

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.139

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 地震作用下相邻隔震结构的复合被动控制

张尚荣<sup>1</sup>, 胡宇琛<sup>1</sup>, 谭金宝<sup>1</sup>, 谭平<sup>2</sup>, 刘芳兰<sup>1</sup>

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 银川 750021; 2. 广州大学 工程抗震研究中心, 广州 510405)

**摘要:**在相邻隔震结构等效双体单自由度简化模型间设立 Kelvin-Voigt 型被动控制单元, 基于 Kanai-Tajimi 谱随机地震动模型, 以结构振动总能量最小为优化控制目标, 分析得到连接控制参数对控制效果的影响规律及最优控制参数, 并基于等效双体单自由度模型计算得到相邻高层隔震结构间连接控制最优参数, 分别从时域和频域角度推导得到了相邻高层隔震结构控制的随机响应表达式, 分析了连接控制装置在不同布置方案下, 对结构自振特性和随机响应的影响, 并通过数值分析证明了该控制方法的控制效果, 表明该控制方法应用于相邻隔震结构间的有效性。

**关键词:**隔震结构; 被动控制; Kelvin-Voigt 模型; 平稳随机激励; 地震响应

中图分类号: TU352.1 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2021)03-0067-08

## Composite passive control under earthquake of adjacent isolated structures

ZHANG Shangrong<sup>1</sup>, HU Yuchen<sup>1</sup>, TAN Jinbao<sup>1</sup>, TAN Ping<sup>2</sup>, LIU Fanglan<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, P. R. China; 2. Earthquake Engineering Research and Test Center of Guangzhou University, Guangzhou 510405, P. R. China)

**Abstract:** A Kelvin-Voigt type passive control unit was set up between the equivalent two-body single-degree-of-freedom simplified models of adjacent isolated structures. Based on the Kanai-Tajimi spectral stochastic seismic motion model, by taking the minimum of the total vibration energy of the structures as the optimal control objective, the influence rules of the connection control parameters on the control effect have been drawn on basis of detailed analyses, as well as the optimal control parameters. According to the equivalent two-body single-degree-of-freedom model, the optimal parameters of connection control between adjacent high-rise isolated structures were obtained; The response expressions of adjacent high-rise isolated structures were derived from the time domain and frequency domain; The influences of connection control devices on the natural vibration characteristics and random responses of the structures under different layout schemes were analyzed. Finally, it is proved by numerical analysis that, this control method can be applied to adjacent isolated structures, which has control effect on each structure. It shows that the control method is effective for the adjacent isolated structures.

**Keywords:** isolated structure; passive control; Kelvin-Voigt model; stationary random excitation; seismic response

收稿日期: 2020-04-06

基金项目: 宁夏自然科学基金(2019AAC03041); "西部之光"人才引进培养计划(XAB2017AW09); 国家自然科学基金(51608283)

作者简介: 张尚荣(1984-), 男, 副教授, 博士, 主要从事结构减震控制研究, E-mail: sr\_zhang@nxu.edu.cn.

Received: 2020-04-06

**Foundation items:** Ningxia Natural Science Foundation(No. 2019AAC03041); "Light of the West" Talent Introduction and Training Program(No. XAB2017AW09); National Natural Science Foundation of China(No. 51608283)

**Author brief:** ZHANG Shangrong(1984-), associate professor, PhD, main research interest: structural seismic control, E-mail: sr\_zhang@nxu.edu.cn.

在相邻结构间安装控制器是利用结构间的相互运动来消耗和吸收振动能量<sup>[1]</sup>。地震作用下,隔震结构位移较大,尤其在强震或巨震作用下,可能会因隔震层位移过大而造成隔震层的损伤破坏,抑或使上部子结构进入弹塑性状态而产生损伤,同时,非隔震结构也会因位移过大而出现不同程度的损失。通过在相邻隔震结构-非隔震结构之间安装控制装置,利用结构间的相互运动来消耗和吸收振动能量,以期减小相邻两结构的层间位移,提高建筑结构的可靠性,具有重要的现实意义。

Christenson 等<sup>[2-3]</sup>将相邻高层结构简化为悬臂梁模型,对比分析了采用被动控制、半主动控制和主动控制方式对结构控制的效果和有效性;Zhu 等<sup>[4]</sup>、阁东东等<sup>[5]</sup>、吴巧云等<sup>[6]</sup>通过理论推导和数值参数化研究,对相邻多自由度结构间阻尼器参数优化问题进行了研究;Ni 等<sup>[7]</sup>、Basili<sup>[8-9]</sup>等采用 Bouc-Wen 模型模拟连接控制装置,研究了其在相邻结构间对结构振动控制效果及对结构抗震性能的影响;Gattulli 等<sup>[10-11]</sup>以相关复特征值问题的解析解在无量纲空间中的轨迹量为指标,并与其他相关准则进行了对比分析,验证得到了该准则的有效性和良好的鲁棒性。目前,对于相邻结构的研究均集中在非隔震结构间的控制问题上,而关于相邻隔震结构间的复合控制尚没有相关研究。

笔者采用 Kelvin-Voigt 模型为连接相邻隔震结构间的被动控制单元,通过分析相邻隔震结构的等效双体单自由度简化模型的响应,得到控制单元的最优刚度和阻尼系数,并以此为控制参数,通过一高层相邻隔震结构算例验证了控制方案的有效性和实用性。

## 1 单自由度简化模型分析

假定结构为层剪切模型,图 1 为两相邻结构及其连接控制装置的计算简化模型,两相邻单自由度简化模型通过 Kelvin-Voigt 控制模型连接,计算简化模型如图 1 所示。

地震作用下,系统的运动方程表示为<sup>[12]</sup>

$$M\ddot{\mathbf{x}} + C\dot{\mathbf{x}} + K\mathbf{x} = -M\mathbf{I}\ddot{\mathbf{x}}_g(1)$$

式中: $\ddot{\mathbf{x}}_g$  为地震激励; $\mathbf{I}$  为单位列向量; $\dot{\mathbf{x}} = [\dot{x}_L$

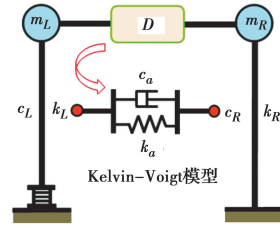


图 1 相邻结构单自由度控制模型计算简图

Fig. 1 Calculation diagram of single degree of freedom control model for adjacent structures

$\dot{\mathbf{x}}_R]^T, \dot{\mathbf{x}} = [\dot{x}_L \quad \dot{x}_R]^T, \mathbf{x} = [x_L \quad x_R]^T$  分别为系统的加速度、速度和位移列向量;系统的质量、阻尼、刚度矩阵分别表示为

$$M = \begin{bmatrix} m_L & 0 \\ 0 & m_R \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} c_L + c_a & -c_a \\ -c_a & c_R + c_a \end{bmatrix},$$

$$K = \begin{bmatrix} k_L + k_a & -k_a \\ -k_a & k_R + k_a \end{bmatrix}$$

式中: $c_a, k_a$  分别为连接两相邻结构控制装置的阻尼系数和刚度系数; $m_L, m_R, c_L, c_R, k_L, k_R$  分别为左边隔震结构、右边传统抗震相邻结构的质量、阻尼和刚度系数。

假定

$$\mu = m_L/m_R, \beta = \omega_L/\omega_R, \omega_L = \sqrt{k_L/m_L}, \eta_a = k_a/\omega_L^2 m_L, \xi_L = c_L/(2m_L\omega_L), \xi_R = \beta c_R/(2m_R\omega_L), \xi_a = c_a/(2m_L\omega_L)。$$

代入式(1)并经拉普拉斯变换可得系统的传递函数

$$H_{xL}(i\omega) = \frac{B+C}{AC-BD} \quad (2)$$

$$H_{xR}(i\omega) = \frac{A+D}{AC-BD} \quad (3)$$

式中:

$$A = -\omega^2 + 2i\omega\xi_L\omega_L + 2i\omega\xi_a\omega_L + \omega_L^2 + \eta_a\omega_L^2;$$

$$B = 2i\omega\xi_a\omega_L + \eta_a\omega_L^2;$$

$$C = -\omega^2 + 2i\omega\xi_R\omega_L/\beta + 2\mu i\omega\xi_a\omega_L + \omega_L^2/\beta^2 + \eta_a\mu\omega_L^2;$$

$$D = 2\mu i\omega\xi_a\omega_L + \eta_a\mu\omega_L^2。$$

当输入随机地震激励功率谱密度为  $S_{\ddot{x}_g}(\omega)$ , 结构的位移响应方差可表示为

$$\sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} |H(i\omega)|^2 S_{\ddot{x}_g}(\omega) d\omega \quad (4)$$

同样,可以得到相应的速度和绝对加速度响应方差。

相邻结构振动总能量  $E_c$  的均方差可以表示为 (未考虑连接控制装置贡献的振动能量)

$$\sigma_{E_c} = \frac{1}{2} m_L (\dot{\sigma}_{ul}^2 + \dot{\sigma}_{ur}^2 / \rho) + \frac{1}{2} k_L (\sigma_{ul}^2 + \frac{\sigma_{ur}^2}{\rho^2}) \quad (5)$$

## 2 多质点简化模型分析

多质点层模型计算简图如图 2 所示,运动方程仍用式 (1) 表示。式中:  $\dot{\mathbf{x}} = [\dot{\mathbf{x}}_L, \dot{\mathbf{x}}_R]^T$ ,  $\dot{\mathbf{x}} = [\dot{\mathbf{x}}_L, \dot{\mathbf{x}}_R]^T$ ,  $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_L, \mathbf{x}_R]^T$  分别为系统的加速度、速度和位移列向量。

系统的阻尼矩阵表示为

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_L^{(n+1) \times (n+1)} + \mathbf{C}_{11}^{(n+1) \times (n+1)} & -\mathbf{C}_{la}^{(n+1) \times q} \\ -\mathbf{C}_{ra}^{q \times (n+1)} & \mathbf{C}_R^{q \times q} + \mathbf{C}_{22}^{q \times q} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,非耦联阻尼矩阵为

$$\mathbf{C}_L^{(n+1) \times (n+1)} = \begin{bmatrix} c_{iso} + c_{L1} & -c_{L1} & \cdots & 0 \\ -c_{L1} & c_{L1} + c_{L2} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & -c_{Ln} \\ 0 & \cdots & -c_{Ln} & c_{Ln} \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)} \quad (7)$$

$$\mathbf{C}_R^{q \times q} = \begin{bmatrix} c_{R1} + c_{R2} & -c_{R2} & \cdots & 0 \\ -c_{R2} & c_{R2} + c_{R3} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & -c_{Rn} \\ 0 & \cdots & -c_{Rn} & c_{Rn} \end{bmatrix}_{q \times q} \quad (8)$$

耦联阻尼矩阵根据以下两种情况构造。

1) 若  $n \geq q$

$$\mathbf{C}_{11}^{(n+1) \times (n+1)} = \begin{bmatrix} 0^{1 \times 1} & 0^{1 \times q} & 0^{1 \times (n-q)} \\ 0^{q \times 1} & c_{11}^{q \times q} & 0^{q \times (n-q)} \\ 0^{(n-q) \times 1} & 0^{(n-q) \times q} & 0^{(n-q) \times (n-q)} \end{bmatrix}$$

式中

$$c_{11}^{q \times q} = \text{diag}(c_{a1}, c_{a2}, \dots, c_{aq});$$

$$\mathbf{C}_{22}^{q \times q} = \text{diag}(c_{a1}, c_{a2}, \dots, c_{aq});$$

$$\mathbf{C}_{la}^{(n+1) \times q} = [0^{1 \times q} \quad c_{la}^{q \times q} \quad 0^{(n-q) \times q}]^T;$$

$$c_{la}^{q \times q} = \text{diag}(c_{a1}, c_{a2}, \dots, c_{aq});$$

$\mathbf{C}_{ra}^{q \times (n+1)} = (\mathbf{C}_{la}^{(n+1) \times q})^T$ ;  $c_{ai}$  为左、右两相邻结构第  $i$  楼层连接装置的阻尼系数。

2) 若  $n \leq q$

$$\mathbf{C}_{11}^{(n+1) \times (n+1)} = \begin{bmatrix} 0^{1 \times 1} & 0^{1 \times 1} \\ 0^{1 \times 1} & c_{11}^{n \times n} \end{bmatrix}$$

式中:

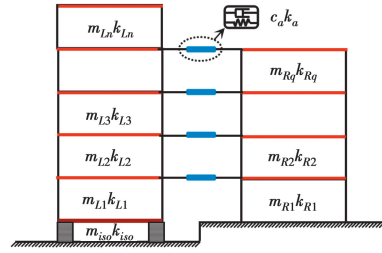


图 2 相邻结构多自由度控制模型计算简图

Fig. 2 Calculation diagram of multi-degree-of-freedom control model for adjacent structures

系统的质量矩阵表示为  $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_L & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_R \end{bmatrix}$ , 式中:

$$\mathbf{M}_L = \text{diag} [m_{iso} \quad m_{L1} \quad \cdots \quad m_{Ln}], \quad \mathbf{M}_R = \text{diag} [m_{R1} \quad m_{R2} \quad \cdots \quad m_{Rn}].$$

$$c_{11}^{n \times n} = \text{diag}(c_{a1}, c_{a2}, \dots, c_{an});$$

$$\mathbf{C}_{22}^{q \times q} = \begin{bmatrix} c_{22}^{n \times n} & 0^{n \times (q-n)} \\ 0^{(q-n) \times n} & 0^{(q-n) \times (q-n)} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C}_{la}^{(n+1) \times q} = \begin{bmatrix} 0^{1 \times n} & 0^{1 \times (q-n)} \\ c_{la}^{n \times n} & 0^{(q-n) \times q} \end{bmatrix};$$

$$c_{la}^{n \times n} = \text{diag}(c_{a1}, c_{a2}, \dots, c_{an});$$

$$\mathbf{C}_{ra}^{q \times (n+1)} = (\mathbf{C}_{la}^{(n+1) \times q})^T.$$

系统的刚度矩阵为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_L^{(n+1) \times (n+1)} + \mathbf{K}_{11}^{(n+1) \times (n+1)} & -\mathbf{K}_{la}^{(n+1) \times q} \\ -\mathbf{K}_{ra}^{q \times (n+1)} & \mathbf{K}_R^{q \times q} + \mathbf{K}_{22}^{q \times q} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中各刚度子矩阵与阻尼矩阵的构造方法类似。

系统的状态方程为<sup>[13]</sup>

$$\mathbf{M}_e \dot{\mathbf{y}} + \mathbf{K}_e \mathbf{y} = [\mathbf{P}(t) \quad 0]^T \quad (10)$$

$$\text{式中: } \mathbf{y} = [x \quad \dot{x}]^T; \mathbf{M}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{M} \\ \mathbf{M} & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{K}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{K} & 0 \\ 0 & -\mathbf{M} \end{bmatrix};$$

$$P(t) = -\dot{M}\dot{u}_g(t).$$

其对应的特征向量方程为

$$(M_c\lambda + K_c)\Phi = 0 \quad (11)$$

式中:  $\Phi = \{\Phi_i, \Phi_i^*\}$ 、 $\Phi_i = \begin{Bmatrix} \varphi_i \\ \lambda_i \varphi_i \end{Bmatrix}$ 、 $\Phi_i^* = \begin{Bmatrix} \varphi_i^* \\ \lambda_i^* \varphi_i^* \end{Bmatrix}$  ( $i=1, 2k, 2(n+q)-1$ ) 为复特征向量,  $\lambda_i = -\frac{b_i}{a_i}$ 、 $\lambda_i^* = -\frac{b_i^*}{a_i^*}$  为复特征值;  $a_i = \Phi_i^T M_c \Phi_i$ 、 $a_i^* = \Phi_i^{*T} M_c \Phi_i^*$  为复模态质量,  $b_i = \Phi_i^T K_c \Phi_i$ 、 $b_i^* = \Phi_i^{*T} K_c \Phi_i^*$  为复模态刚度, 将上述状态变量代入状态方程(10)并经傅里叶变换得到系统的位移传递函数矩阵

$$H(i\omega) = \sum_{i=1}^{n+q} \left( \frac{\varphi_i \varphi_i^T}{a_i(i\omega - \lambda_i)} + \frac{\varphi_i^* \varphi_i^{*T}}{a_i^*(i\omega - \lambda_i^*)} \right) M I \quad (12)$$

假定系统输入随机地震激励谱密度为  $S_{\ddot{x}_g}(\omega)$ , 系统的位移响应功率谱为

$$S_{xx}(\omega) = H(i\omega)^* H(i\omega) S_{\ddot{x}_g}(\omega) \quad (13)$$

相应地结构位移响应方差为

$$\sigma_{xx}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_{xx}(\omega) d\omega \quad (14)$$

同理, 可以得到结构的速度和加速度响应方差。

相邻结构振动总能量  $E$  的方差表示为(未考虑连接控制装置贡献的振动能量)

$$\sigma_E^2 = \frac{1}{2} \left( m_s \dot{\sigma}_{us}^2 + \sum_{i=1}^{n_L} m_i \dot{\sigma}_{un_L}^2 + \sum_{j=1}^{n_R} m_j \dot{\sigma}_{un_R}^2 \right) + \frac{1}{2} \left( k_s \sigma_{us}^2 + \sum_{i=1}^{n_L} k_i \sigma_{un_L}^2 + \sum_{j=1}^{n_R} k_j \sigma_{un_R}^2 \right) \quad (15)$$

### 3 减震控制分析

#### 3.1 随机地震激励模型

在平稳模型中, 随机地震动模型采用 Kanai-Tajimi 谱, 其表达式为

$$S(\omega) = \frac{\omega_g^4 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} S_0 \quad (16)$$

谱模型参数采用文献[14]中的相关参数, 考虑近场地震作用, 场地类别 II 类, 地震设防烈度为 8 度, 谱强度因子  $S_0 = 4.65 \text{ cm}^2/\text{rad} \cdot \text{s}^3$ , 地基土卓越频率和阻尼比分别取  $\omega_g = 15.00 \text{ rad/s}$ ,  $\xi_g = 0.60$ 。

#### 3.2 单质点简化模型振动控制分析

选取结构组合情况如表 1 所示, 假定左边隔震结构的质量  $m_L = 1.0 \text{ kg}$ , 其余结构参数及控制参数

优化范围如表 1 所示,  $\rho$  为子结构的质量比,  $\beta$  为子结构的频率比,  $\eta_a$ 、 $\xi_a$  为相邻结构间控制装置的参数, 并以其响应方差(标准差)为基础, 选择两相邻结构振动总能量最小为优化控制目标。

优化控制目标:

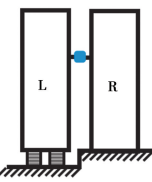
$$\min \cdot Ec(\rho, \eta, \xi)$$

约束条件:

$$s. t. \begin{cases} \rho = C \\ 0 \leq \eta_a \leq \eta_u \\ 0 \leq \xi_a \leq \xi_u \end{cases}$$

表 1 结构参数及控制参数情况

Table 1 Structure parameters and combination parameters

| 结构类型  | 结构特点                         | 结构参数                          | 控制参数                                       |
|---|------------------------------|-------------------------------|--|
|  | 组合 1: 隔震结构 L 的上部子结构和结构 R 对称。 | $\rho = 1.0$<br>$\beta = 0.5$ | $\eta_a \in [0, 20]$<br>$\xi_a \in (0, 5]$ |

以 Kelvin-Voigt 模型刚度系数  $K$  和阻尼系数  $C$  为控制参数, 两相邻结构振动总能量最小为控制目标, 对算例模型进行随机地震响应分析, 得到振动总能量随控制参数的变化情况。从图 3 可以看出, 控制模型的加入一定程度上减小了相邻结构的振动总能量均方差, 且控制参数越小, 其控制效果越好, 存在最小振动总能量控制点  $K = 0.25$ 、 $C = 0.25$ 。当控制参数都为 0 时, 其振动总能量均方差与未控结构相等, 这与结构实际振动情况相吻合。

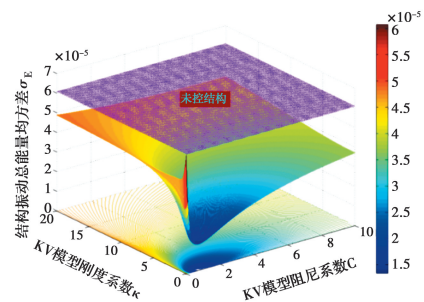


图 3 单质点模型振动总能量均方差

Fig. 3 Single point model vibration total energy mean square deviation

#### 3.3 多质点模型振动控制分析

某相邻高层钢筋混凝土框架结构(隔震结构 L + 非隔震结构 R, 简称结构 L 和结构 R), 结构 L 上部子结构和结构 R 均为 15 层, 层高均为 3.3 m, 隔

震层高度为 1.5 m,各层质量均为  $m = 1.28 \times 10^6$  kg,各层层间剪切刚度均为  $k = 4.0 \times 10^9$  N/m,结构 L 隔震层质量为  $m = 1.30 \times 10^6$  kg,剪切刚度为  $k = 2.65 \times 10^8$  N/m,采用瑞利阻尼模型,结构 L 和 R 第一阶模态阻尼比分别取 0.15、0.05。

结构 L 和结构 R 第 1 阶模态频率分别为 3.11、5.66 rad/s。相邻结构质量比  $\rho = 0.95$ ,频率比(一阶频率) $\beta = 0.55$  建立双体单自由度体系运动方程,并以总振动能量最小为控制目标,得到连接控制装置优化刚度  $K_a = 4.9427 \times 10^7$  N/m,优化阻尼  $C_a = 3.8198 \times 10^7$  N · s/m。为了验证基于双体单自由度体系分析得到的控制优化参数对相邻多自由度结构的适用性,保持控制装置总优化参数值不变的情况下,将控制装置分别布置在结构第 15 层和(8+15)层,对相邻结构的振动控制效果进行分析。

为定量分析相邻结构间的控制效果,采用性能指标  $\theta_i$  表明其控制效果。

$$\theta_i = \frac{\sigma_{E_{ni}}^2 - \sigma_{E_{ci}}^2}{\sigma_{E_{ni}}^2} \quad (17)$$

式中: $i = 1, 2$  分别表示结构 L 和 R,  $\sigma_{E_{ni}}^2$ 、 $\sigma_{E_{ci}}^2$  分别为未控制与控制后各结构的振动能量方差。

两相邻隔震结构体系的总体减震控制效果定义为

$$\theta = v\theta_1 + (1-v)\theta_2 \quad (18)$$

式中: $\theta$  为相邻两结构的总体控制效果; $v$  为两结构的权重系数。

**3.3.1 频域结果分析** 图 4 分别给出了有控和无控结构在 Kanai-Tajimi 谱作为输入的情况下顶层加速度功率谱密度。无控结构 L 的前 2 阶频率分别为 3.11、12.01 rad/s;无控结构 R 的前 2 阶频率分别为 5.66、16.93 rad/s。经 Kelvin-Voigt 模型控制后,在两种不同控制方案下,结构 L 的前 2 阶频率分别变化至 3.85(3.96)、13.07(12.02) rad/s;结构 R 的前 2 阶频率分别变化至 3.94(4.25)、15.26(17.16)rad/s。可以看出,连接控制装置后,对原结构的前两阶自振频率均存在不同程度的影响,对结构 R 的一阶模态频率影响较大,对结构 L 的影响相对较小,但对结构顶层加速度响应的谱峰值有显著的减小。图 5 所示为相邻结构基底剪力功率谱密度,其表现规律与顶层加速度功率谱密度相似。

图 6 和图 7 分别给出了采用 Kanai-Tajimi 谱随机地震动模型作为输入,相邻结构 L 和 R 在无控和有控情况下各层层间剪力随楼层变化的对比分析。

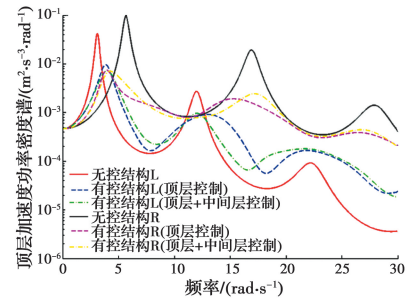


图 4 顶层加速度功率谱密度

Fig. 4 Top layer acceleration power spectral density

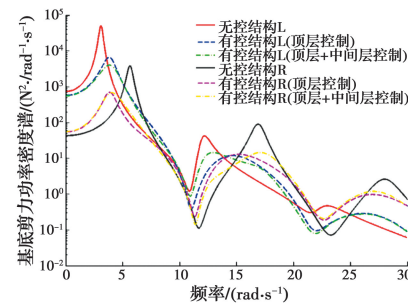


图 5 基底剪力功率谱密度

Fig. 5 Story shear force power spectral density

结构 L 在经 Kelvin-Voigt 模型控制后,各层层间剪力均方差均有减小;未控时隔震层(底层)层间剪力均方差为  $4.0186 \times 10^6$  N( $3.8272 \times 10^6$  N),设置 Kelvin-Voigt 模型控制装置后:在顶层控制方案中,层间剪力均方差减小为  $2.5788 \times 10^6$  N( $2.3911 \times 10^6$  N),减小了 35.8%(37.5%);在顶层+中间层控制方案中,层间剪力均方差减小为  $2.2890 \times 10^6$  N( $2.1211 \times 10^6$  N),减小了 43.1%(44.6%)。

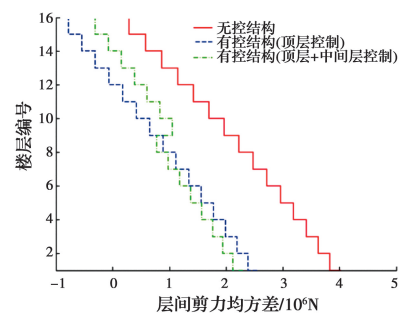


图 6 结构 L 层间剪力随层数变化曲线

Fig. 6 Story shear force of structure L varies with layer

结构 R 受控后,各层层间剪力均方差表现出不同的变化情况,结构下部楼层层间剪力均方差减小,结构上部楼层剪力有放大的情况,比较两种控制方案可以发现,在总控制参数值不变的情况下,通过多层均匀布置的方式,可以改善楼层剪力放大的现象,该部分将在后续研究中进行分析;未控时底层层间剪力均方差为  $5.3397 \times 10^6$  N,设置 Kelvin-Voigt

模型控制装置后,层间剪力均方差分别减小为  $3.438 3 \times 10^6$ 、 $3.757 1 \times 10^6$  N,减小了 35.6%、29.6%。

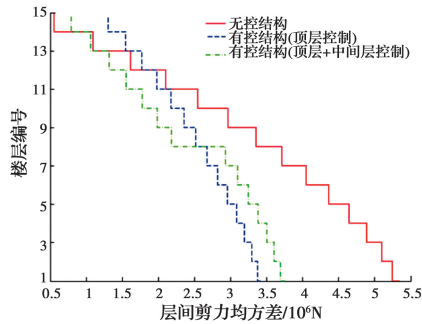


图 7 结构 R 层间剪力随层数变化曲线

Fig. 7 Story shear force of structure R varies with layer

图 8 和图 9 分别给出了相邻结构 L 和 R 在无控和有控情况下各层绝对加速度随楼层的控制情况。结构 L 在顶层控制方案中,隔震层和下部 2 层绝对加速度略有放大,但上部各层均表现为减小,在顶层+中间层控制方案中,各层绝对加速度均方差均有减小,顶层绝对加速度未控时为  $0.246 6 \text{ m/s}^2$ ,受控后分别为  $0.214 4$ 、 $0.206 4 \text{ m/s}^2$ ,减小了 13.1%、16.3%;结构 R 在两种控制方案中,各层绝对加速度均方差均有减小,其中,顶层绝对加速度未控时为  $0.511 7 \text{ m/s}^2$ ,受控后分别为  $0.271 1$ 、 $0.282 7 \text{ m/s}^2$ ,减小了 47.0%、44.8%。

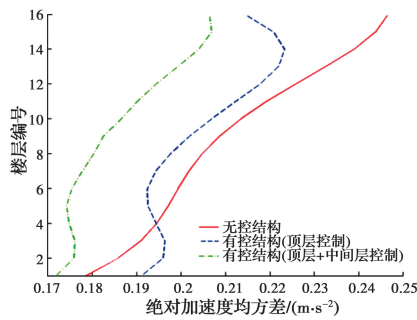


图 8 结构 L 各层绝对加速度随层数变化曲线

Fig. 8 Absolute acceleration of structure L varies with layer

通过分析可以看出,通过在相邻隔震结构间设置 Kelvin-Voigt 模型控制装置后,结构 L 层间剪力和结构 R 各层的绝对加速度得到了有效控制,结构 R 的层间剪力和结构 L 在顶层控制方案中部分楼层略有放大。

根据式(17)、(18)结构性能控制效果定义,结构 L 和结构 R 在两种控制方案中均表现出良好的控制效果,控制效果分别为  $0.865 5$  ( $0.909 1$ )、 $0.786 4$  ( $0.761 9$ )。取权重系数为  $v=0.5$ ,得到两相邻隔震结构的总体控制效果为  $0.826 0$  ( $0.835 5$ )。

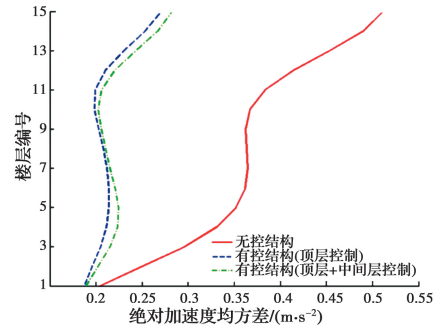
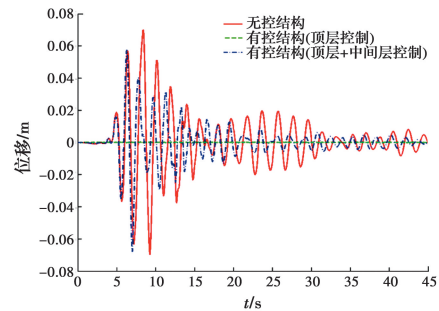
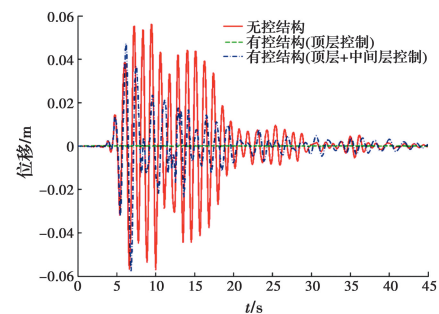


图 9 结构 R 各层绝对加速度随层数变化曲线

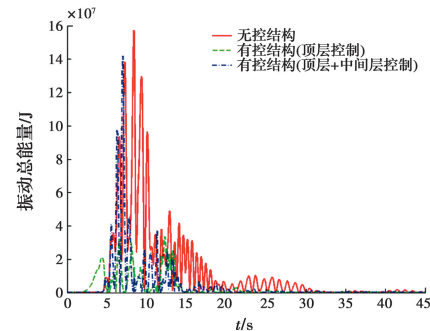
Fig. 9 Absolute acceleration of structure R varies with layer



(a) 结构 L 顶层位移时程曲线



(b) 结构 R 顶层位移时程曲线



(c) 结构振动能量时程曲线

图 10 Hector-Mine 波作用下结构响应时程曲线

Fig. 10 Structural vibration energy time history under the wave of Hector-Mine

3.3.2 时域结果分析 为进一步分析连接控制方案在不同地震波激励下控制的有效性,选用 FEMA P-695 建议的远场地震动集,从中选取 3 条天然地震动:Hector Mine(1999)地震 Hector 台站记录、Kobe Japan(1995)地震 Nishi-Akashi 台站记录、Northridge

(1994)地震 Beverly Hills-14145 Mulhol 台站记录(简称 Hector Mine 波、Kobe Japan 波和 Northridge 波),地震波加速度峰值调幅为 0.1g。

图 10 所示为相邻结构在 Hector Mine(1999)地震记录下各结构响应时程曲线,结果表明,安装控制装置后结构各层响应和结构振动总能量得到了很好的抑制,说明了连接控制方案的有效性。

表 2 给出了两相邻结构分别在 Hector-Mine

波、Kobe-Japan 波和 Northridge 波作用下,未控结构和有控结构顶层峰值位移和振动总能量的控制效果分析结果。相邻结构间的控制效果与地震波特性密切相关,相比于顶层峰值位移的总体控制效果,对振动总能量的控制效果更好,这主要是所用优化控制目标是使结构振动总能量最小,也说明了优化控制方案的有效性。

表 2 未控制和控制后结构控制效果对比

Table 2 Comparison of structure response for uncontrolled and controlled structures

| 结构<br>响应          | Hector-Mine           |                                   |                                   | Kobe-Japan            |                                   |                                  | Northridge            |                                  |                                   |
|-------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
|                   | 未控<br>结构              | 受控结构                              |                                   | 未控<br>结构              | 受控结构                              |                                  | 未控<br>结构              | 受控结构                             |                                   |
|                   |                       | 顶层                                | 顶层+中层                             |                       | 顶层                                | 顶层+中层                            |                       | 顶层                               | 顶层+中层                             |
| 结构 L 顶层峰<br>值位移/m | 0.070                 | 4.46×10 <sup>-4</sup><br>(-99.3%) | 0.068<br>(-2.6%)                  | 0.047                 | 4.94×10 <sup>-4</sup><br>(-98.9%) | 0.024 8<br>(-46.8%)              | 0.052                 | 4.5×10 <sup>-4</sup><br>(-99.1%) | 0.048<br>(-7.7%)                  |
| 结构 R 顶层峰<br>值位移/m | 0.057                 | 4.57×10 <sup>-4</sup><br>(-99.2%) | 0.055<br>(-3.5%)                  | 0.019                 | 5.03×10 <sup>-4</sup><br>(-97.4%) | 0.0185<br>(-3.1%)                | 0.071                 | 4.6×10 <sup>-4</sup><br>(-99.4%) | 0.065<br>(-8.5%)                  |
| 振动总能量/J           | 5.21×10 <sup>10</sup> | 1.25×10 <sup>10</sup><br>(-76.0%) | 1.89×10 <sup>10</sup><br>(-63.7%) | 1.39×10 <sup>10</sup> | 6.79×10 <sup>9</sup><br>(-51.2%)  | 5.27×10 <sup>9</sup><br>(-62.1%) | 2.39×10 <sup>10</sup> | 4.24×10 <sup>9</sup><br>(-82.3%) | 1.53×10 <sup>10</sup><br>(-36.0%) |

### 4 结论

提出一种利用隔震结构和非隔震结构间的相互作用减小地震作用下结构响应的复合被动控制方法,结合双体单自由度和多自由度简化模型,研究了该种控制方法的控制效果和有效性。

1)在相邻隔震结构间设置 Kelvin-Voigt 型控制装置,可以对相邻结构的绝对加速度和层间剪力在一定程度上进行控制,对相邻结构总体减震控制效果较好,从而提高结构的抗震性能。

2)优化控制装置选择合理的情况下,可以在基本保持原有结构基本动力特性的情况下,使相邻结构同时达到理想的减震控制的效果;以振动总能量最小为目标,其控制效果均可以达到 36%以上。

3)选用地震波频谱特性与结构振动特性相关,对其控制效果存在差异。

4)控制装置的阻尼在减震控制起主要作用,但存在最优取值,并不是越大越好。

### 参考文献:

[1] 閻东东,朱宏平,陈晓强. 相邻结构间被动控制装置的位置优化设计[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(1): 11-15, 94-95.

GE D D, ZHU H P, CHEN X Q. Optimal design of passive damper's positions between two adjacent structures [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(1): 11-15, 94-95. (in Chinese)

[2] CHRISTENSON R E, SPENCER B F, JOHNSON E A, et al. Coupled building control considering the effects of building/connector configuration [J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(6): 853-863.

[3] CHRISTENSON R E, SPENCER B F, JOHNSON E A. Semiactive connected control method for adjacent multidegree-of-freedom buildings [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2007, 133(3): 290-298.

[4] ZHU H P, XU Y L. Optimum parameters of Maxwell model-defined dampers used to link adjacent structures [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 279(1/2): 253-274.

[5] 閻东东,朱宏平,陈晓强. 两相邻结构地震动响应被动优化控制研究[J]. 振动工程学报, 2008, 21(5): 482-487.

DONG D, ZHU H P, CHEN X Q. Passive optimum control for reducing seismic responses of adjacent structures [J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, 21(5): 482-487. (in Chinese)

- [6] 吴巧云, 朱宏平, 陈楚龙. 连接 Maxwell 模型的两相邻结构非线性地震反应分析[J]. 工程力学, 2015, 32(9): 149-157.  
WU Q Y, ZHU H P, CHEN C L. Nonlinear seismic response analysis of two adjacent structures connected using the Maxwell model [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(9): 149-157. (in Chinese)
- [7] NI Y Q, KO J M, YING Z G. Random seismic response analysis of adjacent buildings coupled with non-linear hysteretic dampers [J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 246(3): 403-417.
- [8] BASILI M, DE ANGELIS M. A reduced order model for optimal design of 2-m dof adjacent structures connected by hysteretic dampers [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 306(1/2): 297-317.
- [9] BASILI M, DE ANGELIS M. Optimal passive control of adjacent structures interconnected with nonlinear hysteretic devices [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 301(1/2): 106-125.
- [10] GATTULLI V, POTENZA F, LEPIDI M. Damping performance of two simple oscillators coupled by a visco-elastic connection [J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(26): 6934-6948.
- [11] GATTULLI V, POTENZA F, SPENCER B F. Design criteria for dissipative devices in coupled oscillators under seismic excitation [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(7): e2167.
- [12] 乔普拉. 结构动力学: 理论及其在工程中的应用[M]. 2 版. 谢礼立, 吕大刚, 译. 北京: 高等教育出版社, 2007.  
CHOPRA A K. Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering [M]. 2nd ed. XIE L L, LYU D G, Translated. Beijing: Higher Education Press, 2007. (in Chinese)
- [13] 傅志方, 华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.  
FU Z F, HUA H X. Theory and application of modal analysis [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2000. (in Chinese)
- [14] 薛素铎, 王雪生, 曹资. 基于新抗震规范的地震动随机模型参数研究 [J]. 土木工程学报, 2003, 36(5): 5-10.  
XUE S D, WANG X S, CAO Z. Parameters study on seismic random model based on the new seismic code [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(5): 5-10. (in Chinese)

(编辑 胡玲)