合控制对于结构的减震效果。

由图7(a)、8(a)、9(a),隔震层位移时程曲线可知:相对于单一的基础隔震,在主动混合隔震控制和被动混合隔震控制下隔震层的位移响应都有大幅度的降低。由图7(b)、8(b)、9(b)各层层间位移峰值可知,主动混合控制与被动混合控制都可以在不增加

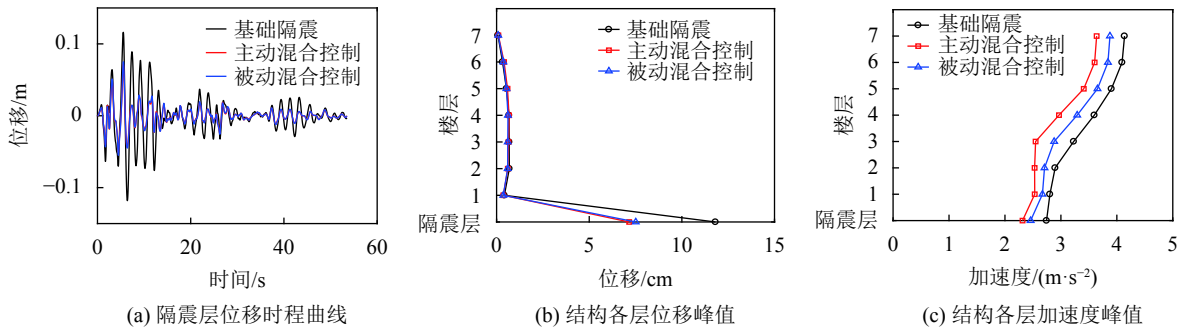


图7 EL Centro波激励下结构地震响应

Fig. 7 Structural seismic response under EL Centro wave excitation

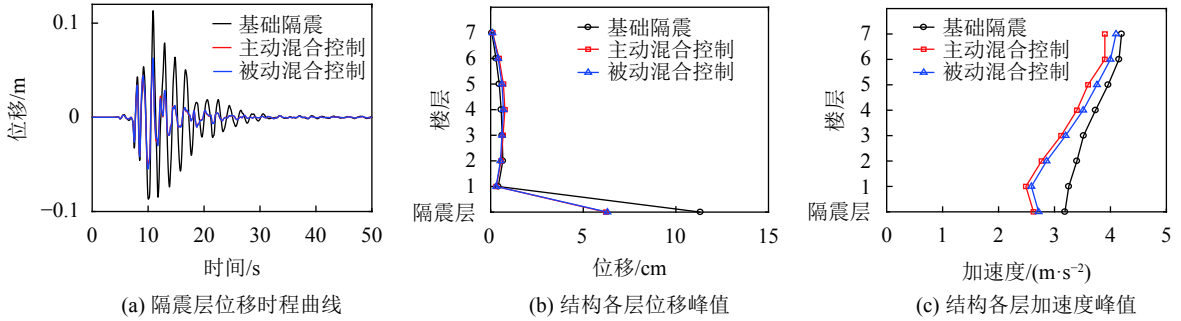


图8 Kobe波激励下结构地震响应

Fig. 8 Structural seismic response under Kobe wave excitation

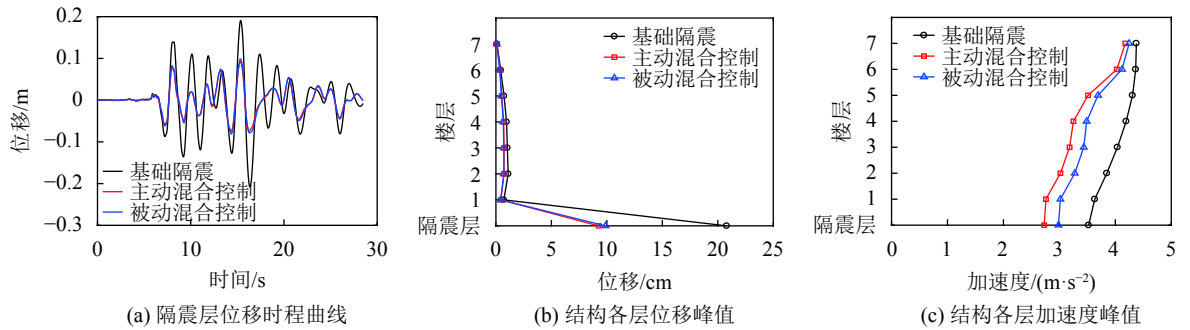


图9 TH002TG045波激励下结构地震响应

Fig. 9 Structural seismic response under TH002TG045 wave excitation

上部结构响应的同时,减小隔震层的位移响应。在3条地震波作用下,基础隔震结构,主动、被动混合结构各层层间位移峰值及减震率如表5所示。由图7(c)、8(c)、9(c)各层加速度峰值可知,两种混合控制体系各层绝对加速度都比基础隔震的小,并且被动控制的减震效果接近于主动控制。基础隔震结构各层的加速度峰值及主动、被动混合控制体系各层加速度峰值如表5所示。

由表5可知,两种混合控制体系在减小隔震层地震响应的同时,也能够减小上部结构的地震响应。在3条地震波的激励下,主动混合体系对于隔震层位移的减震率分别为39.41%、45.04%和55.54%。被动混合体系对于隔震层位移的减震率分别为36.40%、

44.30%和52.51%。被动混合控制分别达到主动混合控制效果的92.36%、97.58%和94.54%,说明依据主动控制算法优化被动黏滞阻尼器参数的策略是可行的。

由表5可知,两种混合控制体系在减小隔震层绝对加速度的同时,也减小了结构各层的绝对加速度。在三条地震波的作用下,主动混合控制体系对于隔震层绝对加速度的减震率分别为15.69%、17.55%和22.44%;被动混合控制体系对于隔震层绝对加速度的减震率分别为10.22%、14.73%和15.34%。被动混合控制分别能够达到主动混合控制效果的65.14%、83.93%和68.36%,从绝对加速度的减震率方面再一次证明依据主动控制算法优化被动黏滞阻尼器参数策略是可行的。

表 5 3条地震波作用下隔震层位移及加速度减震率

Tab. 5 Displacement and acceleration damping of the isolation layer under the action of three seismic waves					
地震波	结构	位移峰值/cm	位移减震率/%	加速度峰值/(m·s ⁻²)	加速度减震率/%
EL Centro	基础隔震	11.81	—	2.74	—
	被动混合控制	7.51	36.40	2.46	10.22
	主动混合控制	7.16	39.41	2.31	15.69
Kobe	基础隔震	11.32	—	3.19	—
	被动混合控制	6.31	44.30	2.72	14.73
	主动混合控制	6.22	45.04	2.63	17.55
TH002TG045	基础隔震	20.80	—	3.52	—
	被动混合控制	9.88	52.51	2.98	15.34
	主动混合控制	9.25	55.54	2.73	22.44

5 结 论

基于主动控制算法优化被动黏滞阻尼器的策略,根据主动控力与速度的关系拟合阻尼器的阻尼系数与速度指数,以被动混合隔震控制实现结构的主动混合隔震控制。首先,将主动控制装置安装于基础隔震结构的隔震层,通过仿真分析获取隔震层的最优控制力-速度关系曲线;然后,拟合出被动黏滞阻尼器的阻尼系数与速度指数。最后,将被动黏滞阻尼器安装于基础隔震结构的隔震层,通过仿真分析证明所研发的阻尼器能够有效的减小隔震层的地震响应。主要结论如下:

1)基于主动控制算法优化被动黏滞阻尼器的策略是可行的。通过对主动混合控制的仿真得到隔震层的控制力-速度曲线,采用最小二乘法对控制力-速度曲线进行拟合,得到被动黏滞阻尼器的阻尼系数与速度指数。通过对被动混合控制结构的仿真分析可知,依据主动控制算法得到的黏滞阻尼器能够有效的降低隔震层的地震响应。

2)以被动混合控制实现主动混合控制的思想是可行的。对被动混合隔震控制与主动混合隔震控制分别进行地震响应分析,被动混合控制对于隔震层位移的减震率能达到主动控制效果的90%以上。

3)两种混合控制都能够有效减小隔震层的位移,并使上部结构的响应不增加。通过对主动、被动混合控制的仿真分析可知,主动混合控制与被动混合控制都能够在上部结构响应不增加的情况下,有效的降低隔震层的位移响应。

4)实际应用过程中,可以根据工程需要选定地震波,对主动混合控制结构进行激励。根据隔震层主动控制力-位移曲线拟合阻尼器的最优阻尼系数

与速度指数,依据此参数可以设计出所需被动黏滞阻尼器。

参考文献:

[1] 周福霖.工程结构减震控制[M].北京:地震出版社,1997.

[2] Heaton T H,Hall J F,Wald D J,et al.Response of high-rise and base-isolated buildings to a hypothetical Mw 7.0 blind thrust earthquake[J].[Science](#),1995,267(5195):206-211.

[3] Kelly J M.Role of damping in seismic isolation[J].[Earthquake Engineering and Structural Dynamics](#),1999,28(1):3-20.

[4] Hall J.Discussion the role of damping in seismic isolation[J].[Earthquake Engineering and Structural Dynamics](#),1999, 28(12):1717-1720.

[5] Ziyaeifar M,Noguchi H.Partial mass isolation in tall buildings[J].[Earthquake Engineering and Structural Dynamics](#), 1998,27(1):49-65.

[6] Providakis C P.Effect of LRB isolators and supplemented viscous dampers on seismic isolated buildings under near fault excitations[J].[Engineering Structures](#),2008,32(4):1187-1198.

[7] Providakis C P.Effect of supplemental damping on LRB and FPS seismic isolators under near-fault ground motions[J].[Soil Dynamics and Earthquake Engineering](#),2009,29(1):80-90.

[8] Jangid R S,Kelly J M.Base isolation for near-fault motions[J].[Earthquake Engineering and Structural Dynamics](#),2001,30(5): 691-707.

[9] Politopoulos I.A review of adverse effects of damping in seismic isolation[J].[Earthquake Engineering and Structural Dynamics](#),2008,37(3):447-465.

[10] Wang Mingxu,Chen Guoping.Optimization on placement and parameters of damping design using energy criterion[J]. [Journal of Vibration,Measurement & Diagnosis](#),2011,31(6): 754–758.[王明旭,陈国平.基于结构能量准则的阻尼器位置及参数优化[J].[振动、测试与诊断](#),2011,31(6):754–758.]

[11] Chang Chiaming,Shia Syuan,Lai Yong'an.Seismic design of passive tuned mass damper parameters using active control algorithm[J].[Journal of Sound and Vibration](#),2018,426:150–165.

[12] Chang Chiaming,Shia Syuan,Yang Choyen.Design of buildings with seismic isolation using linear quadratic algorithm[J].[Procedia Engineering](#),2017,199:1610–1615.

[13] Chang Chiaming,Shia Syuan,Yang Choyen.Use of active control algorithm for optimal design of base-isolated buildings against earthquakes[J].[Structural and Multidisciplinary Optimization](#),2018,58(2):613–626.

[14] Liu Yanhui,Wu Jinbiao,Donà M.Effectiveness of fluid-viscous dampers for improved seismic performance of inter-storey isolated buildings[J].[Engineering Structures](#),2018,169: 276–292.

[15] 欧进萍.结构振动控制:主动、半主动和智能控制[M].北京:科学出版社,2003.

[16] Du Yongfeng,Xu Tianni,Bao Chao,et al.Nonlinear response spectra of base isolation structures with nonproportional damping are studied[J].[Journal of Vibration and Shock](#),2016,35(17):207–212.[杜永峰,徐天妮,包超,等.考虑非比例阻尼的基础隔震结构非线性反应谱研究[J].[振动与冲击](#),2016,35(17):207–212.]

(编辑 张凌之)

引用格式: Zhang Guanping,Liu Yanhui,Tan Ping,et al.Study on optimization of passive viscous damper and passive hybrid control seismic response[J].[Advanced Engineering Sciences](#),2020,52(3):70–77.[张冠平,刘彦辉,谭平,等.基于主动控制优化被动黏滞阻尼器及混合隔震研究[J].[工程科学与技术](#),2020,52(3):70–77.]