

文章编号: 1000-4750(2014)05-0095-06

# 考虑双向地震激励的 标准化地震输入能量反应谱研究

王 丰<sup>1</sup>, 李宏男<sup>2</sup>, 伊廷华<sup>2</sup>

(1. 大连民族学院土木建筑工程学院, 辽宁, 大连 116600; 2. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁, 大连 116024)

**摘 要:** 以往地震输入能量谱的研究几乎都是以单自由度体系和单向地震输入为前提, 没有考虑地震动的多维性和结构非线性反应的空间耦合性。于是, 建立单质点双自由度体系, 假设体系的弹塑性关系为满足二维屈服面函数的理想弹塑性形式, 基于此模型提出双向地震动作用下标准化的地震输入能量反应谱理论。以硬土、中硬(软)土和软土三类场地的地震记录作为体系的双向激励, 建立统计平均的等延性系数标准化地震输入能量谱。分析场地类别、延性系数、两水平主轴方向周期比对标准化地震输入能量谱的影响。分析表明: 各类场地分别具有各自的谱形特征和规律性; 延性系数对硬土地地和中硬(软)土地地的谱值影响较明显, 而对于软土地地, 除长周期外影响很小; 周期比  $\zeta$  对谱值具有一定影响; 基于单自由度体系建立的输入能量谱在某些情况下会高估能量反应。

**关键词:** 地震输入能量; 双向地震激励; 能量谱; 延性系数; 场地类别

中图分类号: P315.9; TU311.3 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.12.0920

## STUDY ON STANDARD EARTHQUAKE INPUT ENERGY SPECTRUM FOR BI-DIRECTIONAL EARTHQUAKE EXCITATIONS

WANG Feng<sup>1</sup>, LI Hong-nan<sup>2</sup>, YI Ting-hua<sup>2</sup>

(1. College of Architecture &amp; Civil Engineering, Dalian Nationalities University, Dalian, Liaoning 116600, China;

2. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

**Abstract:** Traditional studies on earthquake input energy spectra are based on the theory of single degree of freedom system (SDOF) subjected to single directional earthquake excitations, in which the multi-dimensionality of earthquake excitations and the coupling of non-linear structural responses are not considered. In this study, a single-mass dual-degree of freedom system subjected to bi-directional earthquake excitations is proposed. The two-dimensional yield surface elasto-plasticity theory is enforced. The standard earthquake input energy spectrum under bi-directional earthquake excitations is presented. The statistical average spectra are established based on strong earthquake motion records for hard, medium and soft soil sites, respectively. The influences of the soil site, ductility factor and the period ratio on average spectra are analyzed. Results indicate that standard earthquake input energy spectra for each soil site show different characteristics. The influences of the ductility factor on spectra are obvious in hard and medium soil sites, but are not as significant in soft soil sites, excluding with long periods. The period ratio is also found to impose certain effects on the spectra. In some instances, the earthquake input energy responses are found to be overestimated when the SDOF system is adopted.

收稿日期: 2012-12-03; 修改日期: 2013-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108067); 住建部科研开发项目(2013-K2-17); 大连民族学院自主科研基金项目(DC120101095)

通讯作者: 王 丰(1976—), 男, 沈阳人, 副教授, 博士, 从事结构抗震研究工作(E-mail: win\_0803@163.com).

作者简介: 李宏男(1957—), 男, 沈阳人, 教授, 博士, 从事结构抗震及减震控制等研究(E-mail: hnli@dlut.edu.cn);

伊廷华(1979—), 男, 山东平邑人, 教授, 博士, 从事结构健康监测等研究(E-mail: yth@dlut.edu.cn).

**Key words:** earthquake input energy; Bi-directional earthquake excitation; energy spectrum; ductility factor; soil site

结构在地震中的运动反应是一个耗散地震输入能量的过程,运用能量概念来研究和分析结构在地震作用下的抗震性能更具合理性。近年来很多学者对基于能量抗震设计理论和方法进行了研究<sup>[1]</sup>,其中对能量反应谱理论的研究是该领域的重要内容之一。McKevitt<sup>[2]</sup>、公茂盛和谢礼立等<sup>[3]</sup>对滞回能量反应谱进行研究;Chou 和 Uang<sup>[4]</sup>、秋山宏等提出了等效速度谱和吸收能量谱;胡冗冗和王亚勇<sup>[5]</sup>、陈逵等<sup>[6]</sup>对瞬时输入能量反应谱进行研究;Akiyama<sup>[7]</sup>、程光煜和叶列平<sup>[8]</sup>、Benavent 等<sup>[9]</sup>、周云等<sup>[10]</sup>、王德才和叶献国等<sup>[11]</sup>对地震动输入能量反应谱进行研究;Fajfar 和 Vidic<sup>[12]</sup>、肖明葵等<sup>[13]</sup>对各种能量形式的关系及其与地震动参数、结构参数等的相关性进行研究,其中对地震动输入能与滞回能关系的研究取得了一些有益的成果。

已有研究表明<sup>[1-14]</sup>,能量反应谱研究主要集中在单向地震输入下的单自由度体系,不考虑平面外影响。该文以屈服关系满足二维屈服面函数的单质点双自由度体系为分析模型,提出双向地震动作用下标准化的地震输入能量反应谱理论。

## 1 标准化地震输入能量谱理论

### 1.1 谱模型

设一单质点体系,它在相互垂直的  $x$  和  $y$  两主轴方向上具有两水平平动自由度,当沿两个主轴方向同时承受双向地震动作用时,从 0 到  $t$  时刻的能量平衡方程可以表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_0^t m\ddot{x}(t)\dot{x}(t)dt + \int_0^t c_x\dot{x}(t)\dot{x}(t)dt + \\ \int_0^t f(x,t)\dot{x}(t)dt = - \int_0^t m\ddot{x}_g(t)\dot{x}(t)dt \\ \int_0^t m\ddot{y}(t)\dot{y}(t)dt + \int_0^t c_y\dot{y}(t)\dot{y}(t)dt + \\ \int_0^t f(y,t)\dot{y}(t)dt = - \int_0^t m\ddot{y}_g(t)\dot{y}(t)dt \end{array} \right. \quad (1)$$

式(1)中,  $x$  轴平衡方程从左至右的各项分别表示为动能  $E_{Kx}(t)$ 、阻尼能  $E_{Dx}(t)$ 、滞回能  $E_{Hx}(t)$ 和输入能  $E_{Ix}(t)$ ,  $y$  轴平衡方程同理。式中,  $x(t)$ 、 $y(t)$ 分别是

系统沿  $x$ 、 $y$  轴的位移反应;  $f(x, t)$ 、 $f(y, t)$ 分别为系统沿  $x$ 、 $y$  轴的恢复力;  $x_g(t)$ 、 $y_g(t)$ 分别为沿  $x$ 、 $y$  轴地面运动位移。定义两主轴方向的强度折减系数为:

$$R_x = \frac{f_{x,e}}{f_{x,y}}; R_y = \frac{f_{y,e}}{f_{y,y}} \quad (2)$$

式中,  $f_{x,y}$  和  $f_{y,y}$  为不考虑耦合影响的  $x$  和  $y$  轴单自由度体系的屈服力,可以表示为  $f_{x,y} = m\omega_x^2 x_y$  和  $f_{y,y} = m\omega_y^2 y_y$ , 其中  $\omega_x$  和  $\omega_y$  为体系的圆频率,  $x_y$  和  $y_y$  为体系的屈服位移。式中  $f_{x,e}$  和  $f_{y,e}$  分别为系统沿  $x$  轴和  $y$  轴的弹性地震力,由于弹性状态下的单质点双自由度体系相当于两个独立的弹性单自由度体系,所以  $f_{x,e}$  和  $f_{y,e}$  可分别表示为:

$$f_{x,e} = m \cdot \beta_x \cdot \max(|\ddot{x}_g|); f_{y,e} = m \cdot \beta_y \cdot \max(|\ddot{y}_g|) \quad (3)$$

式中,  $\beta_x$  和  $\beta_y$  分别为  $x$  轴和  $y$  轴的放大系数谱。将式(3)代入式(2)有:

$$x_y = \frac{\beta_x \cdot \max(|\ddot{x}_g|)}{\omega_x^2 \cdot R_x}; y_y = \frac{\beta_y \cdot \max(|\ddot{y}_g|)}{\omega_y^2 \cdot R_y} \quad (4)$$

结构抗水平地震作用的强度是基于规范设计反应谱计算得到。从统计上来看,同一场地两正交方向的地震动强度和频谱特性是相似的,所以两正交方向的单自由度屈服强度比值可以近似表示为  $f_{x,y} / f_{y,y} = \alpha(\omega_x) / \alpha(\omega_y)$ , 其中  $\alpha$  为地震影响系数。于是,  $y$  方向和  $x$  方向拟强度折减系数的关系可以近似表示为:

$$R_y = R_x \cdot \varepsilon \quad (5)$$

式中,  $\varepsilon = \frac{\alpha(\omega_x)}{\alpha(\omega_y)} \cdot \frac{\beta_y \cdot \max(|\ddot{y}_g|)}{\beta_x \cdot \max(|\ddot{x}_g|)}$ 。设两主轴方向周期比表示为  $\zeta = T_y / T_x = \omega_x / \omega_y$ 。定义瞬时的位移延性  $\mu_x(t) = x(t) / x_y$  和  $\mu_y(t) = y(t) / y_y$ , 将周期比和位移延性连同式(4)和式(5)代入方程组式(1)中,有:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{b_x^2 (\max |\ddot{u}_g|)^2}{w_x^4 R_x^2} \int_0^t \ddot{u}_x(t) \dot{u}_x(t) dt + \frac{2xb_x^2 (\max |\ddot{u}_g|)^2}{w_x^3 R_x^2} \int_0^t \dot{u}_x(t) \dot{u}_x(t) dt + \frac{b_x^2 (\max |\ddot{u}_g|)^2}{w_x^2 R_x^2} \\ & \int_0^t \frac{f(x,t)}{f_{x,y}} \dot{u}_x(t) dt = - \frac{b_x \max(|\ddot{u}_g|)}{w_x^2 R_x} \int_0^t \ddot{u}_g(t) \dot{u}_x(t) dt, \\ & \frac{b_y^2 (\max |\ddot{u}_g|)^2}{w_y^4 Z^4 e^2 R_y^2} \int_0^t \ddot{u}_y(t) \dot{u}_y(t) dt + \frac{2xb_y^2 (\max |\ddot{u}_g|)^2}{w_y^3 Z^3 e^2 R_y^2} \int_0^t \dot{u}_y(t) \dot{u}_y(t) dt + \frac{b_y^2 (\max |\ddot{u}_g|)^2}{w_y^2 Z^2 e^2 R_y^2} \\ & \int_0^t \frac{f(y,t)}{f_{y,y}} \dot{u}_y(t) dt = - \frac{b_y \max(|\ddot{u}_g|)}{w_y^2 Z^2 e R_y} \int_0^t \ddot{u}_g(t) \dot{u}_y(t) dt \end{aligned} \right. \quad (6)$$

式(6)的两侧同除以  $(\max |\ddot{u}_g|)^2$  和  $(\max |\ddot{u}_g|)^2$ , 有:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{b_x^2}{w_x^4 R_x^2} \int_0^t \ddot{u}_x(t) \dot{u}_x(t) dt + \frac{2xb_x^2}{w_x^3 R_x^2} \int_0^t \dot{u}_x(t) \dot{u}_x(t) dt + \\ & \frac{b_x^2}{w_x^2 R_x^2} \int_0^t \frac{f(x,t)}{f_{x,y}} \dot{u}_x(t) dt = \\ & - \frac{b_x}{w_x^2 R_x} \int_0^t \frac{\ddot{u}_g(t)}{\max(|\ddot{u}_g|)} \dot{u}_x(t) dt, \\ & \frac{b_y^2}{w_x^4 Z^4 e^2 R_x^2} \int_0^t \ddot{u}_y(t) \dot{u}_y(t) dt + \frac{2xb_y^2}{w_x^3 Z^3 e^2 R_x^2} \\ & \int_0^t \dot{u}_y(t) \dot{u}_y(t) dt + \frac{b_y^2}{w_x^2 Z^2 e^2 R_x^2} \\ & \int_0^t \frac{f(y,t)}{f_{y,y}} \dot{u}_y(t) dt = - \frac{b_y}{w_x^2 Z^2 e R_x} \\ & \int_0^t \frac{\ddot{u}_g(t)}{\max(|\ddot{u}_g|)} \dot{u}_y(t) dt \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式(7)即为单质点双自由度体系的标准化能量平衡方程组。式中  $x$  轴平衡方程的各项从左至右分别表示为标准化的动能  $e_{Kx}(t)$ 、阻尼能  $e_{Dx}(t)$ 、滞回能  $e_{Hx}(t)$  和输入能  $e_{Ix}(t)$ ,  $y$  轴的平衡方程同理。比较式(7)和式(6), 式(7)中的动能、阻尼能和滞回能表达式均不包括地震峰值加速度, 而输入能中的  $\ddot{u}_g(t) / \max(|\ddot{u}_g|)$  和  $\dot{u}_g(t) / \max(|\dot{u}_g|)$  相当于归一化的地震加速度时程, 这样建立的能量平衡关系可消除地震记录中不同峰值加速度的影响, 以便建立统计平均的能量反应谱。

通过式(7)的推导可知, 标准化能量与式(1)中相应能量项的关系为:

$$e_a(t) = \frac{E_a(t)}{(\max(\ddot{u}_g))^2} \quad (8)$$

式中:  $e_a(t)$  表示  $x$  轴或  $y$  轴方向的  $e_K(t)$ 、 $e_D(t)$ 、 $e_H(t)$  和  $e_I(t)$ ;  $E_a(t)$  表示  $x$  轴或  $y$  轴方向的  $E_K(t)$ 、 $E_D(t)$ 、

$E_H(t)$  和  $E_I(t)$ ; 而  $\ddot{u}_g$  表示  $x$  轴或  $y$  轴方向的地面运动加速度。其中,  $x$  轴方向的标准化输入能表示为:

$$e_{Ix}(t) = - \frac{b_x}{w_x^2 R_x} \int_0^t \frac{\ddot{u}_g(t)}{\max(|\ddot{u}_g|)} \dot{u}_x(t) dt \quad (9)$$

基于以上推导, 建立双向地震动作用下标准化输入能量谱的方法为: 确定目标延性系数  $\mu$ , 确定系统的  $\omega_x$ 、 $\omega_y$  (或  $T_x$ 、 $T_y$ ) 和阻尼比  $\zeta$ , 计算周期比  $\zeta$ , 初步设定  $R_x$  值, 将  $R_x$ 、 $\zeta$  和  $\zeta$  代入式(7)中可得到给定地震作用下体系的延性系数  $\mu_x$  和  $\mu_y$  (最大位移延性), 然后代入式(9)中计算出标准化的累积输入能量值  $e_{Ix}(t)$ 。将  $\mu_x$  与目标延性系数  $\mu$  相比较, 若近似相等, 则  $e_{Ix}(t)$  为标准化的输入能量谱值; 若不近似相等, 则需调整  $R_x$  值重新计算, 反复迭代直到满足要求。通过这样的迭代过程可以建立等延性系数  $\mu$  且等周期比  $\zeta$  的标准化输入能量谱, 表示为  $Se_I(T, \zeta, \mu, \zeta)$ , 这里  $T=T_x$ 。

### 1.2 弹塑性计算规则

假定单质点双自由度体系的屈服关系符合于二维屈服面函数<sup>[15]</sup>, 可以表示为:

$$F(f(x,t), f(y,t)) = \left( \frac{f(x,t)}{f_{x,y}} \right)^2 + \left( \frac{f(y,t)}{f_{y,y}} \right)^2 = 1.0 \quad (10)$$

为了简化分析, 假设符合理想弹塑性恢复力特性。系统的弹塑性恢复力矩阵可以表示为:

$$\mathbf{K}_{ep} = \mathbf{K}_e - \frac{\mathbf{K}_e \left\{ \frac{\partial F}{\partial \{f\}} \right\} \left\{ \frac{\partial F}{\partial \{f\}} \right\}^T \mathbf{K}_e}{\left\{ \frac{\partial F}{\partial \{f\}} \right\}^T \mathbf{K}_e \left\{ \frac{\partial F}{\partial \{f\}} \right\}} \quad (11)$$

式中,  $\mathbf{K}_e$  为系统的弹性刚度矩阵, 计算时取为对角阵  $\text{Diag}(w_x^2, w_y^2)$ 。当  $F < 1$  时, 系统的切线刚度阵  $\mathbf{K}_t = \mathbf{K}_e$ ; 当  $F \geq 1$  时, 两水平自由度运动耦合, 发

生屈服，系统的切线刚度阵  $K_t = K_{ep}$ 。

## 2 标准化地震输入能量谱分析

### 2.1 地震动选取及输入能量谱形式

按硬土、中硬(软)土和软土三类场地分别选择 34 组、35 组、20 组，共 89 组(178 条)双向地震记录，见文献[16]。所选取的地震记录满足如下原则：  
1) 震级(Ms)在 6 级以上；2) 断层距在 15km~45km；  
3) 每组双向地震动记录中，至少有一条加速度峰值在 0.1g 以上。

设能量谱的谱形式为：纵坐标为体系的  $x$  方向标准化输入能量谱值  $Se_1(T, \xi, \mu, \zeta)$ ，横坐标为周期  $T = T_x$ 。按此谱形，统计分析中双向地震记录中每个分量的地震动均需沿体系的  $x$  方向输入一次，这样三类场地的 89 组地震动记录相当于 178 组地震动记录。此外， $x$  主轴方向的目标延性系数取  $\mu = 1.5、2、3、4、6$ ；两主轴方向周期比取  $\zeta = T_y / T_x = 0.4、0.67、1、1.5、2.5$ 。

### 2.2 输入能量谱分析

图 1 按不同的延性系数给出了硬土地地、中硬(软)土地地、软土地地下周期比  $\zeta = 1$  时的等延性系数标准化地震输入能量反应谱。由图 1 可知，三类场地下输入能量谱的谱形特征为：  
1) 硬土地地，谱曲线在 0~3s 内可分为三个阶段：急剧的上升阶段(大约在 0~0.4s)、较短的峰值平台阶段(大约在 0.4s~0.9s)、较长的下降阶段(大约在 0.9s~3.0s)。  
2) 中硬(软)土地地，谱曲线也分为三个阶段：急剧上升阶段(大约在 0~0.6s)、较长的峰值平台段(大约在 0.6s~1.4s)、平缓的下降阶段(大约在 1.4s~3.0s)。  
3) 对于软土地地，大约在 0~2.1s 为较平缓的上升阶段，2.1s 之后为峰值阶段，0~3s 没有下降阶段。  
针对三类场地的谱形特征分析原因：场地的卓越周期是场地周期中最容易被激励起的周期，对于弹塑性体系其输入能量也会放大，而场地卓越周期很大程度上取决于场地的固有周期。硬土地地的卓越周期短，所以在短周期出现谱值的峰值阶段；中硬(软)土地地的卓越周期其次，谱值的峰值阶段所对应的周期也较硬土地地大，且峰值平台段较长；对于软土地地，其卓越周期比前两者大，峰值会出现在比中等场地更大的周期。

另外，从图 1 还可以看到，硬土地地和中硬(软)土地地的峰值阶段和下降阶段，延性系数对谱值的影响较明显，特别是中硬(软)土地地的中长周期段

(下降段)，其规律为随着延性系数增加标准化输入能谱值逐渐减小。而在软土地地，除 2s~3s 的长周期阶段外，不同延性系数所对应的谱值非常接近。

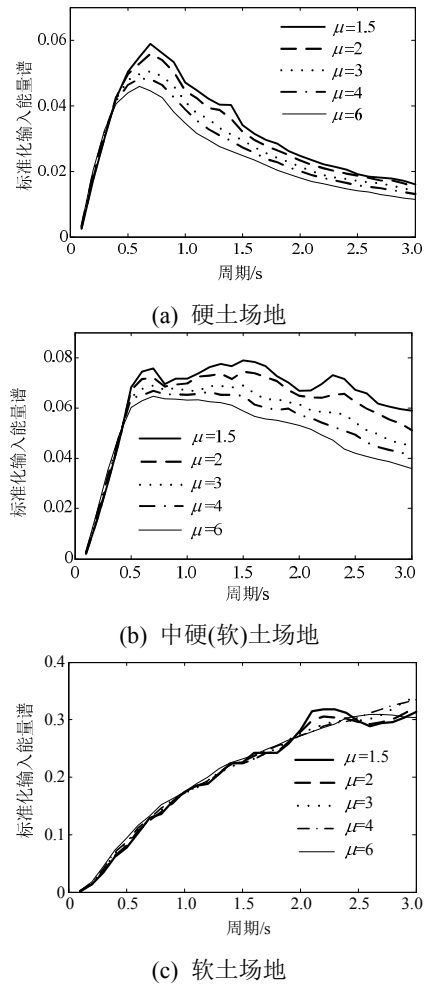


图 1 标准化地震输入能量谱 ( $\zeta = 1$ )

Fig.1 Standard earthquake input energy spectra ( $\zeta = 1$ )

由前所述，双向地震动作用下的标准化地震输入能量谱表示为  $Se_1(T, \xi, \mu, \zeta)$ 。同样可定义单自由度体系的标准化输入能量谱为：地震输入能量与地面峰值加速度平方比值的累积值，表示为  $Se_{s,1}(T, \xi, \mu)$ 。设  $\alpha = Se_1(T, \xi, \mu, \zeta) / Se_{s,1}(T, \xi, \mu)$ ，那么比值  $\alpha$  为  $T、\xi、\mu$  和  $\zeta$  的函数，可以建立等延性系数的比值  $\alpha$  谱。比值  $\alpha$  谱反映了双自由度体系在双向地震下的地震输入能量谱与单自由度体系的地震输入能量谱的比较关系。图 2 按不同的延性系数( $\mu = 2、4、6$ ) 给出了三类场地下等延性系数比值  $\alpha$  谱，其中双自由度体系的周期比  $\zeta = 1$ 。由图 2 可知：  
1) 硬土地地和中硬(软)土地地，随着延性系数的增大， $\alpha$  值有减小的趋势，而软土地地此特点不明显。  
2) 三类场地的短周期时(大约  $T < 0.2s$ )，两种输

入能量谱相比偏差较大。3) 硬土地地和中硬(软)土地地下,  $\alpha$  谱值通常小于 1, 当延性系数较大时( $\mu=4$  或 6), 偏差较为明显, 其中硬土地地的  $\alpha$  最小值为 0.93, 中硬(软)土地地的  $\alpha$  最小值为 0.86。通过以上现象, 说明在一些情况下, 特别在高延性系数时, 通过单自由度体系建立的地震输入能量谱会高估输入能反应。

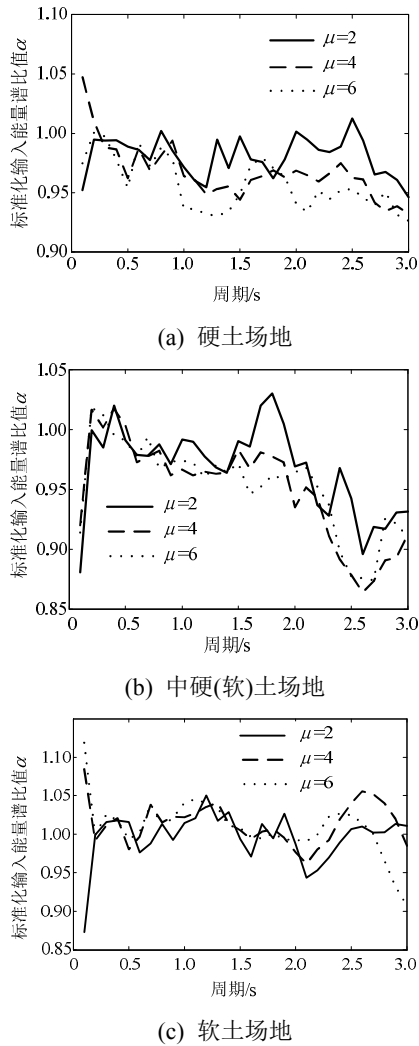


图 2 基于双自由度体系和基于单自由度体系的标准地震输入能量谱的比值

Fig.2 Comparison of standard earthquake input energy spectra between BDOF system and SDOF system

双自由度体系的标准化地震输入能量谱是周期比  $\zeta$  的函数, 表示为  $Se_1(\zeta)$ 。为了考虑周期比  $\zeta$  对标准化地震输入能量谱的影响, 设  $\theta = Se_1(\zeta=0.4, 0.67, 1.5, 2.5) / Se_1(\zeta=1)$ 。于是, 可以通过比值  $\theta$  以  $\zeta=1$  为基准分析周期比对标准化地震输入能量谱的影响。图 3 以延性系数  $\mu=4$  为例, 给出了三类场地下的比值  $\theta$  谱。由图 3 可知: 1) 三类场地在短

周期的能量比值偏差较大; 在硬土地地的长周期阶段(大约在 2.2s~3s),  $\zeta=2.5$  所对应的  $\theta$  值明显增大, 最大值达到 1.1; 而中硬(软)土地地下的  $\zeta=0.4$  和 2.5 也具有相似的特点, 在长周期阶段最大  $\theta$  值达到 1.15。说明在一些情况下周期比对地震输入能量谱值有一定影响。2) 在中长周期阶段软土地地的  $\theta$  值波动幅度相对很小, 一般在 5%以内。3) 在硬土地地和软土地地,  $\zeta>1$  (即  $\zeta=1.5, 2.5$ ) 所对应的  $\theta$  值一般大于  $\zeta<1$  (即  $\zeta=0.4, 0.67$ ) 所对应的  $\theta$  值。中硬(软)土地地不具有此特点。

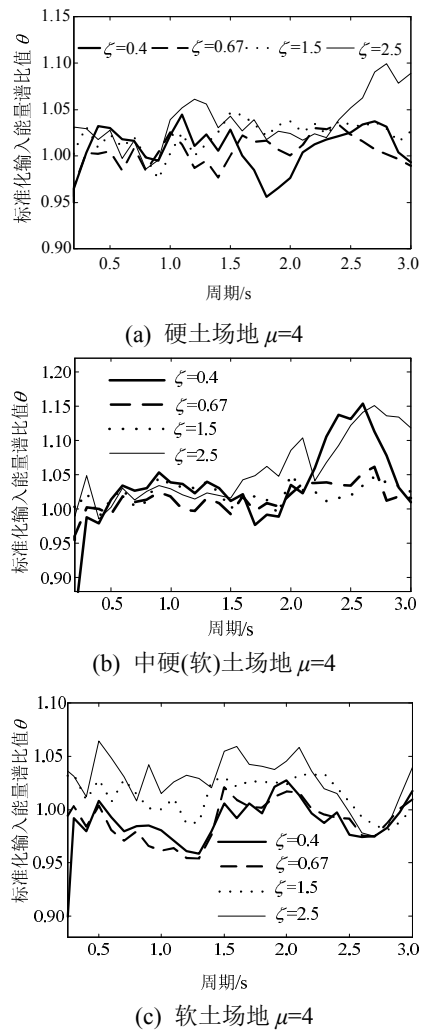


图 3 周期比  $\zeta=0.4, 0.67, 1.5, 2.5$  时与周期比  $\zeta=1$  时的标准化输入能量谱的比值  $\theta$  谱

Fig.3 Comparison of standard input energy spectra between period ratio  $\zeta=0.4, 0.67, 1.5, 2.5$ , respectively, and  $\zeta=1$

### 3 结论

通过实际地震动记录建立统计平均谱, 分析了不同场地类别、延性系数和周期比对双向地震下的标准化地震输入能量谱的影响, 得出以下结论:

(1) 各类场地的标准化输入能量谱均具有各自的谱形特征: 硬土和中硬(软)土地地的谱形包括上升阶段、峰值平台阶段和下降阶段; 硬土地地下, 峰值平台段较短, 且特征周期较小; 中硬(软)土地地下, 峰值平台段较长, 特征周期大于硬土地地; 软土地地在周期 0~3s 内只有上升阶段和峰值平台阶段, 没有下降阶段, 且峰值平台阶段较长。

(2) 在硬土地地和中硬(软)土地地下, 延性系数对谱值影响较明显, 其规律为: 随着延性系数的增加, 标准化地震输入能量谱的谱值逐渐减小; 在软土地地下, 除长周期外, 延性系数对谱值影响很小。

(3) 周期比  $\zeta$  对谱值有一定影响: 三类场地的短周期情况下  $\zeta$  对谱值影响均比较明显; 软土地地的中长周期情况下,  $\zeta$  对谱值影响不大; 硬土地地和中硬(软)土地地, 当两主轴方向周期差距较大时(即  $\zeta$  或  $1/\zeta$  较大), 长周期阶段的谱值受其影响比较明显。

(4) 在某些情况下, 通过单自由度体系建立的地震输入能量谱值高于本文方法建立的地震输入能量谱值。

#### 参考文献:

- [1] 经杰, 叶列平, 钱稼茹. 基于能量概念的剪切型多自由度体系弹塑性地震位移反应分析[J]. 工程力学, 2003, 20(3): 31—37.  
Jing Jie, Ye Lieping, Qian Jiaru. Inelastic seismic response of lumped mass MDOF system based on energy concept [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(3): 31—37. (in Chinese)
- [2] McKevitt W E. Hysteretic energy spectra in seismic design [C]. Proceeding of Seventh World Conference on Earthquake Engineering, Structural Aspects, Istanbul: Turkish National Committee on Earthquake Engineering, 1980: 487—494.
- [3] 公茂盛, 谢礼立, 章文波. 地震动滞回能量谱衰减规律研究[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(2): 8—14.  
Gong Maosheng, Xie Lili, Zhang Wenbo. Study on attenuation of hysteretic energy spectra of strong ground motion [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(2): 8—14. (in Chinese)
- [4] Chou C C, Uang C M. Establishing absorbed energy spectra an attenuation approach [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 2000, 29(10): 1441—1455.
- [5] 胡冗冗, 王亚勇. 基于瞬时输入能量的 SDOF 弹塑性结构最大位移反应分析[J]. 世界地震工程, 2002, 18(4): 155—158.  
Hu Rongrong, Wang Yayong. Maximum seismic displacement of inelastic SDOF structure based on momentary input energy [J]. World Earthquake Engineering, 2002, 18(4): 155—158. (in Chinese)
- [6] 陈述, 刘哲锋. 结构瞬时输入能量反应持时谱的研究[J]. 工程力学, 2011, 28(1): 19—25.  
Chen Kui, Liu Zhefeng. Study on the duration spectra of structural momentary input energy response [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(1): 19—25. (in Chinese)
- [7] Akiyama H. Earthquake resistant limit-state design for buildings [M]. Tokyo: University of Tokyo Press, 1985: 11—32.
- [8] 程光煜, 叶列平. 弹塑性 SDOF 系统的地震输入能量谱[J]. 工程力学, 2008, 25(2): 28—39.  
Cheng Guangyu, Ye Lieping. Earthquake input energy spectrum for inelastic SDOF systems [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(2): 28—39. (in Chinese)
- [9] Benavent C C, Pujades L G, Almansa F L. Design energy input spectra for moderate seismicity regions [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31(5): 1151—1172.
- [10] 周云, 乐登, 邓雪松. 设计用地震动总输入能量谱研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2008, 30(5): 1—7.  
Zhou Yun, Yue Deng, Deng Xuesong. Research on input energy spectra for design of earthquake strong motion [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2008, 30(5): 1—7. (in Chinese)
- [11] 王德才, 叶献国, 常磊. 考虑场地条件与设计地震分组的输入能量谱研究[J]. 地震学报, 2011, 33(1): 91—102.  
Wang Decai, Ye Xianguo, Chang Lei. A study on input energy spectrum in consideration of site effect and design earthquake classification [J]. Acta Seismologica Sinica, 2011, 33(1): 91—102. (in Chinese)
- [12] Fajfar P, Vidic T. Consistent inelastic design spectra: hysteretic and input energy [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1994, 23(5): 523—537.
- [13] 肖明葵, 刘波, 白绍良. 抗震结构总输入能量及其影响因素分析[J]. 重庆建筑大学学报, 1996, 18(2): 20—33.  
Xiao Mingkui, Liu Bo, Bai Shaoliang. Analysis of the total energy and its influencing factors for seismic structures [J]. Journal of Chongqing Jianzh University, 1996, 18(2): 20—33. (in Chinese)
- [14] 何利, 叶献国. 基于复合强度指标的弹塑性输入能量谱研究[J]. 工程力学, 2013, 30(4): 7—14.  
He Li, Ye Xianguo. Research on the elastic-plastic input energy spectra based on compound intensity indicator [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(4): 7—14. (in Chinese)
- [15] 王东升, 李宏男, 王国新. 双向地震动作用弹塑性反应谱研究[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(2): 248—254.  
Wang Dongsheng, Li Hongnan. Research on inelastic response spectra for bi-directional ground motions [J]. Journal of Dalian University of Technology. 2005, 45(2): 248—254. (in Chinese)
- [16] 王丰. 基于性能的结构多维抗震设计方法研究[D]. 大连: 大连理工大学建筑工程学部, 2008.  
Wang Feng. Studies on performance-based seismic design methods of structures subjected to multi-dimensional [D]. Dalian: Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)