

文章编号: 1000-4750(2016)05-0200-11

# 村镇滑移隔震建筑输入能量的参数敏感性分析

孙 敏<sup>1,2</sup>, 童丽萍<sup>1</sup>, 祝彦知<sup>2</sup>

(1. 郑州大学土木工程学院, 河南, 郑州 450001; 2. 中原工学院建筑工程学院, 河南, 郑州 450007)

**摘 要:** 以村镇滑移隔震建筑为研究对象, 以总输入能量为响应指标, 采用正交试验的方法, 研究了总输入能量对刚度比、第二阶段刚度系数、隔震层屈服位移、摩擦系数、质量比和上部结构固有周期的敏感性。研究表明: 在该文所研究的参数范围内, 总输入能量对参数的敏感性几乎均与地震动幅值和场地条件有关, 各种条件下上部结构固有周期对总输入能量的影响都是最为显著的, 当上部结构固有周期大约为 0.1 s 时, 总输入能量受场地条件的影响比较小, 当地震动幅值较大时, 摩擦系数与总输入能量基本呈正比关系, 刚度比、隔震层屈服位移、第二阶段刚度系数和质量比均对总输入能量有一定的影响, 但影响程度相对较小。

**关键词:** 防灾减灾; 村镇滑移隔震建筑; 总输入能量; 正交试验; 响应指标; 敏感性

中图分类号: TU352.12 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.01.0031

## PARAMETER SENSITIVITY ANALYSIS OF THE EARTHQUAKE INPUT ENERGY FOR RURAL BUILDING STRUCTURES SUPPORTED ON SLIDING BASE-ISOLATION SYSTEMS

SUN Min<sup>1,2</sup>, TONG Li-ping<sup>1</sup>, ZHU Yan-zhi<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering of Zhengzhou University, Henan, Zhengzhou 450001, China;

2. College of Architecture Engineering of Zhongyuan University of Technology, Henan, Zhengzhou 450007, China)

**Abstract:** Taking the stiffness ratio, the post-yield stiffness coefficient, the yield displacement of the isolation layer, the friction coefficient, the mass ratio and the natural period of the superstructure as the influencing factors, sensitivity analysis of the total earthquake input energy is carried out for rural building structures supported on sliding base-isolation systems. In the sensitivity analysis, the orthogonal experiment method is adopted, and the total earthquake input energy is treated as the only response index. The present study shows that the sensitivity of the total earthquake input energy always depends on the amplitudes of earthquake motions and the engineering site conditions in the whole parameter range of concern, and the natural period of the superstructure exhibits a demonstrable effect on the total input energy. The engineering site condition shows the lowest effect on the total earthquake input energy when the natural period of the superstructure is about 0.1s. The total input energy has a nearly linear relationship with the friction coefficient in the case of large amplitudes of earthquake motions. It is also discovered that the stiffness ratio, the yield displacement of the isolation layer, the post-yield stiffness coefficient and the mass ratio have relatively weak effect on the total input energy when the rural building structures supported on sliding base-isolation systems are subjected to severe ground motions.

**Key words:** disaster prevention and reduction; rural building structures supported on sliding base-isolation system; total input energy; orthogonal experiment; response indicators; sensitivity

收稿日期: 2015-01-09; 修改日期: 2015-05-14

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题-传统结构安全性能提升关键技术研究示范项目(2014BAL06B03)

通讯作者: 孙 敏(1975—), 女, 河南许昌人, 副教授, 博士生, 从事工程抗震与防灾减灾研究(E-mail: 149852183@qq.com).

作者简介: 童丽萍(1960—), 女, 陕西周至人, 教授, 博士, 主要从事工程结构抗震、村镇综合防灾与绿色建筑技术和传统营造技术的保护与创新等方面的研究(E-mail: tongliping@zzu.edu.cn);

祝彦知(1965—), 男, 河南商丘人, 教授, 博士后, 主要从事工程抗震方面的研究(E-mail: zhuyan\_zhi@163.com).

地震是一种毁灭性极大的自然灾害,这种自然灾害时刻威胁着人们的生命和财产安全。一直以来,我们国家也是世界上受灾最为严重的国家之一,对近几十年来发生在我们国家的破坏性地震的统计结果表明,这些破坏性地震大多数都是发生在广大的村镇地区,而村镇建筑由于经济等方面的原因,往往抗震能力较差,在历次的破坏性地震中,村镇建筑受损都是极为严重,因此,提高村镇建筑的抗震性能,更好地保护村镇居民的生命和财产安全这一任务已刻不容缓。研究表明,隔震技术确实能有效地提高结构的抗震性能<sup>[1-4]</sup>,橡胶垫隔震支座以其良好的隔震性能,多年来得到了世界学者的普遍关注,对其进行的研究也较多,但这种隔震支座价格昂贵、工艺复杂,不适合在我国量大而面广的村镇地区使用,相比之下,滑移隔震支座价格低廉、工艺简单,且具有较好的隔震性能,因而非常适合于我国广大的村镇地区。

当地震作用发生时,输入到结构中的总能量的大小是决定结构体系损伤程度的非常重要的指标之一,当总输入能量小于结构的耗能能力,并在结构中合理分配时,即可认为此时结构是有着较大的安全储备的,即结构是安全的,反之,结构则是不安全的,所以,总输入能量对于正确评估结构的工作性能及损伤程度起着至关重要的作用,本文相关的工作基于总输入能量而展开。

20世纪80年代,滑移隔震支座已开始应用于实际工程<sup>[5]</sup>,但实践证明,这类支座虽具有较好的隔震效果,却也具有其不容忽视的缺点,如基底滑移位移可能会过大,由此,各国学者提出了以石墨和聚四氟乙烯板等滑移材料和U型环、钢棒及钢管混凝土短柱等滞变型限位装置并联的滑移隔震结构,目前,这些研究多是集中在隔震装置性能方面<sup>[6-9]</sup>,对隔震系统的相关参数对地震响应的影响方面的文章虽也见相关报导<sup>[10-12]</sup>,但考虑的参数相对较少。本文拟相对全面地对带限位装置的村镇滑移隔震建筑的参数对总输入能量的敏感性及其影响规律进行研究。

滑移隔震系统具有高度非线性,系统任何一个参数的微小变化都可能会引起结构响应的巨大变化,因此,研究地震作用下系统的参数对输入能量的敏感性有着重大的研究意义,而所谓敏感性分析指的就是不确定性因素对反应指标的影响趋势及影响程度的分析,以往的敏感性分析往往采用的方

法是:改变一个参数,同时固定其他参数,研究这一变化着的参数对结构响应的影响,这种方法计算量大,同时也不能保证有较好的统计特性。正交试验设计是一种较为有效的方法,它能够通过局部来说明总体,计算结果具有较强的统计特性,同时计算量相对较小。目前,正交试验设计在工程抗震领域,尤其是隔震领域鲜有应用,本文拟采用正交试验的方法对村镇带限位装置的滑移隔震系统的参数作敏感性分析,以期能为滑移隔震系统的设计应用提供理论依据。

## 1 滑移隔震结构的计算模型

### 1.1 能量平衡方程

可以将多质点的滑移隔震结构简化为两质点的离散模型<sup>[13]</sup>,计算简图如图1所示。图中参数分别为: $m$ 和 $m_b$ 、 $k$ 和 $k_b$ 、 $c$ 和 $c_b$ 分别为上部结构和隔震层的质量、刚度和阻尼。 $x(t)$ 、 $\dot{x}(t)$ 和 $\ddot{x}(t)$ 分别为上部结构相对于隔震层的位移、速度和加速度, $x_b(t)$ 、 $\dot{x}_b(t)$ 和 $\ddot{x}_b(t)$ 分别为隔震层相对于地面的位移、速度和加速度,其能量平衡方程为:

$$\int_0^t (\dot{x}(t) + \dot{x}_b(t)) m (\ddot{x}(t) + \ddot{x}_b(t)) dt + \int_0^t m_b \ddot{x}_b(t) \dot{x}_b(t) dt + \int_0^t \dot{x}(t) k x(t) dt + \int_0^t F_h(t) \dot{x}_b(t) dt + \int_0^t \dot{x}(t) c \dot{x}(t) dt + \int_0^t c_b \dot{x}_b(t) \dot{x}_b(t) dt + \int_0^t F_f(t) \dot{x}_b(t) dt = - \int_0^t (\dot{x}(t) + \dot{x}_b(t)) m \ddot{u}_g(t) dt - \int_0^t m_b \ddot{u}_g(t) \dot{x}_b(t) dt \quad (1)$$

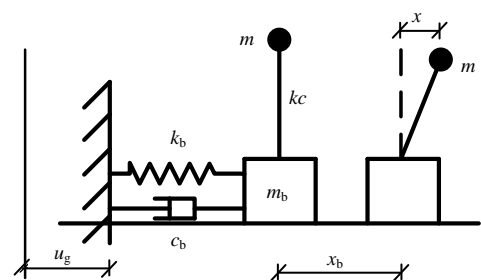


图1 滑移隔震结构计算简图

Fig.1 Diagram for calculation of sliding base-isolated structure

式(1)中 $F_f$ 为隔震层与基础之间的摩擦力,许多学者提出了不同的摩擦力模型,但这些模型各有优缺点,目前,相对来说较为常用的摩擦力模型仍然为库仑摩擦力模型,虽然该模型与实验值存有一定

的误差<sup>[14]</sup>，但总体来看，误差并不大，响应波形的走向及最大值出现的时刻均与试验值基本吻合，且在计算过程中，只要不使积分步长过大，完全可以更大程度地减小累计误差，故目前该模型仍受到诸多学者的青睐<sup>[15]</sup>，本文在计算中也采用库仑摩擦力模型，且  $F_f(t) = \mu g(m_b + m) \text{sgn}(\dot{x}_b(t))$ ，设动摩擦系数与静摩擦系数相等，且均为  $\mu$ ， $F_h$  为隔震层限位装置的恢复力， $g$  为重力加速度， $\ddot{u}_g$  为地震地面运动的加速度，式(1)等号左边依次为： $\int_0^t (\dot{x}(t) + \dot{x}_b(t))m(\ddot{x}(t) + \ddot{x}_b(t))dt$  为上部结构的动能； $\int_0^t m_b \ddot{x}_b(t) \dot{x}_b(t) dt$  为隔震层动能； $\int_0^t \dot{x}(t) kx(t) dt$  为上部结构的势能； $\int_0^t F_h(t) \dot{x}_b(t) dt$  为隔震层的滞回耗能与弹性应变能之和； $\int_0^t \dot{x}(t) c\dot{x}(t) dt$  为上部结构阻尼耗能； $\int_0^t c_b \dot{x}_b(t) \dot{x}_b(t) dt$  为隔震层阻尼耗能； $\int_0^t F_f(t) \dot{x}_b(t) dt$  为隔震层处摩擦力耗能，等号右边两项之和为总输入能。

1.2 隔震层的恢复力模型

在计算中，隔震层摩擦力采用库仑摩擦力模型，其摩擦效应采用刚塑性恢复力模型，如图2所示，限位装置采用双线性恢复力模型，如图3所示，在任一时刻，隔震层的实际恢复力为摩擦力和限位装置的恢复力之和。

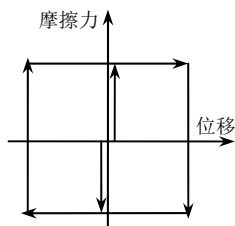


图2 摩擦力的恢复力模型

Fig.2 Restoring force model of friction force

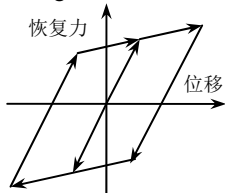


图3 限位装置的恢复力模型

Fig.3 Restoring force model of limit-displacement device

2 响应指标及相关参数的选取

2.1 响应指标的选取

如前所述，本文将总输入能量作为一个响应指标开展相关研究。在计算中，为了消除质量的影响，总输入能量采用其等效速度来表示，其表达式为：

$$v_i = \sqrt{\frac{2E_i}{m_b + m}} \tag{2}$$

式中，符号  $E_i$  代表总输入能量，将式(1)中相应的数据代入式(2)中，可得总输入能量的等效速度为：

$$v_i = \sqrt{-\frac{2\lambda}{\lambda+1} \int_0^t (\dot{x}(t) + \dot{x}_b(t)) \ddot{u}_g(t) dt + \frac{2}{\lambda+1} \int_0^t \ddot{u}_g(t) \dot{x}_b(t) dt} \tag{3}$$

式中，符号  $\lambda$  为上部结构与隔震层的质量之比，即：

$$\lambda = \frac{m}{m_b} \tag{4}$$

$t$  为地震动作用的持时，本文将输入能量等效速度的最大值用  $v_{i,max}$  来表示。

2.2 相关参数的选取

2.2.1 与地震动有关的参数

大量的研究表明，结构的动力响应与地震动的特性有很大关系，正确地选择地震波对能否得到合理且有说服力的结果具有至关重要的作用。本文在计算中所选用的地震波及其相关特性如表1所示，其中，1~3属于I类场地，4~6属于II类场地，7~9属于III类场地，10~12属于IV类场地，通过计算结构在四类场地地震波作用下的总输入能量来考察地震动特性对总输入能量的影响。

表1 所选地震波及其相关特性  
Table 1 Selected seismic waves and their characteristics

序号	地震波名称	场地类别	分量	峰值加速度/ (cm/s <sup>2</sup> )	记录的持续时间/s
1	迁安波	I	NS	132.39	22.02
2	迁安波	I	EW	97.356	21.92
3	Imperial Valley 波	I	N45E	108.195	28.36
4	Taft 波	II	N21E	152.6983	54.36
5	Whittier 波	II	90	-526.9230	40
6	Northridge	II	90	1744.5	60
7	Elcentro 波	III	NS	341.7	53.74
8	Whittier narrows	III	N00W	130.3970	28.26
9	Northridge	III	S16W	-380.98	55.58
10	宁河天津波	IV	EW	-104.18	19.19
11	上海波	IV	1	156.8753	24.9
12	Loma prieta 波	IV	90	155.8490	40

计算时,统一对表1中所选地震波幅值 $A_{\max}$ 进行调整,分别将其幅值 $A_{\max}$ 调整为 $220\text{ cm/s}^2$ 、 $400\text{ cm/s}^2$ 和 $620\text{ cm/s}^2$ ,依次相当于罕遇地震作用下基本烈度为7度、8度和9度时所对应的加速度,地震波的持时按原始记录进行计算。

### 2.2.2 与结构体系有关的参数

村镇建筑大多为中低层建筑,故本文将上部结构和滞变型限位装置的参数分别取为:上部结构与隔震层之间的质量比 $\lambda$ 取为5~30,不隔震时上部结构的自振周期 $T_s = 0.1\text{ s} \sim 1.8\text{ s}$ ,上部结构的粘滞阻尼比为0.05;设隔震层处的动、静摩擦系数相等,且取值均为 $\mu = 0.02 \sim 0.2$ ,将隔震层限位装置屈服之前的刚度与上部结构的刚度之间的比值定义为刚度比 $\beta$ ,赵桂峰等<sup>[10]</sup>通过研究,认为 $\beta$ 的合理取值范围为 $[1/10, 1/4]$ ,本文稍微拓宽其研究范围,将刚度比 $\beta$ 取为 $\beta = \frac{1}{14} \sim \frac{1}{2}$ ;滞变型限位装置的恢复力模型为双线性模型,限位装置屈服之后与屈服之前的刚度之比定义为第二阶段刚度系数,并将其表示为 $\alpha$ ,本文在研究中将 $\alpha$ 取为 $\alpha = 0 \sim 0.2$ ,当 $\alpha = 0$ 时,恢复力模型为理想弹塑性模型;将隔震层屈服位移表示为 $dy$ ,且其取值为 $dy = 0.03\text{ m} \sim 0.2\text{ m}$ 。

## 3 敏感性分析

### 3.1 确定实验方案

本文将总输入能量的最大值 $v_{i,\max}$ 作为反应指标来考察总输入能量对参数的敏感性,将参数 $\beta$ 、 $\alpha$ 、 $dy$ 、 $\mu$ 、 $\lambda$ 和 $T_s$ 作为试验因素,选择五水平的正交试验表 $L_{25}(5^6)$ 进行试验,计算后得到各类场地条件下反应指标对结构体系参数的平均极差如表2~表5所示,各种条件下最大输入能量随各个参数的变化规律如图4~图7所示。

### 3.2 分析实验结果

#### 3.2.1 对参数敏感性排序的分析

从表2~表5可以看出,I类场地中7度罕遇地震作用下,参数的敏感性排序为 $T_s > \beta > dy > \lambda > \mu > \alpha$ ,8度罕遇地震作用下参数的敏感性排序为: $T_s > \beta > dy > \mu > \alpha > \lambda$ ,9度罕遇地震作用下参数的敏感性排序为: $T_s > \beta > dy > \mu > \lambda > \alpha$ 。II类场地中7度、8度和9度罕遇地震作用下参数的敏感性排序分别为: $T_s > \beta > dy > \alpha > \lambda > \mu$ 、 $T_s > \beta > dy > \lambda > \alpha > \mu$ 和 $T_s > \alpha > \mu > \lambda > \beta > dy$ 。III类场地中7度、8度和9度罕遇地震作用下参数的敏感性排序

分别为: $T_s > \alpha > dy > \beta > \lambda > \mu$ 、 $T_s > \alpha > dy > \mu > \lambda > \beta$ 和 $T_s > \mu > \alpha > \lambda > dy > \beta$ 。IV类场地中7度、8度和9度罕遇地震作用下参数的敏感性排序为: $T_s > \beta > dy > \lambda > \alpha > \mu$ 、 $T_s > dy > \lambda > \mu > \alpha > \beta$ 和 $T_s > \mu > \lambda > dy > \alpha > \beta$ 。从以上各种情况下的参数敏感性排序可以看出:在本文所研究的参数范围内,在各种条件下,总输入能量受上部结构固有周期 $T_s$ 的影响都是最大的,而受其他参数的影响随着场地条件及地震波的不同出现了较大的离散性。总的来说,各种条件下参数敏感性排序的规律为:

1) 上部结构固有周期 $T_s$ 总是排在最前面的,这说明输入能量对参数 $T_s$ 的变化是最为敏感的。

2) 摩擦系数 $\mu$ 在参数敏感性排序中的排名跟地震动的幅值有很大的关系。在各种场地条件下,随着地震动幅值的增大,参数 $\mu$ 的排名逐渐提前或不变,这说明,地震动幅值越大,参数 $\mu$ 对总输入能量的影响就相对越大,反之则参数 $\mu$ 对总输入能量的影响就越小,这是因为:当地震动幅值较小时,隔震层很可能还没有开始滑动,此时结构相当于传统的非隔震结构,参数 $\mu$ 对结构的性能是不会产生什么影响的,随着地震动幅值的增大,隔震层逐渐开始滑动,一旦隔震层开始滑动,参数 $\mu$ 便开始对整个系统特性产生影响,从参数的敏感性排序可以看出,此时, $\mu$ 对总输入能量的影响是比较大的。

3) 刚度比 $\beta$ 在参数敏感性排序中的排名跟地震动的幅值有很大的关系。总体来讲,地震动幅值越大,参数 $\beta$ 的排名越靠后或不变,这说明,地震波幅值越大,参数 $\beta$ 对总输入能量的影响就相对越小,当地震动幅值较小时,参数 $\beta$ 对隔震层的是否滑动有着较大的影响,其决定了整个结构体系是传统的非隔震结构还是隔震结构,因而对总输入能量就有着较大影响,随着地震动幅值的增大,隔震层逐渐开始滑动,一旦隔震层开始滑动,参数 $\beta$ 对其所造成的影响便非常小了。

4) 隔震层屈服位移 $dy$ 在各种场地条件下对总输入能量都有一定的影响,7度和8度罕遇地震作用下,参数 $dy$ 在敏感性排序中的排名几乎是一致的(I、II、III类场地中顺序一致,IV场地中略有不同),但在9度罕遇地震作用下其排名便明显靠后了,这说明当地震动幅值较小时,参数 $dy$ 对总输入能量的影响相对较为显著,当地震动幅值较大时,其对总输入能量的影响已非常小了。

5) 质量比 $\lambda$ 在参数敏感性排序中的排名与地震

动的幅值和场地条件都有一定的关系,在 I、II、III 类场地中的 7 度、8 度、9 度罕遇地震作用下及 IV 类场地中的 7 度罕遇地震作用下,参数  $\lambda$  的排名总体较为靠后,这说明此时其对总输入能量虽有一定的影响,但相对来说影响不大,但在 IV 类场地中的 8 度和 9 度罕遇地震作用下,参数  $\lambda$  的排名明显提前,说明此时其对总输入能量的影响相对较大。

6) 第二阶段刚度系数  $\alpha$  对总输入能量的影响也跟地震动幅值和场地条件有一定的关系。从参数敏感性排序可以看出,II 类场地中的 9 度罕遇地震及 III 类场地条件下,参数  $\alpha$  的排名相对较为靠前,其它条件下,参数  $\alpha$  的排名均较为靠后。

### 3.2.2 对输入能量随参数的变化规律的分析

图 4~图 7 显示了各种场地中,结构分别在 7 度、8 度和 9 度罕遇地震作用下各个参数对总输入能量的影响规律。图 4(f) 显示了 I 类场地条件下参数  $T_s$  对总输入能量的影响规律,从中可以看出,随着参数  $T_s$  的增大,总输入能量呈逐渐减小的趋势,当  $T_s$  约小于 0.8 s 时,随着参数  $T_s$  的增大,总输入能量曲线下降的相对较为急剧,尤其是在 9 度罕遇地震作用下,曲线更是急速下降,在 7 度罕遇地震作用下曲线下降的相对较为平缓,8 度罕遇地震时曲线下降的急速程度介于以上两种情况之间;当  $T_s$  约大于 0.8 s 时,三种地震动幅值作用下曲线都较为平稳,并均有稳定在某一值的趋势。图 5(f) 显示了 II 类场地条件下参数  $T_s$  对总输入能量的影响规律,从中可以看出,此时曲线与图 4(f) 明显不同,大约以 0.5 s 为界,当  $T_s < 0.5$  s 时,其与总输入能量基本呈正比关系,而当  $T_s > 0.5$  s 时,两者基本又呈反比关系,当  $T_s \approx 0.5$  s 时,总输入能量达到了最大值。图 6(f) 显示了 III 类场地条件下参数  $T_s$  对总输入能量的影响,从中可以看出,此时曲线的走向与图 5(f) 非常类似,所不同的是,当  $T_s > 0.5$  s 时,随着参数  $T_s$  的增大,总输入能量曲线下降的较为平缓,并明显有稳定在某一值的趋势。图 7(f) 显示了 IV 类场地条件下参数  $T_s$  对总输入能量的影响,从中可以看出,此时曲线的走向与图 6(f) 整体较为类似,当  $T_s > 0.5$  s 时,随着参数  $T_s$  的增大,曲线似乎更为平稳了,说明此时的这个范围内,总输入能量受参数  $T_s$  的影响已非常小了。将以上四幅图总体比较还可看出一个非常有趣的现象,即当  $T_s \approx 0.1$  s 时,同样幅值大小的地震动作用下的 II、III、IV 类场地条件下相应的总输入能量是非常接近的,该值要大于同幅值条件

下的 I 类场地条件下的总输入能量许多,这说明当参数  $T_s \approx 0.1$  s 时,除了 I 类场地之外,总输入能量受场地类别的影响是非常小的。当  $T_s$  在其他范围取值时,其对总输入能量的影响明显与场地条件有很大的关系,同种条件下,I 类场地中的总输入能量最小,IV 类场地中的总输入能量最大,II 类场地和 III 类场地中的总输入能量介于以上两者之间。

表 2 I 类场地条件下反应指标对体系参数的平均极差

Table 2 Average range of response index to system parameters under type I site condition

$A_{\max}/(\text{cm/s}^2)$	体系参数					
	$\beta$	$\alpha$	dy/m	$\mu$	$\lambda$	$T_s/\text{s}$
220	0.02	0.009	0.014	0.012	0.013	0.136
400	0.042	0.027	0.041	0.029	0.026	0.249
620	0.077	0.053	0.066	0.054	0.053	0.390

表 3 II 类场地条件下反应指标对体系参数的平均极差

Table 3 Average range of response index to system parameters under type II site condition

$A_{\max}/(\text{cm/s}^2)$	体系参数					
	$\beta$	$\alpha$	dy/m	$\mu$	$\lambda$	$T_s/\text{s}$
220	0.105	0.098	0.099	0.027	0.091	0.241
400	0.145	0.138	0.144	0.101	0.142	0.383
620	0.163	0.272	0.147	0.255	0.204	0.519

表 4 III 类场地条件下反应指标对体系参数的平均极差

Table 4 Average range of response index to system parameters under type III site condition

$A_{\max}/(\text{cm/s}^2)$	体系参数					
	$\beta$	$\alpha$	dy/m	$\mu$	$\lambda$	$T_s/\text{s}$
220	0.101	0.138	0.127	0.036	0.090	0.343
400	0.149	0.218	0.216	0.181	0.166	0.424
620	0.169	0.307	0.287	0.353	0.298	0.474

表 5 IV 类场地条件下反应指标对体系参数的平均极差

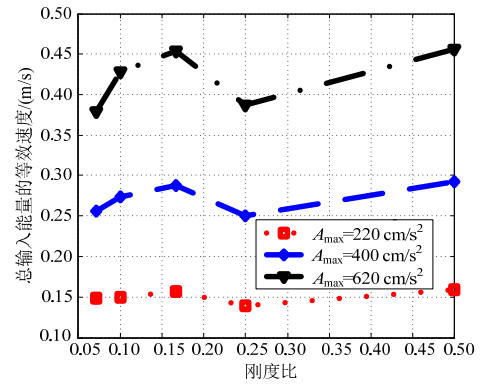
Table 5 Average range of response index to system parameters under type IV site condition

$A_{\max}/(\text{cm/s}^2)$	体系参数					
	$\beta$	$\alpha$	dy/m	$\mu$	$\lambda$	$T_s/\text{s}$
220	0.301	0.217	0.263	0.091	0.252	0.640
400	0.342	0.378	0.409	0.379	0.400	0.963
620	0.342	0.520	0.561	0.658	0.263	1.300

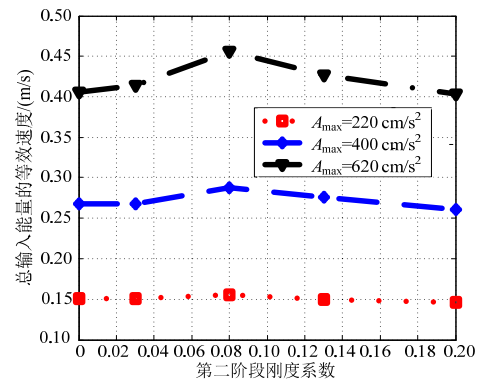
图 4(d) 显示了 I 类场地条件下摩擦系数  $\mu$  对总输入能量的影响,从中可以看出,随着摩擦系数  $\mu$  的逐渐增大,总输入能量虽有变化,但相对来说变化不大,在 7 度和 8 度罕遇地震作用下,当参数  $\mu$  大约处于 0.1 附近时,总输入能量取得了相对最大值,在 9 度罕遇地震作用下,当参数  $\mu$  大约处于 0.05 附近时,总输入能量取得了相对最大值,在各种幅

值的地震波作用下的一个共同的特点是：当参数 $\mu$ 较小时，总输入能量是相对较小的，在本文所研究的参数范围内，当摩擦系数 $\mu=0.02$ 时，三种幅值地震波作用下的总输入能量都是相对较小的，当参数 $\mu>0.1$ 以后，随着其值的逐渐增大，总输入能量平缓减小，并有稳定在某一值的趋势。图 5(d)显示了 II 类场地条件下摩擦系数 $\mu$ 对总输入能量的影响，从中可以看出，在 7 度罕遇地震作用下，当参数 $\mu$ 相对较小时，其与总输入能量呈现出了微弱的反比状态，随着参数 $\mu$ 的进一步增大，总输入能量逐渐趋于稳定，基本不受参数 $\mu$ 的影响。8 度和 9 度罕遇地震作用下参数 $\mu$ 对总输入能量有着相对较大的影响，从中可以看出，随着 $\mu$ 的增大，总输入能量总体呈上升趋势，地震动幅值越大，曲线上升的趋势就越明显。图 6(d)显示了 III 类场地条件下摩擦系数 $\mu$ 对总输入能量的影响，从中可以看出，7 度罕遇地震作用下，参数 $\mu$ 对总输入能量的影响依然不很明显，而 8 度和 9 度罕遇地震作用下，总输入能量随着参数 $\mu$ 的增大而逐渐增大的趋势非常明显，曲线的变化情况与 II 类场地条件下曲线的变化情况较为类似。图 7(d)显示了 IV 类场地条件下总输入能量随着参数 $\mu$ 的变化情况，可以看出，此时，7 度、8 度和 9 度罕遇地震作用下，曲线呈现出了较为一致的变化趋势：随着参数 $\mu$ 的增大，总输入能量曲线虽有上下波动，但总体是呈上升状态的。将以上四幅图比较还可发现：在各种场地条件下的 7 度罕遇地震作用下，总输入能量受参数 $\mu$ 的影响都不显著，可能的原因是：7 度罕遇地震作用下，隔震层很可能处于轻微滑动或不滑动状态，此时结构几乎相当于传统的非隔震结构，因而摩擦系数对结构整个性能的影响是非常小的，从而其对总输入能量的影响也就非常小了。从以上四幅图中还可发现：在地震动幅值及其他条件相同的情况下，I 类场地条件下总输入能量是相对最小的，IV 类场地条件下总输入能量是相对最大的，II 类和 III 类场地条件下的总输入能量居中，这说明参数 $\mu$ 对总输入能量的影响不但与地震动幅值有关，而且与场地条件有关。

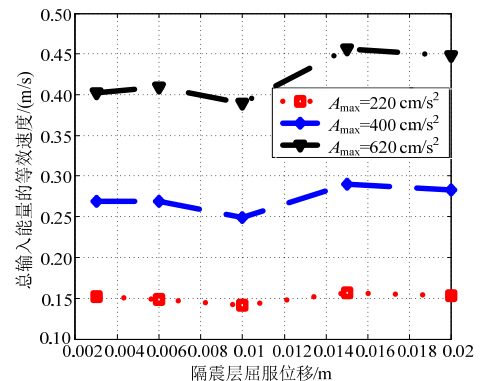
图 4(a)显示了 I 类场地条件下刚度比 $\beta$ 对总输入能量的影响，从中可以看出，此时 7 度、8 度和 9 度罕遇地震作用下总输入能量随着参数 $\beta$ 的变化趋势是基本一致的，随着参数 $\beta$ 的增大，总输入能量曲



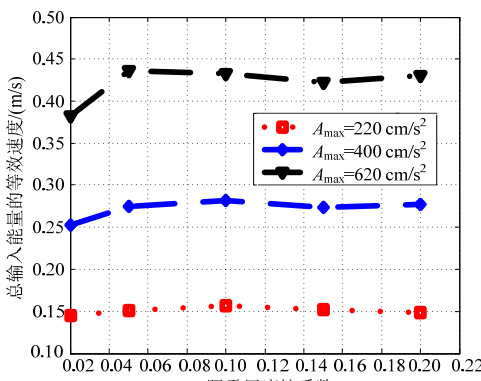
(a)  $\beta$  对  $v_{i,max}$  的影响



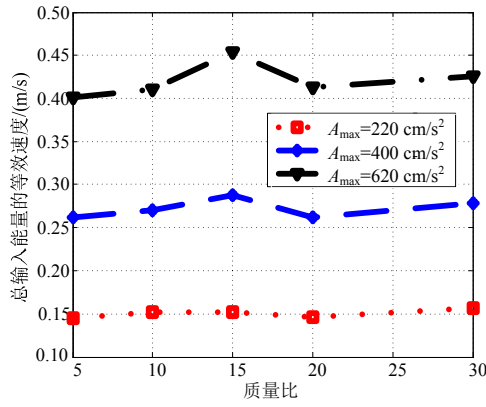
(b)  $\alpha$  对  $v_{i,max}$  的影响



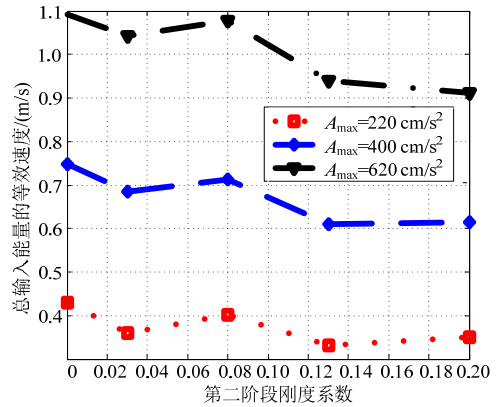
(c)  $d_y$  对  $v_{i,max}$  的影响



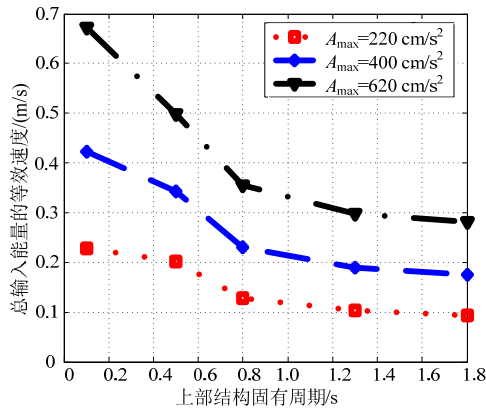
(d)  $\mu$  对  $v_{i,max}$  的影响



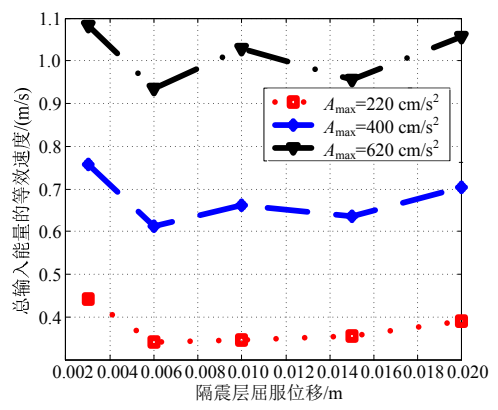
(e)  $\lambda$  对  $v_{i,max}$  的影响



(b)  $\alpha$  对  $v_{i,max}$  的影响



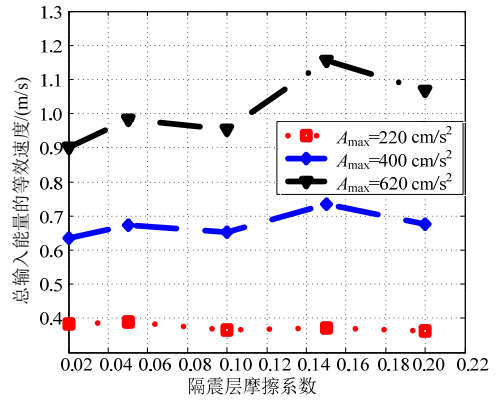
(f)  $T_s$  对  $v_{i,max}$  的影响



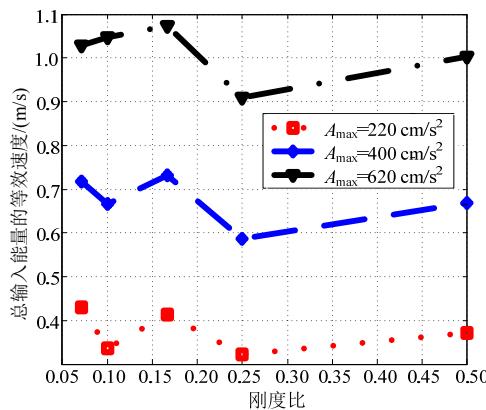
(c)  $dy$  对  $v_{i,max}$  的影响

图4 I类场地条件下结构体系参数对总输入能量的影响  
Fig.4 Effect of system parameters on total input energy under site condition of type I

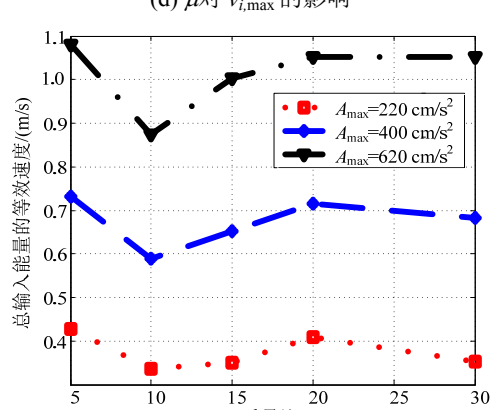
线变化非常明显,这说明此时总输入能量对参数 $\beta$ 是非常敏感的,尤其是在9度罕遇地震作用下,总输入能量曲线上下起伏尤为明显,当参数 $\beta < 0.25$ 时,总输入能量曲线呈现出了抛物线状,在 $\beta$ 为0.17左右时,总输入能量取得了相对较大值,当参数 $\beta > 0.25$ 时,两者基本成正比的关系,总的来讲,当 $\beta$ 取0.25左右及0.07左右时,总输入能量取得



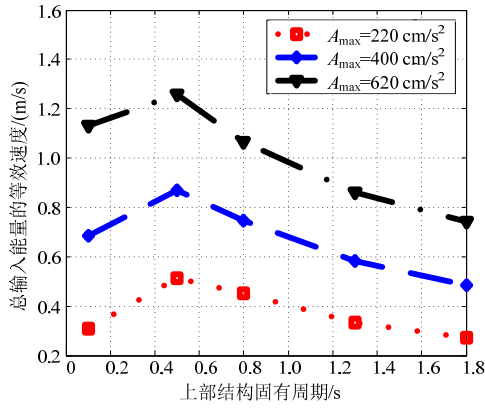
(d)  $\mu$  对  $v_{i,max}$  的影响



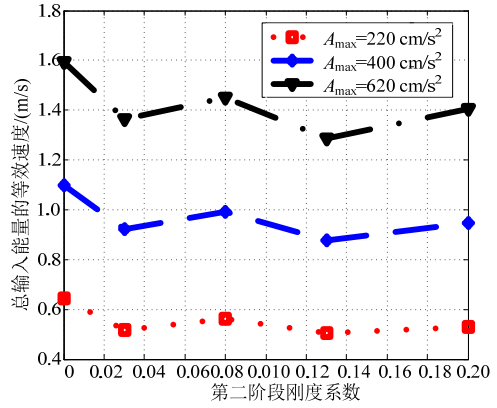
(a)  $\beta$  对  $v_{i,max}$  的影响



(e)  $\lambda$  对  $v_{i,max}$  的影响



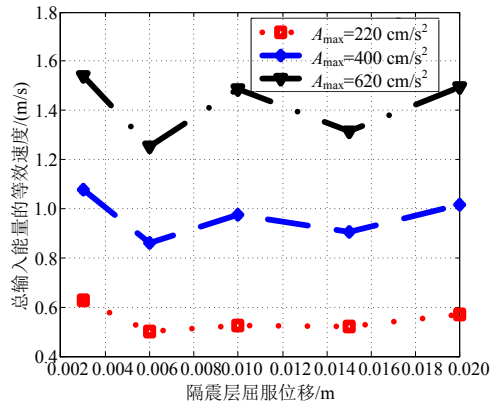
(f)  $T_s$  对  $v_{i,max}$  的影响



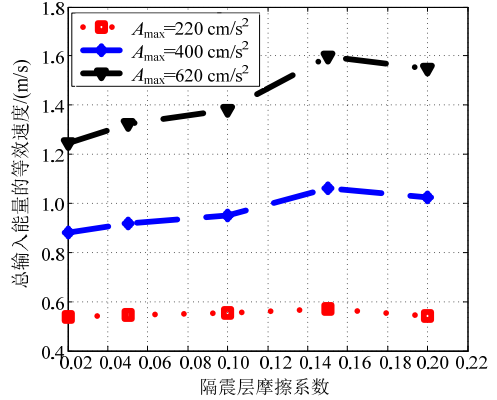
(b)  $\alpha$  对  $v_{i,max}$  的影响

图5 II类场地条件下结构体系参数对总输入能量的影响  
Fig.5 Effect of system parameters on total input energy under site condition of type II

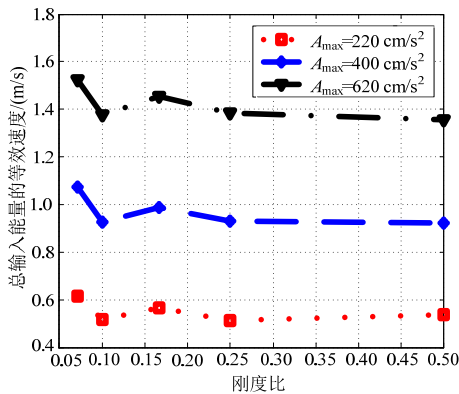
了相对较小的值。图5(a)显示了II类场地条件下刚度比 $\beta$ 对总输入能量的影响,从中可以看出,7度和8度罕遇地震作用下曲线的走向较为一致,9度罕遇地震作用下曲线的走向与以上两者略有不同,总体来讲,当参数 $\beta < 0.25$ 时,随着 $\beta$ 的增大,总输入能量曲线虽有上下波动,但两者大致成反比状态;当 $\beta > 0.25$ 时,两者又呈正比状态,故在 $\beta$ 处于0.25附近时,总输入能量取得了相对较小的值。图6(a)显示了III类场地条件下刚度比 $\beta$ 对总输入能量的影响,可以看出,随着参数 $\beta$ 的增大,总输入能量曲线虽有较小的波动,但总体变化不大,这说明此时总输入能量对参数 $\beta$ 是相对较为不敏感的。图7(a)显示了IV类场地条件下刚度比 $\beta$ 对总输入能量的影响,从中可以看出,三种幅值的地震动作用下,总输入能量曲线呈现出了较为一致的变化趋势,但参数 $\beta$ 对总输入能量的影响总体不大。将以上四幅图比较可以得出如下结论:刚度比对总输入能量总体有影响,但相对来说影响不大,影响程度与地震动幅值和场地条件均有一定的关系,I类场地条件



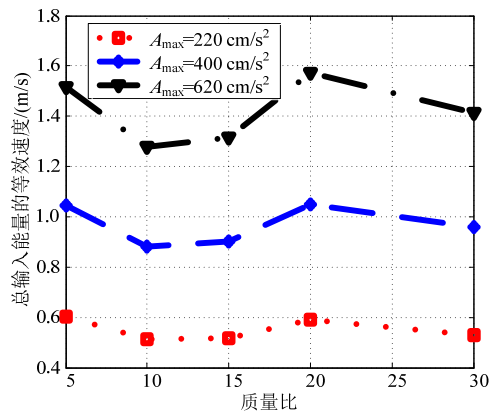
(c)  $\Delta y$  对  $v_{i,max}$  的影响



(d)  $\mu$  对  $v_{i,max}$  的影响

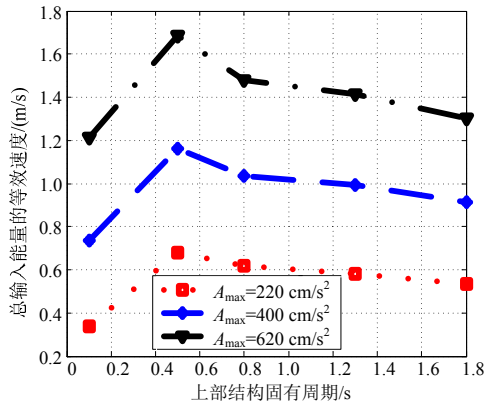


(a)  $\beta$  对  $v_{i,max}$  的影响

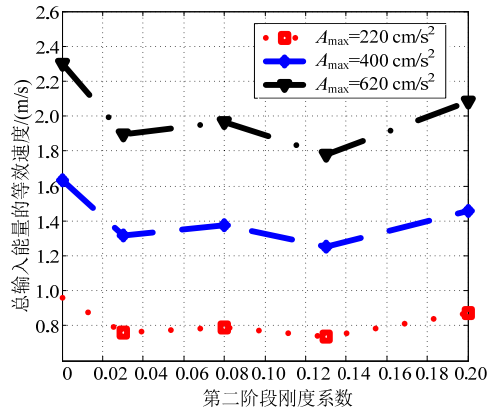


(e)  $\lambda$  对  $v_{i,max}$  的影响





(f)  $T_s$  对  $v_{i,max}$  的影响

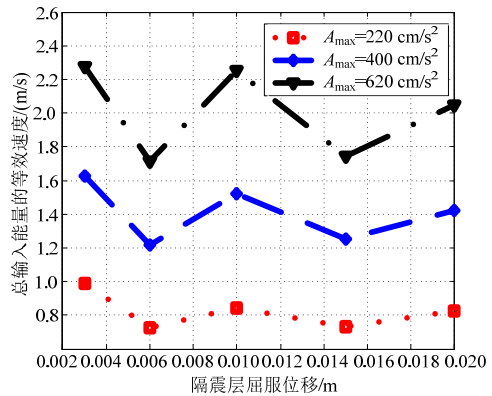


(b)  $\alpha$  对  $v_{i,max}$  的影响

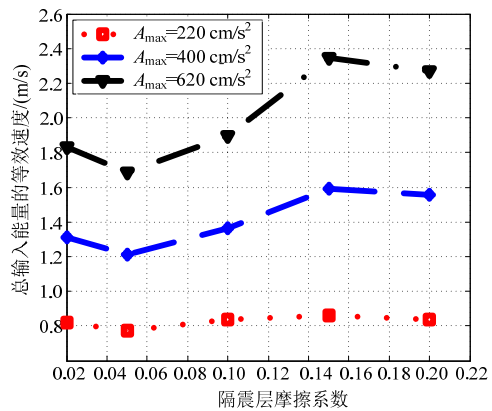
图6 III类场地条件下结构体系参数对总输入能量的影响  
Fig.6 Effect that system parameters on total input energy under site condition of type III

下,  $\beta$ 对总输入能量的影响最为显著, II类场地次之, III类场地和IV类场地条件下影响相对最为不显著; 相对来说, 地震动幅值越大, 参数 $\beta$ 对总输入能量的影响就越小, 以上情况可能的原因是: 结构在I类场地条件及较小振幅的地震动作用下, 隔震层可能处于不滑动或者滑动与不滑动的交替状态, 此时刚度的大小对于限制隔震层滑动起到了较大的作用, 而在III类场地或IV类场地条件下及较大振幅的地震动作用下, 隔震层可能始终处于来回不断地滑动状态, 此时, 刚度的大小对于限制隔震层滑动已经起不到或者说起到了很小的作用, 因此, 刚度比对体系性能的影响便不会很大了, 从而其对总输入能量的影响便也很小了。

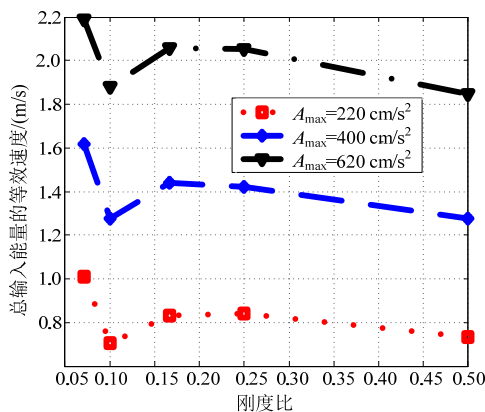
图4(c)显示了I类场地条件下总输入能量随着隔震层屈服位移 $dy$ 的变化情况, 从中可以看出, 随着参数 $dy$ 的增大, 总输入能量虽有上下波动, 但总体呈上升趋势, 且相对来说, 当参数 $dy$ 在0.01m附近时, 总输入能量取得了相对较小的值。图5(c)显示了II类场地条件下总输入能量随隔震层屈服位



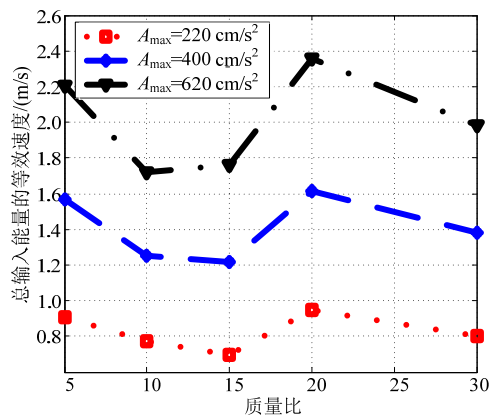
(c)  $dy$  对  $v_{i,max}$  的影响



(d)  $\mu$  对  $v_{i,max}$  的影响



(a)  $\beta$  对  $v_{i,max}$  的影响



(e)  $\lambda$  对  $v_{i,max}$  的影响

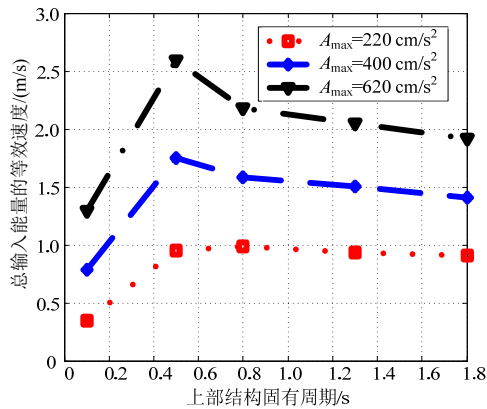
(f)  $T_s$  对  $v_{i,max}$  的影响

图 7 IV 类场地条件下结构体系参数对总输入能量的影响

Fig.7 Effect that system parameters on total input energy under site condition of type IV

移  $dy$  的变化情况,从中可以看出,此时曲线的走向与 I 类场地条件下曲线的走向是不同的,总体来讲,此时参数  $dy$  对总输入能量的影响是相对较为不显著的,当参数  $dy$  约处于 0.006 m~0.015 m 时,总输入能量虽有上下波动,但相对稳定,且取值较小。图 6(c)和图 7(c)分别显示了 III 类场地和 IV 类场地条件下总输入能量随隔震层屈服位移  $dy$  的变化情况,从中可以看出,此时曲线的走向与 II 类场地条件下曲线的走向是基本一致的,但此时在 9 度罕遇地震作用下,曲线上下波动的范围较大,当参数  $dy$  分别处于 0.006 m 和 0.015 m 左右时,各种幅值的地震动作用下,总输入能量都是相对较小的。将以上四幅图比较可以看出,当参数  $dy$  处于 0.006 m 附近时,各种情况下的总输入能量都是相对较小的,对系统是相对最为有利的。

图 4(b)显示了 I 类场地条件下总输入能量随第二阶段刚度系数  $\alpha$  的变化情况,从中可以看出,总的来说,参数  $\alpha$  对总输入能量的影响并不显著,随着  $\alpha$  的增大,总输入能量曲线虽有波动,但总体较为稳定,当  $\alpha$  约处于 0.08 附近时,总输入能量取值相对较大。图 5(b)显示了 II 类场地条件下总输入能量随着第二阶段刚度系数  $\alpha$  的变化情况,从中可以看出,此时,随着参数  $\alpha$  的增大,总输入能量总体呈逐渐减小的趋势。图 6(b)显示了 III 类场地条件下总输入能量随第二阶段刚度系数  $\alpha$  的变化情况,从中可以看出,随着参数  $\alpha$  的增大,总输入能量虽有上下波动,但总体呈现出了微弱的减小趋势。图 7(b)显示了 IV 类场地条件下总输入能量随第二阶段刚度系数  $\alpha$  的变化情况,从中可以看出,此时总输入

能量曲线的走向与 III 类场地条件下总输入能量曲线的走向基本一致,但下降的趋势更为微弱。将以上四幅图进行比较可以发现,当参数  $\alpha$  处于 0.13 附近时,各种条件下的总输入能量均能取得相对较小的值,对整个结构体系是相对较为有利的。

图 4(e)显示了 I 类场地条件下质量比  $\lambda$  对总输入能量的影响,从中可以看出,此时参数  $\lambda$  对总输入能量的影响是相对较为不显著的,随着参数  $\lambda$  的增大,总输入能量曲线虽有上下波动,但总体较为稳定,可以看出,其对参数  $\lambda$  的依赖是非常小的。图 5(e)显示了 II 类场地条件下质量比  $\lambda$  对总输入能量的影响,从中可以看出,此时曲线上下波动的范围有所加大,但参数  $\lambda$  对总输入能量的影响总体来看并不很显著,当  $\lambda$  约位于 10 附近时,总输入能量是相对较小的。图 6(e)显示了 III 类场地条件下质量比  $\lambda$  对总输入能量的影响,可以看出,随着参数  $\lambda$  的增大,总输入能量曲线变化并不很剧烈,而是上下波动,处于相对较为稳定的状态,当  $\lambda$  处于 10~15 时,总输入能量取得相对较小的值。图 7(e)显示了 IV 类场地条件下质量比  $\lambda$  对总输入能量的影响,从中可以看出,此时曲线的走向与 III 类场地条件下总输入能量曲线的走向非常一致。将以上四幅图比较可以看出,参数  $\lambda$  对总输入能量有一定的影响,但影响程度一般,当其位于 10 附近时,各种条件下的总输入能量都是相对较小的,对结构是相对较为有利的。

## 4 结论

本文通过研究,得出如下结论:

(1) 在本文所研究的参数范围内,各个参数对总输入能量的影响几乎都与场地条件有关,同条件下, I 类场地中输入能量最少, IV 类场地中输入能量最多, II 类场地和 III 类场地条件下输入能量居中。

(2) 在本文所研究的参数范围内,各种条件下,总输入能量对上部结构固有周期的变化都是相对最为敏感的。本着输入能量较小的原则,滑移隔震结构比较适合于固有周期较小的建筑,尤其是当上部结构固有周期大约为 0.1 s 时,总输入能量较少(I 类场地中总输入能量的绝对值较小)且受场地条件的影响也较小。

(3) 总输入能量对摩擦系数和刚度比的敏感程度跟地震动的幅值有关,地震动幅值越大,摩擦系数对总输入能量的影响就越大,而刚度比对总输入

能量的影响则越小。摩擦系数只有在隔震层滑动的过程中才会对总输入能量产生影响,且摩擦系数越大,总输入能量就越大,两者成正比关系;当刚度比处在 0.25 左右时,各种条件下的总输入能量是相对较小的。

(4) 隔震层屈服位移、第二阶段刚度系数和质量比对总输入能量均有一定的影响,影响程度均跟场地条件和地震动幅值有关。当隔震层屈服位移为 0.006 m 左右,第二阶段刚度系数为 0.13 左右,质量比为 10 左右时各种条件下的总输入能量是相对最小的,对结构是相对最为有利的。

#### 参考文献:

- [1] 刘鑫,刘伟庆,苗启松,等.砌体加层隔震体系下部结构刚度退化后的抗震性能试验研究[J].工程力学,2013,30(9):117-124.  
Liu Xin, Liu Wenqing, Miao Qisong, et al. Experimental study on aseismic performance of the substructure of isolated masonry with added storey after stiffness degeneration [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(9): 117-124. (in Chinese)
- [2] 洪峰,王前信.滞变-摩擦基底隔震系统的随机地震反应分析[J].地震工程与工程振动,1997,17(3):1-8.  
Hong Feng, Wang Qianxin. Stochastic earthquake response analysis of hysteresis-friction base isolation system [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1997, 17(3): 1-8. (in Chinese)
- [3] 王涛,王飞,侯钢领,等.核电厂隔震结构的振动台实验研究[J].工程力学,2014,31(10):62-68.  
Wang Tao, Wang Fei, Hou Gangling, et al. Shaking table tests on base-isolated nuclear power plant [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(10): 62-68. (in Chinese)
- [4] 庄鹏,薛素铎,李彬双.SMA-橡胶支座隔震系统的动力响应研究[J].振动与冲击,2006,25(3):85-89.  
Zhuang Peng, Xue Suduo, Li Binshuang. Dynamic response of aseismic isolation system using SMA-rubber bearing [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(3): 85-89. (in Chinese)
- [5] Li L. Base isolation measures in aseismic structures [C]. Harbin, China: Proceedings of US-PRC Bilateral Workshop on Earthquake Engineering, 1982, 2: 137-142.
- [6] 闫维明,张志谦,陈适才,等.橡胶隔震支座拉伸刚度理论模型与分析[J].工程力学,2014,31(2):184-189.  
Yan Weiming, Zhang Zhiqian, Chen Shicai, et al. Modeling and analyzing of tensile stiffness for seismic isolated rubber bearings [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(2): 184-189. (in Chinese)
- [7] Tao Liu, Tobia Zordan, Bruno Briseghella, et al. An improved equivalent linear model of seismic isolation system with bilinear behavior [J]. Engineering Structures, 2014, 61(1): 113-126.
- [8] Soni D P, Mistry B B, Panchal V R. Double variable frequency pendulum isolator for seismic isolation of liquid storage tanks [J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(3):700-713.
- [9] 赵桂峰,马玉宏,张永山.弹塑性缓冲限位与滞变-摩擦并联隔震体系参数分析[J].建筑结构学报,2013,34(1):131-138.  
Zhao Guifeng, Ma Yuhong, Zhang Yongshan. Analysis on parameters of hysteretic-friction isolated system with elastic-plastic displacement-constraint device [J]. Journal of Buildings Structures, 2013, 34(1): 131-138. (in Chinese)
- [10] 赵桂峰,马玉宏.村镇建筑带限位装置摩擦隔震体系的参数影响研究[J].振动与冲击,2011,30(11):148-152.  
Zhao Guifeng, Ma Yuhong. Parameters study of rural buildings structures supported on slide-limited friction base isolation system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(11): 148-152. (in Chinese)
- [11] Cenk Alhan, Henri Gavin. A parametric study of linear and non-linear passively damped seismic isolation systems for buildings [J]. Engineering Structures, 2004, 26(4): 485-497.
- [12] 荣强,程文灏.并联基础隔震体系的参数优化[J].工程力学,2009,26(10):140-146.  
Rong Qiang, Cheng Wenrang. Parameter optimization of parallel base-isolation system [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(10): 140-146. (in Chinese)
- [13] Mohammed Qamaruddin, Rasheeduzzafar, Anand S. Arya and Brijesh Chandra. Seismic Response of masonry buildings with sliding substructures [J]. Journal of Structural Engineering, 1986, 112(9): 2001-2011.
- [14] Huang Mingchih, Wang Yenpo, Lin Tzukang, et al. Development of physical-parameter identification procedure for in-situ buildings with sliding-type isolation system [J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(13): 3315-3328.
- [15] Fakhouri M Y, Igarashi A. Dynamic response control of multi-story structures by isolators with multiple plane sliding surfaces: A parametric study [J]. Engineering Structures, 2012, 34(1): 81-94.