

# 巨型框架单段隔震悬挂结构减震效果分析

王学庆

(安徽工业大学 建筑工程学院,安徽 马鞍山 243032)

**摘要:**针对具有较小水平刚度的橡胶隔震支座提出一种巨型框架隔震悬挂结构体系,建立其两质点动力简化计算模型,并与传统巨型框架悬挂结构体系的地震反应进行了对比分析。通过主结构相对位移在频域内的传递函数,分析其减震效果。依据频域分析所得结论建立三维有限元模型,采用两种典型地震波分析其位移响应。结果表明,主结构与悬挂结构的频率比和质量比对其减震效果的影响具有相关性,若频率比与0.1倍质量比之和不大于0.7,则减震效果可达40%以上;脉冲型地震动对主结构的减震效果有不利影响,但不会放大地震作用效应。

**关键词:**巨型框架;隔震;悬挂结构;减震效果

**中图分类号:**TU 352   **文献标志码:**A   **doi:**10.3969/j.issn.1671-7872.2017.02.013

## Damping Effect of Mega-frame with Isolated Suspension Structure

WANG Xueqing

(School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China)

**Abstract:** In view of smaller horizontal stiffness of laminated rubber bearings, a new mega-frame with isolated suspension structure was proposed, and the two-mass simplified model of which was presented for dynamic analysis. The seismic responses of two cases were investigated for traditional mega-frame and the proposed new mega-frame with isolated-suspension structure respectively. For analyses of the damping effect, the relative displacements of main structure in both cases were compared based on frequency domain transfer function. According to the results of frequency analysis, three-dimensional finite element models were established and analyzed in time domain by two typical seismic wave. Results of analysis from both domains indicate the mass ratio and frequency ratio of mega-frame to suspension structure are correlative on damping effects. The relative displacement of mega-frame is reduced by more than 40% if the sum of frequency ratio and 10% mass ratio is not larger than 0.7. The damping effect on the mega-frame is negatively influenced by pulse-like ground motions, but seismic action effect is not be amplified.

**Key words :** mega-frame; isolation; suspension structure; damping effect

巨型框架悬挂结构由巨型框架梁、巨型框架柱、吊杆(吊索)、悬挂楼层组成。因其具有竖向传力路径明确、材料力学性能发挥充分、体系布置灵活等优势,被部分高层建筑采用,如香港汇丰银行大厦和美国明尼阿波利斯联邦储备银行大楼等<sup>[1]</sup>。国内外学者先后对各类悬挂结构体系的动力特性及其抗震性能开展了大量的研究工作,结果表明:结构的地震反应主要受主子结构间的质量比<sup>[2-4]</sup>、频率比和阻尼比三种因素影响<sup>[5-7]</sup>,相对较小的主子结构自振周期比能够较好地适应地震波的宽频带特征<sup>[8-9]</sup>。悬挂子结构自由摆动周期的平方与两端铰接的吊杆长度成正比,即周期增加一倍,则吊杆长度需增加四倍<sup>[10]</sup>。本文基于具有较小水平刚度的橡胶隔震支座提出一种巨型框架隔震悬挂结构,以此获得悬挂子结构自由摆动的长周期,并在频域及时域范

收稿日期:2017-03-07

基金项目:安徽省教育厅重点项目(kJ2013A052)

作者简介:王学庆(1977—),男,辽宁鞍山人,博士,讲师,主要从事工程结构抗震、减震及振动控制研究。

围对其减震效果进行分析。

# 1 动力计算模型及运动方程

## 1.1 巨型框架隔震悬挂结构

巨型框架单段隔震悬挂结构由主框架结构和隔震悬挂子结构组成。隔震支座布设于主框架梁上,悬挂子结构通过其顶部铰接吊杆悬挂于横担在支座上的担梁上。支座及子结构均与主框架柱间留有一定间隙,防止相互间发生碰撞,如图1所示。

由隔震支座和子结构重力刚度所形成等效抗侧刚度远小于子结构自身的,故可采用静力凝聚法将体系简化为两质点动力分析模型<sup>[10]</sup>,如图2所示。

图2中:  $m_1$ 、 $m_2$  为主、子结构的集中质量;  $k_1$ 、 $k_{2a}$ 、 $k_{2b}$  分别为主框架抗侧刚度、隔震层抗侧刚度、子结构重力刚度;  $c_1$  和  $c_{2a}$  分别为主框架和支座的粘滞阻尼系数;  $x_g$  为基底水平位移;  $x_1$ 、 $x_2$  分别为主框架和悬挂子结构相对于基底的水平位移。

整体坐标系下的运动方程为

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = -m\{1\}\ddot{x}_g(t) \tag{1}$$

其中:  $m = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}$ ;  $c = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix}$ ;  $k = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix}$ ;  $k_2 = \frac{k_{2a}k_{2b}}{k_{2a} + k_{2b}}$ ;  $c_2 = \frac{c_{2a}k_{2b}}{k_{2a} + k_{2b}}$ ;  $x(t) = \begin{Bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{Bmatrix}$  为各质点相对于基底的位移;  $\{1\}$  为单位列向量。

相对坐标系下的运动方程为

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = -M_g\{1\}\ddot{x}_g(t) \tag{2}$$

其中:  $M = \begin{bmatrix} m_1 + m_2 & m_2 \\ m_2 & m_2 \end{bmatrix}$ ;  $C = \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_2 \end{bmatrix}$ ;  $K = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix}$ ;  $M_g = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}$ ;  $u(t) = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix}$ ;  $u_1$  为主结构相对基底位移;  $u_2$  为主子结构间相对位移。

## 1.2 传统巨型框架悬挂结构

传统巨型框架悬挂结构中的主子结构间为刚接,如图3所示。传统巨型框架悬挂结构动力计算模型如图4所示。

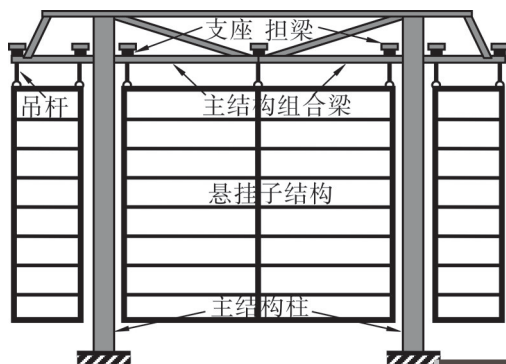


图1 巨型框架隔震悬挂结构示意图

Fig. 1 Sketch of mega-frame with isolated suspension structure

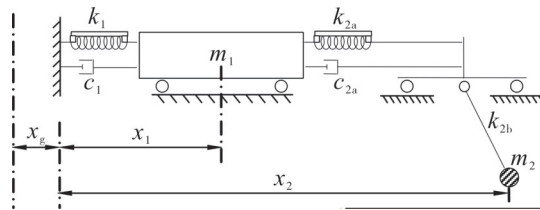


图2 两质点动力分析模型

Fig. 2 Dynamic analysis of 2-mass model

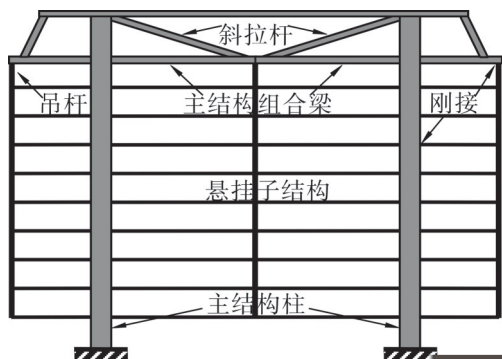


图3 传统巨型框架单段悬挂结构示意图

Fig. 3 Sketch for traditional suspension structure

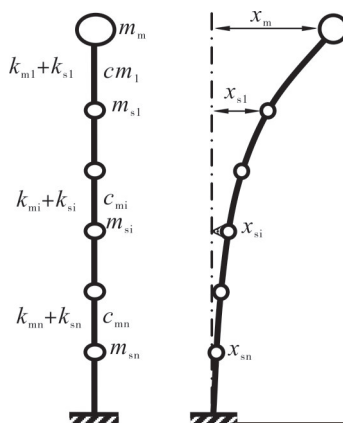


图4 传统巨型框架悬挂结构动力计算模型

Fig. 4 Dynamical module for traditional suspension structure

传统巨型框架单段悬挂结构在整体坐标系下的运动方程为

$$m_c \ddot{x}_c(t) + c_c \dot{x}_c(t) + k_c x_c(t) = -m_c \{1\} \ddot{x}_g(t) \tag{3}$$

其中:

$$m_c = \begin{bmatrix} m_m & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & m_{s1} & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & m_{s(n-1)} & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & m_{sn} \end{bmatrix}; c_c = \begin{bmatrix} c_{m1} & -c_{m1} & 0 & \cdots & 0 \\ -c_{m1} & c_{m1} + c_{m2} & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \vdots & \ddots & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & c_{m(n-1)} + c_{mn} & -c_{mn} \\ 0 & \cdots & 0 & -c_{mn} & c_{mn} + c_{m(n+1)} \end{bmatrix};$$

$$k_c = \begin{bmatrix} k_{m1} + k_{s1} & -(k_{m1} + k_{s1}) & 0 & \cdots & 0 \\ -(k_{m1} + k_{s1}) & \sum_{j=1}^2 (k_{mj} + k_{sj}) & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \vdots & \ddots & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \sum_{j=n-1}^n (k_{mj} + k_{sj}) & -(k_{mn} + k_{sn}) \\ 0 & \cdots & 0 & -(k_{mn} + k_{sn}) & k_{mn} + k_{sn} + k_{m(n+1)} \end{bmatrix}; x_c(t) = \begin{Bmatrix} x_m(t) \\ x_{s1}(t) \\ \vdots \\ x_{sn}(t) \end{Bmatrix}$$

为各质点相对于基底的位移。

### 3 相对位移复频响应传递函数

#### 3.1 巨型框架隔震悬挂结构

假设体系受单位幅值的复简谐加速度激励,则

$$\ddot{x}_g(t) = e^{i\omega t} \tag{4}$$

其中:  $\omega$  为激励频率;  $i$  为虚数单位。

假定相对位移响应函数为

$$u(t) = H_u e^{i\omega t} \tag{5}$$

其中:  $H_u = \begin{Bmatrix} H_{u1}(\omega) \\ H_{u2}(\omega) \end{Bmatrix}$ ;  $H_{u1}(\omega)$  和  $H_{u2}(\omega)$  分别为主结构与子结构的相对位移复频响应传递函数。由式(2)可得

$$(-\omega^2 M + i\omega C + K)H_u = -M_g \{1\} \tag{6}$$

令:

$$\begin{cases} \xi_n = \frac{c_n}{2\bar{\omega}_n m_n} \\ \bar{\omega}_n = \sqrt{\frac{k_n}{m_n}} \end{cases} (n = 1, 2); \begin{cases} \alpha = m_2/m_1 \\ p = \omega/\bar{\omega}_1 \\ q = \bar{\omega}_2/\bar{\omega}_1 \end{cases} \tag{7}$$

将式(7)代入式(6)并在等号两端同除  $\bar{\omega}_1^2 m_1$  可得

$$\begin{bmatrix} -p^2(1 + \alpha) + 2ip\xi_1 + 1 & -\alpha p^2 \\ -\alpha p^2 & -\alpha p^2 + 2i\alpha p q \xi_2 + \alpha q^2 \end{bmatrix} H_u = -\frac{1}{\bar{\omega}_1^2} \begin{Bmatrix} 1 + \alpha \\ \alpha \end{Bmatrix} \tag{8}$$

相对位移复频响应传递函数为:

$$H_{u1}(p) = \frac{A_1 p^2 + iA_2 p + A_3}{(L_1 p^4 + iL_2 p^3 + L_3 p^2 + iL_4 p + L_5) \bar{\omega}_1^2} \tag{9}$$

$$H_{u2}(p) = \frac{iB_1 p + B_2}{(L_1 p^4 + iL_2 p^3 + L_3 p^2 + iL_4 p + L_5) \bar{\omega}_1^2} \tag{10}$$

其中:  $\begin{cases} A_1 = -1 \\ A_2 = 2q\xi_2(1 + \alpha) \\ A_3 = (1 + \alpha)q^2 \end{cases}; \begin{cases} B_1 = 2\xi_1 \\ B_2 = 1 \end{cases}; \begin{cases} L_1 = -1 \\ L_2 = 2[(1 + \alpha)q\xi_2 + \xi_1] \\ L_3 = (1 + \alpha)q^2 + 4\xi_1\xi_2q + 1 \\ L_4 = -2q(\xi_2 + \xi_1q) \\ L_5 = -q^2 \end{cases}$

#### 3.2 传统巨型框架悬挂结构

假定位移响应函数为

$$\mathbf{x}_c(t) = \mathbf{H}_{uc} e^{i\omega t} = \{H_{ucm}(\omega) \ H_{ucsl}(\omega) \ \cdots \ H_{ucsn}(\omega)\}^T e^{i\omega t} \tag{11}$$

则由式(3)可得

$$\mathbf{H}_{uc}(p) = \mathbf{G}^{-1}\{1\} \tag{12}$$

因  $\mathbf{G}^{-1}$  表达式过于繁琐,此处仅给出  $\mathbf{G}$  的表达式,可直接利用其对式(12)进行数值计算。其中

$$\mathbf{G} = \bar{\omega}_i^2 \begin{bmatrix} p^2 - 2i\xi_1 p - [(n+1) + 10\alpha n q^2] & 2i\xi_1 p + (n+1) + 10\alpha n q^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 2ni\xi_1 p/\alpha + n(n+1)/\alpha + 10n^2 q^2 & p^2 - 4ni\xi_1 p/\alpha - 2[n(n+1)/\alpha + 10n^2 q^2] & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \vdots & \ddots & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & p^2 - 4ni\xi_1 p/\alpha - 2[n(n+1)/\alpha + 10n^2 q^2] & 2ni\xi_1 p/\alpha + n(n+1)/\alpha + 10n^2 q^2 \\ 0 & \cdots & 0 & 2ni\xi_1 p/\alpha + n(n+1)/\alpha + 10n^2 q^2 & p^2 - 4ni\xi_1 p/\alpha - 2[n(n+1)/\alpha + 10n^2 q^2] \end{bmatrix}$$

### 4 减震效果分析

#### 4.1 频域分析

为使两种结构具有可对比性,分别作如下假设:

1) 两种结构中主、子结构质量分别相等,且子结构各层集中质量沿高度均匀分布,即

$$\begin{cases} m_m = m_1 \\ m_{si} = m_2/n \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \tag{13}$$

2) 主结构抗侧刚度相等,且沿高度均匀分布,即

$$k_{mi} = (n+1)k_1 \quad (i = 1, 2, \dots, n, n+1) \tag{14}$$

3) 阻尼主要由主结构提供,并且具有相同的阻尼系数,即

$$c_{mi} = c_1 \quad (i = 1, 2, \dots, n, n+1) \tag{15}$$

4) 子结构自身抗侧刚度相等,且沿高度均匀分布。因子结构自身抗侧刚度远大于由隔震支座和子结构重力刚度所形成的等效抗侧刚度,故子结构各层抗侧刚度可近似按下式取用

$$k_{si} = 10nk_2 \quad (i = 2, 3, \dots, n) \tag{16}$$

定义巨型框架隔震悬挂结构与传统巨型框架悬挂结构相比的减震系数为

$$R = \frac{H_{g \max}}{H_{c \max}} \tag{17}$$

其中,  $H_{g \max}$  和  $H_{c \max}$  分别为巨型框架隔震悬挂结构和传统巨型框架悬挂结构的响应最大值,其可为相对位移或加速度。

由式(9),(12),(17)根据不同的质量比  $\alpha$  和频率比  $q$ ,并假定  $\xi_2 = 0.2$ ,可计算出系列主结构相对位移减震系数  $R$  曲面的等值线,如图5所示。

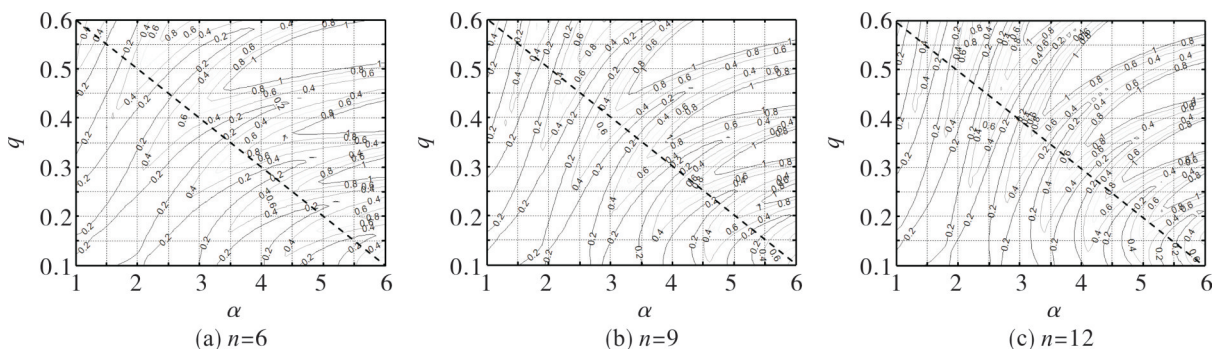


图5 减震系数R等值线

Fig. 6 Contour of damping coefficient R

由图5可见,质量比  $\alpha$  和频率比  $q$  所构成平面内,减震系数  $R$  小于1的区域比例基本在85%以上,且该比例随悬挂子结构层数的增加而减少。其原因在于悬挂子结构层数的增加为主结构提供了更大的附加抗侧刚度,从而减小了传统巨型框架悬挂结构中主结构的相对位移反应。而图中左下半区减震系数均小于0.6,即

主结构相对位移地震反应可减小40%以上,实际应用中可参考下式取值,

$$q + 0.1\alpha \leq 0.7 \tag{18}$$

### 4.2 时域分析

依据上述频域分析结论,建立两种结构体系的三维空间有限元模型,如图6~8所示。巨型框架单段隔震悬挂结构的质量比  $\alpha = 3.4$ , 频率比  $q = 0.13$ , 主、子结构阻尼比分别为  $\xi_1 = 0.05$  与  $\xi_2 = 0.2$ 。

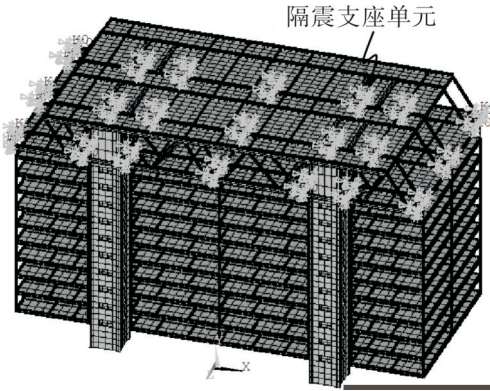


图6 隔震悬挂结构

Fig. 6 Isolated suspension structure

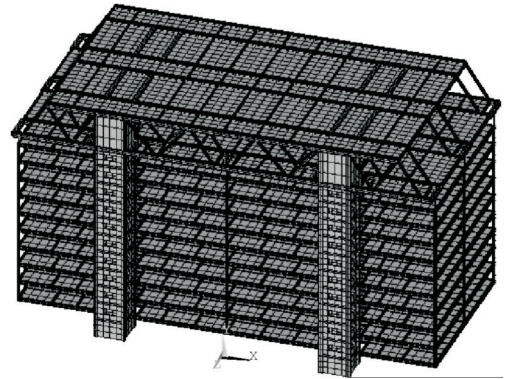
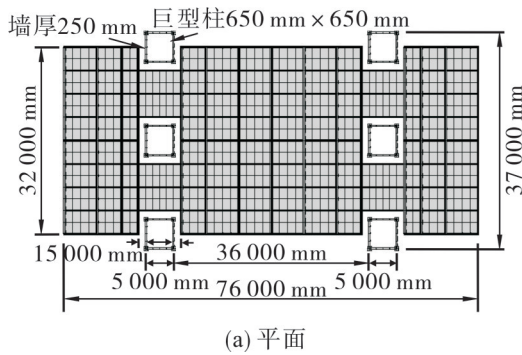
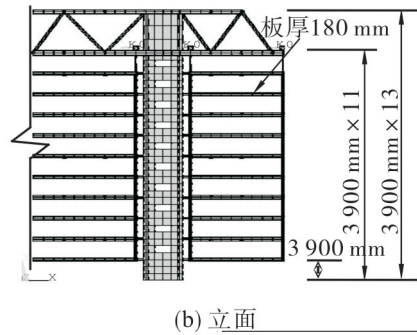


图7 传统悬挂结构

Fig. 7 Traditional suspension structure



(a) 平面

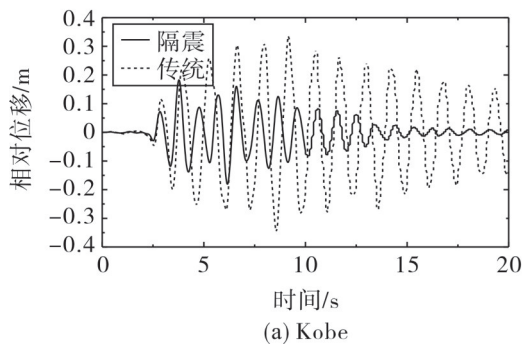


(b) 立面

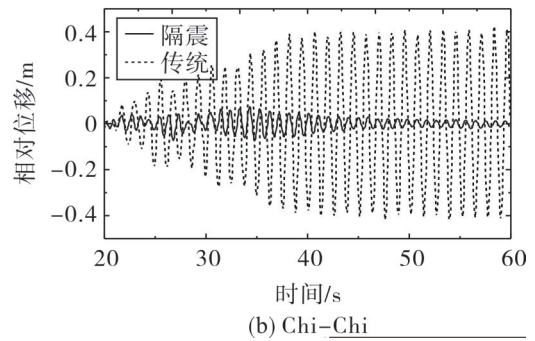
图8 模型信息

Fig. 8 Information of model

时程分析选用两条天然地震波,分别为阪神地震的Kobe波(地面运动峰值加速度PGA为0.61g,地面运动峰值速度PGV为124.6 cm/s)和台湾地震的Chi-Chi波(PGA为0.31g,PGV为22.7 cm/s)。由有限元分析软件LS-DYNA计算主结构相对位移及加速度时程见图9,10。为便于对比,Kobe波地震反应时程截取前20 s, Chi-Chi波的地震反应时程截取20~60 s。



(a) Kobe



(b) Chi-Chi

图9 主结构相对位移

Fig. 9 Relative displacement of mega-frame

由图9,10可知,与传统悬挂结构相比,巨型框架隔震悬挂结构中主结构最大相对位移反应可减小47%

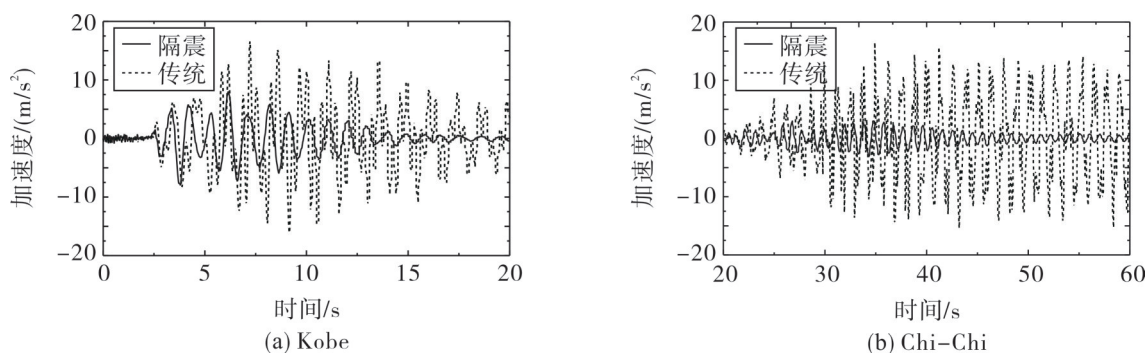


图10 主结构加速度

Fig. 10 Absolute acceleration of mega-frame

(Kobe)和82%(Chi-Chi),加速度反应可减小52%(Kobe)和80%(Chi-Chi),可见减震控制效果较为明显。两条地震波作用下,减震效果差距较大的原因在于:Chi-Chi波的PGV/PGA=0.07 s<0.2 s,属非脉冲型地震动;而Kobe波的PGV/PGA=0.21 s>0.2 s,属脉冲型地震动,使得具有长周期特征的隔震悬挂结构的地震反应增大,进而减弱了其减震控制作用,这与文献[11]所得结论相一致。

## 5 结 论

通过对巨型框架隔震悬挂结构频域及时域内的减震效果分析,可得出如下结论:

- 1) 巨型框架隔震悬挂结构的主子结构频率比与质量比对其减震效果的影响相关,当子结构阻尼比为0.2时,两参数若按式(18)取值,与传统巨型框架悬挂结构相比,主结构相对位移反应可较少40%以上;
- 2) 隔震悬挂结构具有长周期特性,故脉冲型地震动对其减震作用会有不利影响,但不会放大地震作用效应,仍可达到40%以上的减震效果。

### 参考文献:

- [1] 刘坚,陈凡,孙学水. 高层悬挂结构抗震及施工模拟分析研究进展[J]. 广州大学学报, 2015, 14(2):38-42.
- [2] WANG C L, LU Z T, TU Y M. Dynamic responses of core tubes with semi-flexible suspension systems linked by viscoelastic dampers under earthquake excitation[J]. Advances in Structural Engineering, 2011, 14(5):801-814.
- [3] 蔡文华,张继文,涂永明,等. 核筒悬挂建筑结构体系的顺风向风致响应分析[J]. 工程力学, 2011, 28(6):103-109.
- [4] NAKAMURA Y, SARUTA M, WADAA, et al. Development of the core-suspended isolation system[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2011, 40(4):429-447.
- [5] 王春林,吕志涛. 半柔性悬挂减振结构振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(10):109-117.
- [6] 王春林,吕志涛. 基于地震动特性的悬挂减振结构性能[J]. 东南大学学报, 2012, 42(4):719-723.
- [7] 唐柏鉴,裴波,李鑫. 悬挂式巨型钢框架住宅受力性能分析[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(3):57-66.
- [8] 方钊,刘洪兵,柳阳. 刚-柔悬挂结构动力性能研究[J]. 建筑结构, 2014, 44(12):39-44.
- [9] 高林,李长洪,葛楠,等. 悬挂结构地震动力反应分析计算[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(5):701-707.
- [10] 王学庆. 隔震悬挂结构体系的单质点等效动力计算模型[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(2):118-123.
- [11] 杨迪雄,赵岩,李刚. 近断层地震动运动特征对长周期结构地震响应的影响分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(2):133-140.

责任编辑:丁吉海