

# 基础滑移隔震体系滑移位移谱研究

熊仲明<sup>1</sup>, 陈 轩<sup>1</sup>, 虞子良<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 深圳市建筑设计研究总院, 广东 深圳 518031)

**摘要:** 采用 Matlab/Simulink 分析了纯摩擦滑移隔震体系在地震作用下的动力响应, 建立了滑移隔震结构的多自由度计算模型, 并分别对比了滑移隔震体系的等代单自由度刚体模型、双自由度模型与多自由度模型的滑移位移谱、滑移量时程分析曲线。计算结果表明, 双自由度模型与多自由度模型的动力响应比较接近; 隔震层的最大滑移量只与摩擦系数和输入的地震波有关, 而与结构的整体质量无关; 当隔震层的摩擦系数小于 0.1 时, 单自由度刚体模型的和多自由度体系的滑移位移谱拟合较好, 从而验证了等代刚体结构确定的滑移位移谱模拟实际滑移隔震结构的合理性和可行性, 为滑移隔震体系的推广建立了基础。

**关键词:** 滑移隔震结构; 动力响应; 反应谱

**中图分类号:** TU398.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2015)04-0469-8

## Study of the sliding displacement spectrum on the sliding base isolation structure

XIONG Zhongming<sup>1</sup>, CHEN Xuan<sup>1</sup>, YU Ziliang<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Shenzhen General Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd, Shenzhen 518031, China)

**Abstract:** The dynamic response of pure friction-sliding isolation system under seismic action is analyzed through the Matlab/Simulink, and the MDOF calculation model of sliding isolation structure is set up. The sliding displacement spectrum and sliding displacement with time history analysis of curve to the SDOF equivalent rigid model, the DDOF equivalent model and the MDOF equivalent model of the sliding isolation system are contrasted respectively. The results show that the dynamic response of the DDOF equivalent is close to the response of the MDOF equivalent model; the maximum amount of sliding isolation layer is only related with coefficient of the friction and seismic wave put in and nothing is related with the overall mass of the structure. When coefficient of friction of the isolation layer is less than 0.1, the SDOF equivalent rigid model is fitted with the DDOF equivalent model. Accordingly, the rationality and feasibility of using sliding displacement spectrum which is determined by the equivalent rigid model to simulate actual sliding structure is confirmed, and a foundation for the spread of sliding isolation system is established.

**Key words:** sliding structure; dynamic response; response spectrum

基础滑移隔震作为一种有别于一般阻尼比较大和周期较长的抗震结构, 能有效隔绝地震能量向上传递、降低地震作用, 多用于中低层建筑设计中, 在我国具有良好的发展前景; 同时, 由于其构造简单、制作方便、施工工艺简单、造价低廉等优点而具有广泛的应用前景。但目前, 基础摩擦滑移隔震技术的研究并不完善, 其计算理论和方法还需进行深入研究<sup>[1]</sup>。通常用来确定隔震结构地震作用方法主要是时程分析法, 但时程分析法在计算模型、输入地震波的隔震技术等方面存有不足。计算机技术的发展使得对复杂结构的时程分析能力大大提高, 但不具有普遍性及实用意义。因此, 需要建立一种适合大阻尼比和长周期结构的既快速又较为精确的实用简化计算方法。

反应谱抗震设计方法由于理论比较成熟, 计算比较简单, 世界上大部分国家的抗震设计规范将它作为基本设计方法。反应谱理论考虑了结构动力特性和地震动特性的相互关系<sup>[2]</sup>, 概念明确, 计算精度能满足工程要求, 且软件操作便捷易懂, 便于工程技术人员掌握, 成为了工程界最为广泛使用的地震作用方法。

滑移基础隔震反应谱理论在近二、三十年的研究过程中得到不断深入。洪峰<sup>[3]</sup>等人使用等效线性化方法, 由随机模型获得了滑移隔震刚性结构的最大滑移的均值和标准差, 并根据最大滑移反应的均值, 给出了结构的滑移反应谱; 关于滑移摩擦隔震结构体系的研究, 东南大学毛利军、李爱群<sup>[2]</sup>对 67 条地震波按 02 版抗震规范规定的特征周期分类,

收稿日期: 2014-12-12 修改稿日期: 2015-08-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278395); 陕西省教育厅专项基金(12JK0895); 西安市科技攻关课题(GG04051)

作者简介: 熊仲明 (1966-), 男, 教授, 博导, 主要从事隔震减震控制、共同作用、大跨结构理论及试验研究等。E-mail: 631678230@qq.com

对两类场地下滑移隔震结构体系的反应谱进行统计分析,指出了其统计特征.西安建筑科技大学林勇<sup>[4]</sup>通过对建筑物基础滑移隔震结构动力特性的分析,用 FORTRAN 语言编程绘制了滑移隔震结构的反应谱,分析了滑移隔震结构反应谱的影响因素.樊剑、唐家祥<sup>[5]</sup>提出了连续型指数摩擦力模型,并基于此模型,利用高精度的精细时程积分法,计算了滑移隔震结构的地震响应,绘制了上部结构动力系数反应谱和基底最大滑移量反应谱.从上面不难看出滑移基础隔震反应谱理论推动了滑移体系隔震研究的深入,但仍由于滑移隔震体系还处于发展之中,早期所建成的滑移隔震结构都是多层砖混结构为主,建立的动力模型也是基于砖混结构而简化近似的<sup>[6]</sup>.随着滑移隔震的发展,滑移隔震将会在越来越多的结构体系中得以运用,例如框架结构、剪力墙结构等,而基于此类结构体系的滑移隔震动力模型研究甚少,还需进一步探索研究.虽然不少学者通过一定数量的地震波绘出了滑移隔震结构统计反应谱,但是缺乏有关实验和具体实例的验证,在国内建筑界的运用性方面还缺乏系统的研究和积累.

将基于库仑摩擦力模型,通过 Matlab/Simulink 进行等代仿真,将等代单自由度刚体模型和双自由度模型与实际结构的滑移隔震体系的滑移位移谱、滑移量时程分析曲线分别进行对比,探讨在不同的摩擦系数下,隔震体系动力反应的变化情况,以便为实际工程做参考.

## 1. 滑移位移谱计算分析模型的建立

为了更好的研究滑移位移谱,采用双自由度隔震体系等代模型,如图 1 所示.这个等代体系在隔震体系不滑动时,相当于单自由度体系的基本动力性能,而这正是弹性反应谱所采用的分析方法.当隔震体系处于滑动状态时,双自由度简化模型又能很好的模拟上部结构对隔震层的反馈作用,比较接近于多自由度隔震体系.图 1 中,隔震层质量为  $m_0$ ,上部结构的等效质量为  $m_1$ ,  $k_1$ 、 $c_1$  为上部结构的等效刚度和等效粘滞阻尼,  $u$  为隔震层摩擦系数.  $F_f$  为隔震层的摩擦力,  $F_f$  采用的是库仑摩擦力模型,即,  $F_f = umg \cdot \text{sign}(\dot{x})$ ,  $\text{sign}(\dot{x})$  为符号函数,  $\dot{x}$  为隔震层的速度.

(1) 对  $m_1$  作受力分析:

$$m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_0 + \ddot{x}_g) + c_1\dot{x}_1 + k_1x_1 = 0 \quad (1)$$

式中:  $x_1$  为上部结构相对隔震层的位移,  $x_0$  为隔震层相对于基础的位移.

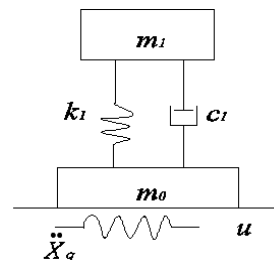


图 1 滑移隔震等代双自由度计算模型  
Fig.1 The DDOF equivalent model of sliding isolation system

(2) 对  $m_0$  作受力分析:

$$m_0(\ddot{x}_0 + \ddot{x}_g) + F_f = c_1\dot{x}_1 + k_1x_1 \quad (2)$$

(3) 对整个体系作受力分析:

$$m_0(\ddot{x}_0 + \ddot{x}_g) + m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_0 + \ddot{x}_g) + F_f = 0 \quad (3)$$

联立方程式,有:

$$m_1\ddot{x}_1 + c_1\dot{x}_1 + k_1x_1 = \frac{-m_1(-F_f - m_1\ddot{x}_1)}{m_0 + m_1} \quad (4)$$

令  $R = \frac{m_1}{m_0 + m_1}$ , 则  $1-R = \frac{m_0}{m_0 + m_1}$ ; 将上式两边同时除以  $m_1(1-R)$ , 得到:

$$\ddot{x} + \frac{c_1}{(1-R)m} \dot{x}_1 + \frac{k_1}{(1-R)m_1} x_1 = \frac{ug \cdot \text{sign}(\dot{x}_0)}{1-R} \quad (5)$$

$$\text{令 } \omega_0 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}, \quad \zeta_0 = \frac{c_1}{2m_1\omega_0} = \frac{c_1}{2\sqrt{k_1m_1}},$$

$$\omega_1 = \frac{\omega_0}{\sqrt{1-R}}, \quad \zeta_1 = \frac{\zeta_0}{\sqrt{1-R}} \text{ 代入上式即为}$$

$$\ddot{x}_1 + 2\zeta_1\omega_1\dot{x}_1 + \omega_1^2x_1 = \frac{ug \cdot \text{sign}(\dot{x}_0)}{(1-R)} \quad (6)$$

上式为一个类似于受强迫振动的单自由度动力微分方程,从方程可以看出,上部结构的动力反应与不同的场地条件、输入的地震动(频谱、幅值和持时)、结构自身的动力特性(刚度、质量和阻尼)、上部结构与隔震层的质量比  $R$  及摩擦系数  $u$  有关.由于隔震结构的第一振型反应最大,隔震结构的第一振型周期和阻尼以及其地震反应主要由隔震体系的特性决定,与结构本身的周期和阻尼无关.若忽略不计不太重要的振型形状因素和高阶振型的贡献,可将隔震层质量及上部结构的质量等效为一个单质量振子  $m$ .

## 2. 等代仿真模型的建立

### 2.1 隔震层摩擦力模型的建立

由于隔震层的强非线性, 滑移隔震结构的动力响应也是强非线性的, 这使得结构的分析比较困难. 对滑移隔震结构进行仿真分析的难点在于准确地建立隔震层的摩擦力模型, 考虑到库伦摩擦力应用的广泛性、确定的准确性及使用上的便捷性, 选取非连续库伦摩擦力作为滑移面摩擦力模型.

隔震层摩擦力的数学方程为<sup>[7]</sup>:

$$F_f = \begin{cases} \operatorname{sign}(\dot{x})uF_n, & |F_{sum}| > uF_n \\ F_{sum}, & \dot{x} = 0 \text{ 且 } |F_{sum}| \leq uF_n \end{cases} \quad (7)$$

其中:  $u$  为摩擦系数,  $F_n$  为正压力.  $F_{sum}$  为静止状态下的受力.

$$F_{sum} = -m\ddot{x}_g - c\dot{x} - kx \quad (8)$$

摩擦力一般分为静摩擦力和动摩擦力, 这主要取决于物体是否运动

$$uF_n = \begin{cases} u_{static}F_n, & \dot{x} = 0 \\ u_{sliding}F_n, & \dot{x} \neq 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $u_{static}$  和  $u_{sliding}$  分别为静摩擦系数和滑动摩擦系数, 综合考虑上述两个条件式, 则可以由下面的式子求出摩擦力:

$$F_f = \begin{cases} \operatorname{sign}(\dot{x})F_{sliding}, & \dot{x} \neq 0 \\ F_{sum}, & \dot{x} = 0 \text{ 且 } |F_{sum}| < F_{static} \\ \operatorname{sign}(F_{sum})F_{static}, & \dot{x} = 0 \text{ 且 } |F_{sum}| \geq F_{static} \end{cases} \quad (10)$$

图2是采用 Matlab/Simulink 的方法建立的摩擦力子模型.

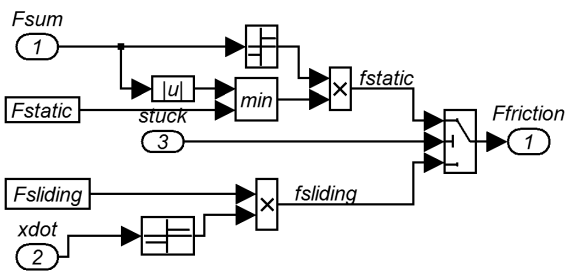


图2 摩擦力子模型

Fig.2 Sub-model of the friction

### 2.2 滑移隔震结构多自由度动力分析模型的建立

将基础滑移隔震结构分为上部结构和隔震层两部分. 其中隔震层的动力分析模型为:

$$F - F_f = m_0(\ddot{x}_0 + \ddot{x}_g) \quad (11)$$

式中:  $m_0$  为隔震层质量,  $F$  为外部输入隔震层的

作用力,  $\ddot{x}_0$  和  $\ddot{x}_g$  分别为隔震层相对地面的加速度和地面的绝对加速度,  $F_f$  为隔震层的摩擦力, 这里选择库伦摩擦力模型.

上部结构剪切型多自由度串联体系, 将隔震层的加速度视为上部结构的地震激励, 则上部结构相对于隔震层  $m_0$  的动力方程为

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M][I](\ddot{x}_0 + \ddot{x}_g) \quad (12)$$

式中:  $(\ddot{x}_0 + \ddot{x}_g)$  为隔震层的绝对加速度,  $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$  为上部结构的质量、阻尼和刚度矩阵.  $\{\ddot{x}\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 、 $\{x\}$  为上部结构相对于隔震层的加速度、速度和位移矢量.

整体结构的动力微分方程为

$$\sum_{i=1}^n m_i(\ddot{x}_i + \ddot{x}_0 + \ddot{x}_g) + m_0(\ddot{x}_0 + \ddot{x}_g) + F_f = 0 \quad (13)$$

采用 Matlab/Simulink 的方法建立得:

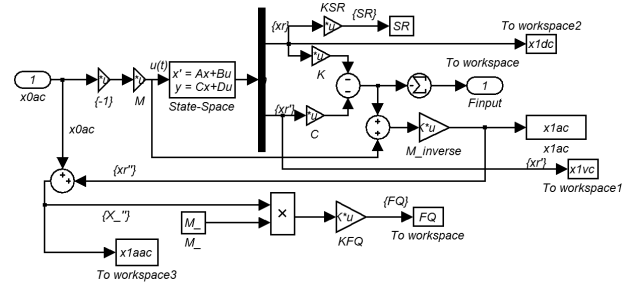


图3 上部结构的仿真模型

Fig.3 The simulation model of the upper structure

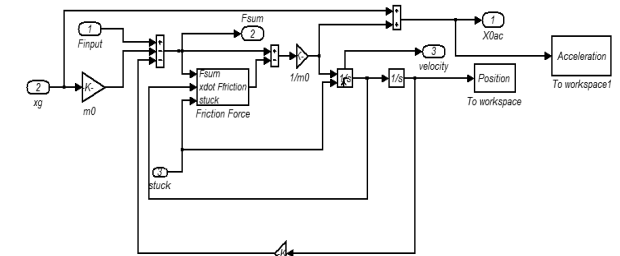


图4 隔震层的仿真模型

Fig.4 The simulation model of the isolation layer

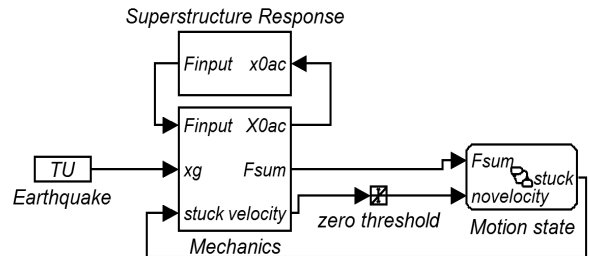


图5 滑移隔震结构的主模型

Fig.5 The master model of the sliding structure

图3为滑移隔震结构的主模型, 描述了上部结构与隔震层的互相作用的关系; 图4为上部结构的仿真模型, 即将上文所提及的上部结构的动力方程

通过 Matlab 表达,图 5 为隔震层的仿真模型,通过定义摩擦力的状态空间函数并采用 simulink 模拟.

3. 基础滑移隔震结构的动力响应分析

选择的实际工程模型<sup>[8]</sup>为陕西省建筑科学研究院滑移隔震试验所采用缩尺模型的原型,模型为 5 层框架结构,首层柱尺寸为 750 mm×750 mm,2~5 层柱尺寸为 600 mm×600 mm,主梁为 300 mm×600 mm,次梁为 200 mm×400 mm,板 100 mm,隔震层厚 100 mm,首层层高为 4.2 m,其余层层高为 3.6 m,柱距 6 m,隔震层尺寸为 15 m×15 m,横向和纵向均为两跨,试验缩尺模型如图 6 所示.详细的工程模型数据见表 1,其中隔震层用第 0 层代替.



图 6 基础滑移隔震试验缩尺模型  
Fig.6 The scale model on test of the sliding base isolation

为分析基础滑移隔震结构的动力响应及隔震效果,选用 Elcentro 和 Taft 两种典型的地震波对基础滑移隔震和基础固定两种结构进行同量级加载,将加速度峰值均按一定的比例调整为八度罕遇地震时所对应的加速度峰值 (400cm/s<sup>2</sup>),运用上面所建立的 Simulink 仿真模型对两种结构在罕遇地震作用下的动力响应进行对比分析,得出结构各楼层的加速度、速度、位移及剪力值,分析其隔震效果.

采用上面所建立的 Simulink 仿真模型在八度罕遇地震时 Elcentro 和 Taft 波对不同的摩擦系数  $u = 0.05, 0.1, 0.15, \infty$  的多自由度滑移隔震体系进行数值仿真分析,得到了结构的各项动力反应,见图 8-9. 图 10 是不同摩擦系数下顶层加速度时程曲线. 其中  $u = \infty$  表示摩擦系数无穷大,基础处于固定状态.

表 1 工程模型相关数据  
Tab.1 The engineering model data

楼层数	质量/kg	刚度/kN·m <sup>-1</sup>		高度/m
		X 方向	Y 方向	
5	146E+03	1.402 9E+05	1.402 9E+05	3.6
4	146E+03	1.558 9E+05	1.558 9E+05	3.6
3	146E+03	1.618 4E+05	1.618 4E+05	3.6
2	146E+03	1.843 5E+05	1.843 5E+05	3.6
1	171E+03	3.439 5E+05	3.439 5E+05	4.2
隔震层	146E+03	—	—	—

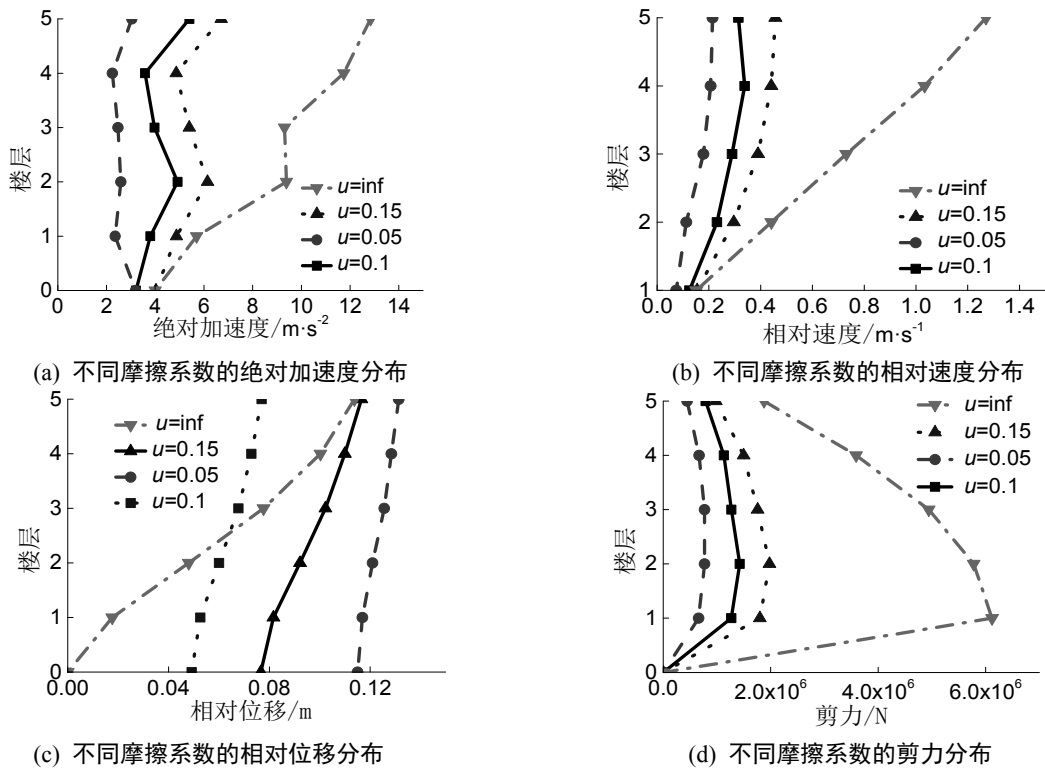


图 7 Elcentro 波 8 度罕遇地震作用下结构动力反应  
Fig.7 Structural dynamic response under the Elcentro wave under eight degrees rare earthquake

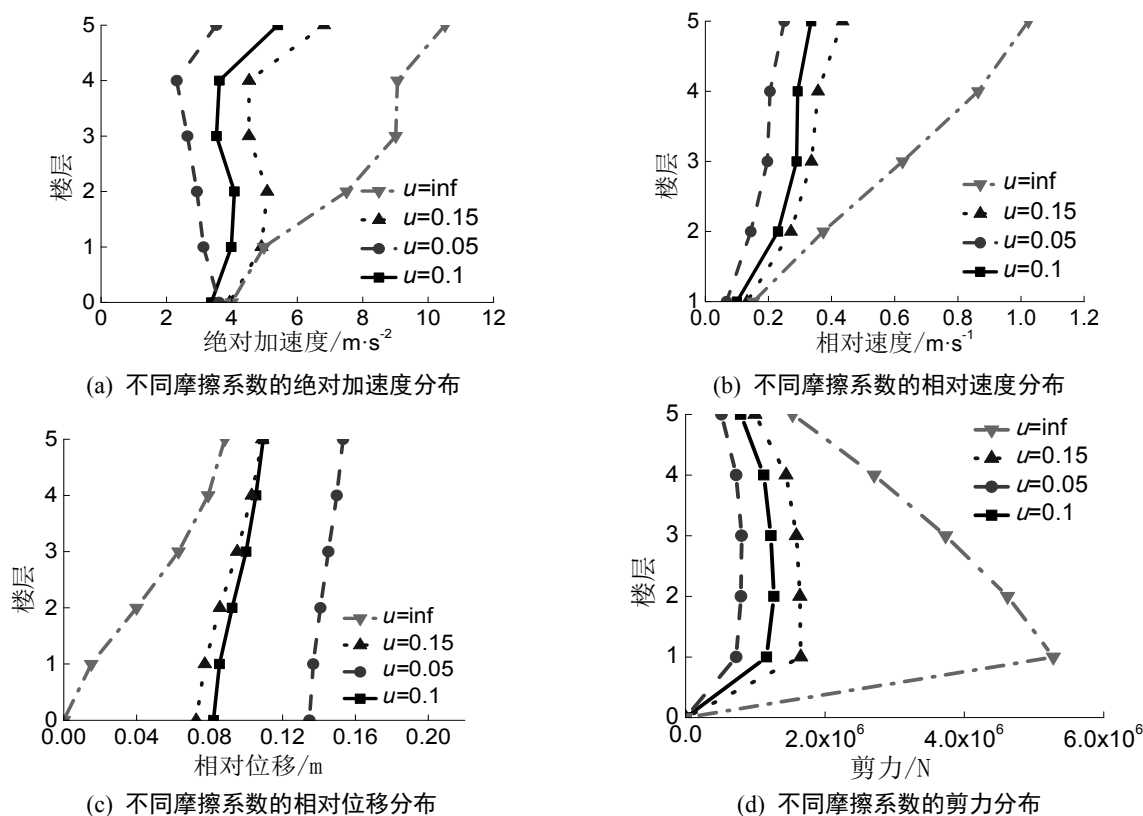


图8 Taft波8度罕遇地震作用下结构动力反应

Fig.8 Structural dynamic response of the Taft wave under eight degrees rare earthquake

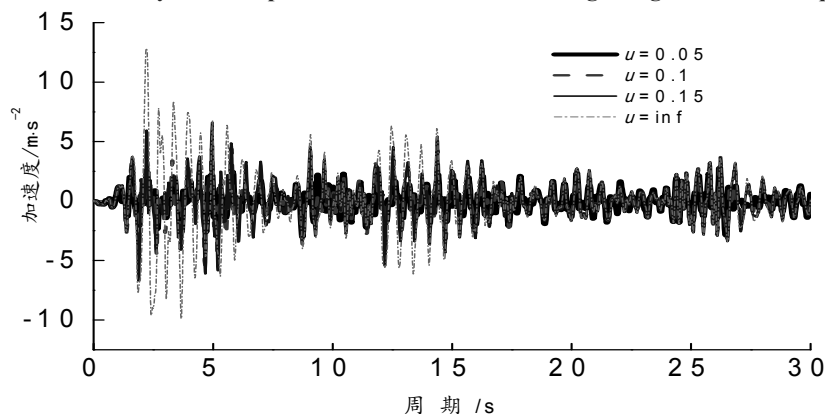


图9 不同摩擦系数下顶层加速度时程曲线

Fig.9 The top-level acceleration time curve under different coefficient of friction

从图 7-8 里可以看到: 相比传统抗震结构, 隔震结构的加速度、速度、剪力在不同摩擦系数水平下有着不同程度的减小, 隔震效果显著; 随着摩擦系数的减小, 加速度也越小, 与其相对应的是隔震层的位移越来越大. 该结果与陕西省建筑科学研究院滑移隔震试验结果较为吻合, 说明 Simulink 能较好地模拟隔震效果.

#### 4. 基础滑移隔震结构的位移谱分析

以多自由度模型 (MDOF) 的动力响应为基准, 将单自由度 (SDOF)、双自由度模型 (DDOF) 在

八度罕遇地震作用下的动力响应与其进行对比, 查看三种模型下结构动力响应的异同并分析两种等代模型的合理性及适用范围. 其中, 楼层数  $N=5$ , 上部结构阻尼比为 5%. 单自由度模型无法输出上部结构的动力响应, 因此选择隔震层滑移位移 (最大滑移量) 作为判别指标.

从图 14 在地震波作用下不同计算模型给出的结构动力响应对比中, 可以看出:

(1) 在 Elcentro 波和 Taft 波作用下, 随着摩擦系数的增大, 滑移隔震结构体系三种不同计算模型下隔震层的滑移位移都逐渐减小且谱形状基本

一致. 不同等代模型的滑移位移谱与多自由度模型的拟合效果因摩擦系数而异, 其中 DDOF 模型和 MDOF 模型的滑移位移谱在整个摩擦系数范围内比较接近, 但从整体上看, DDOF 模型的滑移位移谱谱值要稍大于 MDOF 模型的; SDOF 模型的滑移位移谱在摩擦系数小于 0.1 或者大于 0.6 的时候与 MDOF 模型的基本一致. 当  $u < 0.1$  和  $u > 0.6$  时, 三种不同模型下的滑移位移谱拟合比较好, 谱线基本重合. 当  $0.1 < u < 0.6$  时, MDOF 模型和 DDOF 模型的滑移位移谱比较接近, SDOF 模型的隔震层滑移位移偏小, 随着摩擦系数的增大, 在  $u = 0.4$  时趋近于 0, 结构的隔震效果几乎没有; MDOF 和 DDOF 模型的滑移位移虽然也随着摩擦系数的增大而逐渐递减, 但隔震层仍有着很明显的滑移量且直到  $u = 0.6$  时才趋近于零.

(2) 当摩擦系数  $u < 0.1$  时, 隔震层的滑移量比较大, 隔震效果比较好, 此摩擦系数区间内谱值线下降比较快, 随后以一个比较小的速率减小; 当摩

擦系数  $u > 0.6$  时, 三种不同计算模型下的滑移位移谱值都为 0, 隔震层无滑动, 结构失去隔震能力;  $0.1 < u < 0.6$  时, 隔震层滑移量较小, 隔震效果不是很显著.

(3) 从图 11 可知: 虽然不同计算模型下的最大滑移比较接近, 但是在整个地震作用时程范围内, 隔震层的滑移位移曲线拟合效果较差, 对地震波较敏感: Elcentro 波作用下不同计算模型的滑移位移时程曲线拟合较好, 但 Taft 波下的却区别较大.

(4) 从前面的分析可知, 八度罕遇地震作用下当摩擦系数  $u > 0.6$  时, 隔震层无滑动, 结构失去隔震能力; 当  $u \leq 0.1$  时, 隔震层的滑移量较大, 结构的隔震效果也会比较好, 且此摩擦系数区间内, 不同自由度模型下的滑移位移谱拟合得很好, 这不仅表明  $u \leq 0.1$  时滑移隔震结构不同模型下的隔震层反应比较接近, 也可以间接说明上部结构的反应也很接近, 可以用等代模型来简化计算多自由度模型隔震层及上部结构的反应.

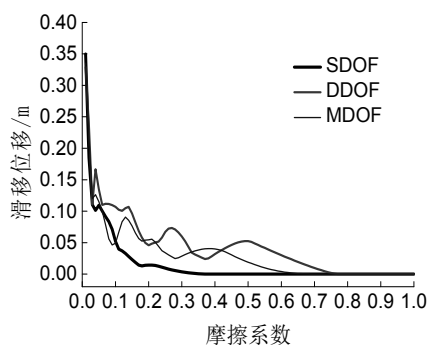


图 10 Elcentro 波作用下的滑移位移谱 ( $\mu < 1$ )

Fig.10 The sliding displacement spectrum under the Elcentro wave ( $\mu < 1$ )

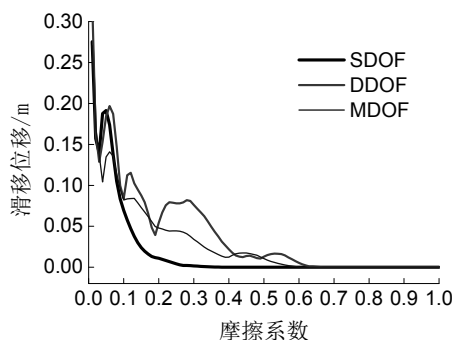


图 11 Taft 波作用下的滑移位移谱 ( $\mu < 1$ )

Fig.11 The sliding displacement spectrum under the Taft wave ( $\mu < 1$ )

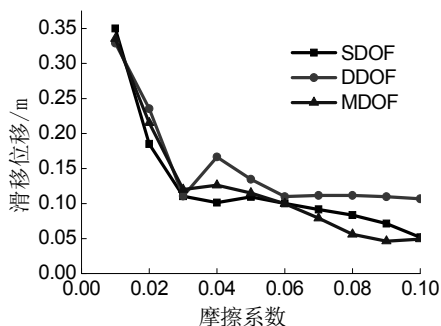


图 12 Elcentro 波作用下的滑移位移谱 ( $\mu < 0.1$ )

Fig.12 The sliding displacement spectrum under the Elcentro wave ( $\mu < 0.1$ )

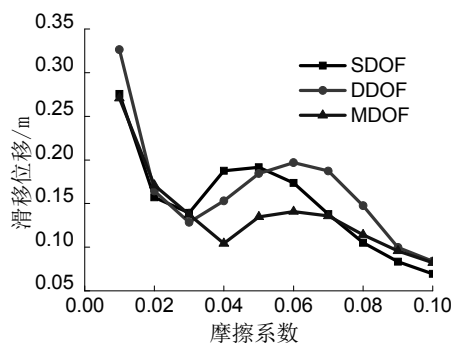


图 13 Taft 波作用下的滑移位移谱 ( $\mu < 0.1$ )

Fig.13 The sliding displacement spectrum under the Taft wave ( $\mu < 0.1$ )

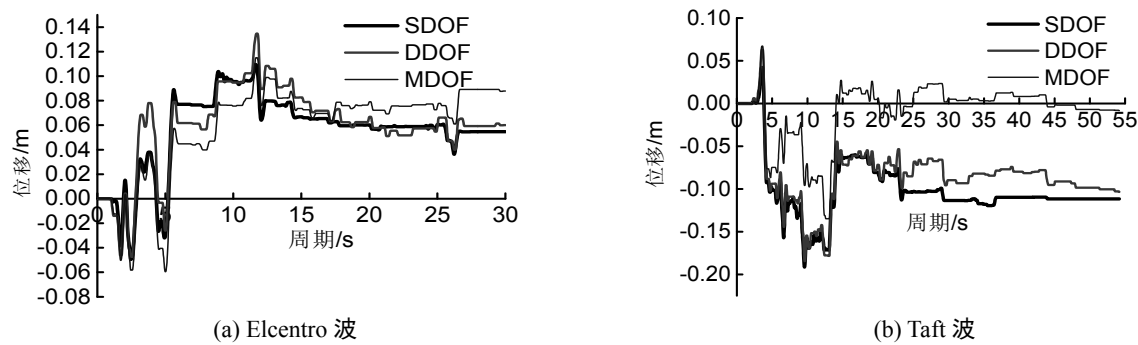


图 14 Elcentro 波和 Taft 波作用下隔震层滑移位移时程曲线

Fig.14 The sliding displacement-time curve of isolation layer under the Elcentro wave and the Taft wave

5. 滑移位移谱的应用

表 2-3 的利用滑移位移谱及等效反应谱确定本文所提及的实际工程模型的的最大滑移量和上部

结构底部最大剪力,见表 2-3.通过表 2-3 可以看出,采用滑移位移谱和上部结构的等效反应谱所得到的结果与时程分析结果差距不是很大,可以满足工程简化计算和初步设计的需要.

表 2 Elcentro 波作用下不同自由度模型动力响应的对比

Tab.2 The contrast between dynamic responses with different degrees of freedom model under the Elcentro wave

上部结构基本周期 $T=0.5902$		多自由度模型		双自由度模型		单自由度模型		误差/%
		最大滑移量 /m	最大底部剪 力/N	最大滑移量 /m	最大底部剪 力/N	最大滑移量 /m	最大底 部剪力 /N	最大 底部 剪力
滑移隔震 体系	$u=0.05$	0.115 04	6.583 9E+05	0.134 73	7.290 7E+05	0.109 55	——	10.74
	$u=0.08$	0.055 98	9.867 1E+05	0.111 55	1.036 2E+06	0.083 58	——	5.02
	$u=0.10$	0.049 17	1.266 8E+06	0.106 8	1.244 7E+06	0.051 77	——	1.74
基础固定	$u=\infty$	——	6.119 8E+06	——	6.245 1E+06	——	——	2.05

表 3 Taft 波作用下不同自由度模型动力响应的对比

Tab.3 The contrast between dynamic responses with different degrees of freedom model under the Taft wave

上部结构基本周期 $T=0.5902$		多自由度模型		双自由度模型		单自由度模型		误差/%
		最大滑移量 /m	最大底部剪 力/N	最大滑移 量/m	最大底部剪 力/N	最大滑移量 /m	最大底 部剪力 /N	最大 底部 剪力
滑移隔震 体系	$u=0.05$	0.134 78	7.235 5E+05	0.184 34	7.694 0E+05	0.191 43	——	6.34
	$u=0.08$	0.114 11	9.706 6E+05	0.147 53	1.078 2E+06	0.105 00	——	11.07
	$u=0.10$	0.082 13	1.159 6E+06	0.083 79	1.352 7E+06	0.069 36	——	16.65
基础固定	$u=\infty$	——	5.277 4E+06	——	4.904 6E+06	——	——	7.06

6. 结语

结合有限元软件 Matlab/Simulink, 建立了滑移隔震等代模型, 对等代单自由度和双自由度模型进行分析得到了滑移位移谱并将其与实际的滑移隔震结构的动力响应进行对比. 主要研究的内容和结果如下:

(1) 罕遇地震作用下, 当摩擦系数较小( $u < 0.1$ )时, 隔震层滑移位移较大, 隔震效果显著, 滑移位移谱值线下降得很快; 当摩擦系数较大( $u > 0.15$ )时, 隔震层滑移量基本保持为一常值, 谱值变化很小且接近于 0, 这表明摩擦系数较大时, 结构的隔震效果不是很显著; 当摩擦系数  $u > 0.6$  时, 隔震层无滑动, 结构失去隔震能力.

(2) 当摩擦系数小于 0.1 时, 由单自由度模型得到的与结构整体质量无关的滑移位移谱与多自由度的拟合较好, 从而验证了等代刚体结构模拟实际滑移隔震结构的合理性和可行性.

(3) 在初步设计时, 可用其来估算给定摩擦系数下的最大滑移量或者在给定最大滑移量的情况下选择合适的摩擦系数范围; 采用双自由度模型的等效反应谱可对滑移隔震结构的底部最大剪力进行初步设计和简化计算.



## 参考文献 References

- [1] 熊仲明, 霍晓鹏, 苏妮娜. 一种新型基础滑移隔震框架结构体系的理论分析与研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(10): 124-129.  
XIONG Zhongming, HUO Xiaopeng, SU Nina. Theoretical analysis of a new kind of sliding base isolation frame structure[J]. Journal of vibration and shock, 2008, 27(10): 124-129.
- [2] 毛利军, 李爱群. 基础滑移隔震体系的地震反应谱[J]. 土木工程学报, 2004, 37(2): 58-65.  
MAO Lijun, LI Aiqun. Earthquake response spectrum of sliding base seismic-isolation system[J]. China civil engineering journal, 2004, 37(2): 58-65.
- [3] 洪峰, 王允红. 摩擦基底隔震刚性结构滑移反应谱的确定[J]. 世界地震工程, 1998, 14(2): 17-22.  
HONG Feng, WANG Yunhong. Determination of sliding displacement response spectra of rigid structures with friction base isolation[J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 1998, 14(2): 17-22.
- [4] 林勇. 基础滑移隔震体系的地震反应谱研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006.  
LIN Yong. Response spectrum research of sliding base isolation structure[D]. Xi'an: Xi'an university of Architecture and Technology, 2006.
- [5] 樊剑, 唐家祥. 基于指数摩擦力模型滑移隔震结构的动力特性[J]. 振动与冲击, 2000, 19(3): 30-33.  
FAN Jian, TANG Jiaxiang. Study on seismic response characteristics of sliding structures based on exponential friction model[J]. Journal of vibration and shock, 2000, 19(3): 30-33.
- [6] 熊仲明, 王清敏, 丰定国, 等. 基础滑移隔震房屋计算恢复力曲线的确定[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版. 1999, 31(2): 145-148.  
XIONG Zhongming, WANG Qingmin, FENG Dingguo, et al. Cure for restoring force calculation defined[J]. Journal of Xi'an university of Architecture and Technology: Natural Science Edition, 1999, 31(2): 145-148.
- [7] 薛定宇, 陈阳泉. 基于MATLAB/Simulink的系统仿真技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.  
XUE Dingyu, CHEN Yangquan. System simulation technology and application on MATLAB/Simulink [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [8] 虞子良. 基础滑移隔震结构的反应谱应用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.  
YU Ziliang. The study on response spectrum's application of the sliding isolated structure[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014.

(编辑 沈波)

(上接第 468 页)

- [3] 樊浩, 王威, 苏三庆, 等. 基于磁记忆的钢结构应力表征技术[J]. 材料科学与工程学报, 2014, 32(5): 705-711.  
FAN Hao, WANG Wei, SU Sanqing, et al. Steel stress characterization technique based on magnetic memory[J]. Journal of materials science & engineering, 2014, 32(5): 705-711.
- [4] 王威, 章红梅, 张富文, 等. 钢结构磁性无损检测中的几个基本技术问题[J]. 结构工程师, 2008, 24(6): 120-127.  
WANG Wei, ZHANG Hongmei, ZHANG Fuwen, et al. Several basic technologies in the magnetic NDT&E for steel structure[J]. Structural engineers, 2008, 24(6): 120-127.
- [5] 严博翀, 陈惟珍. 钢桥无损检测的可靠度理论及应用研究进展[J]. 结构工程师, 2011, 27(6): 147-152.  
YAN Bochong, CHEN Weizhen. Review of study on nondestructive inspection reliability and current situation of its application on steel bridge[J]. Structural engineers, 2011, 27(6): 147-152.
- [6] DUBOV A A. Development of a metal magnetic memory method[J]. Chemical and Petroleum Engineering, 2012, (47): 837-839.
- [7] DUBOV A A. Diagnostics of equipment and constructions strength with usage of Magnetic Memory Inspection [J]. Diagnostics. 2011, 35(6): 19-29.
- [8] DUBOV A A, DEMIN E A, MILYAEV A I. The experience of gas pipeline stress-strain state control with usage of the metal magnetic memory method as compared with conventional methods and stress control means[J]. Welding in the World, 2002, 46(9): 29-33.
- [9] 曾发荣, 王威, 易术春, 等. 基于建筑钢结构拉伸试验磁记忆检测研究[J]. 钢结构, 2015, 30(1): 25-28.  
ZENG Farong, WANG Wei, YI Shuchun, et al. Study of metal magnetic memory based on tensile test of steel building structure[J]. Steel Construction, 2015, 30(1): 25-28.
- [10] 王丹, 董世运, 徐滨士, 等. 静载拉伸45钢材料的金属磁记忆信号分析[J]. 材料工程, 2008, (8): 77-80.  
WANG Dan, DONG Shiyun, XU Binshi, et al. Metal magnetic memory testing signals of 45 Carbon steel during static tension process[J]. Materials engineering, 2008, (8): 77-80.

(编辑 吴海西)