

绝对和相对输入能量谱对比及 延性系数的影响研究^{*}

公茂盛¹⁾ 谢礼立^{1, 2)}

1) 中国哈尔滨 150080 中国地震局工程力学研究所

2) 中国哈尔滨 150090 哈尔滨工业大学

摘要 利用 266 条强震记录, 在研究绝对输入能量谱和相对输入能量谱衰减规律的基础上, 对由衰减关系所确立的两种输入能量谱进行对比分析, 讨论了延性系数对这两种输入能量谱的影响. 研究发现, 在弹性情况下, 两种输入能量谱在周期 0.5~1.0 s 范围内相差不大; 在非弹性情况下, 两种输入能量谱在周期 0.5 s 处相差不大. 周期较小时, 绝对输入能量谱要大于相对输入能量谱; 周期较大时, 绝对输入能量谱小于相对输入能量谱. 延性系数对这两种输入能量谱影响均比较大, 对绝对输入能量谱而言, 周期小于 0.3 s 时, 随着延性系数的增大, 能量谱升高; 周期大于 0.3 s 时, 随着延性系数的增大能量谱降低. 不同延性系数的绝对输入能量谱在分界点 0.3 s 左右相等. 相对输入能量谱受延性系数影响与绝对输入能量谱相似, 但分界点在 0.5 s 左右. 与绝对输入能量谱相比, 相对输入能量谱在短周期段受延性系数的影响较大, 特别是当场地较软时更为明显.

关键词 输入能量谱 地震动 衰减规律 延性系数 两步回归法

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

引言

地震动参数衰减规律对于工程场地安全性评价、地震小区划以及重大结构物地震危险性评估有着十分重要的意义. 目前所利用的地震动参数主要为峰值加速度、峰值速度以及弹性反应谱等. 这些参数有一个共同的缺陷就是没有充分考虑地震动的持时对结构破坏的影响, 而地震动的持时是引起结构塑性累积破坏的一个重要因素. 由 Uang 和 Bertero (1990) 提出的能量谱很好地反映了地震动的三要素特性, 特别是地震动的持时对结构非线性反应的影响得到了充分的考虑. 实际上, 结构物在强地面运动作用下是一个连续的能量输入与耗散过程, 因此, 能量才是对结构物进行抗震设计或对结构物进行地震危险性评估的最合理参数. 利用能量这个参数进行工程分析, 要解决的一个首要问题是必需了解结构物在未来地震中遭遇到的地震动能量大小, 即由地震动输入到结构的能量情况. 解决这一问题的的重要途径是研究其衰减规律, 给出地震动能量谱的衰减关系. Chapman (1999) 利用 304 条地震记录, 对弹性情况下的绝对输入能量谱进行研究, 得到了弹性情况下绝对输入能量谱的衰减关系. 而实际震害调查显示, 结构物在强地面运动作用下, 一般会进入非线性工作状态 (王前信, 王孝信, 1979). 因此, 只考虑弹性情况是远远不够的, 必须了解结构

^{*} 黑龙江省自然科学基金(E0221)和科技部社会公益研究专项基金(2001DIB20098)资助.
2004-08-17 收到初稿, 2005-06-07 收到修改稿, 2005-07-16 决定采用.

物在强地面运动作用下进入非弹性状态时的能量输入情况，这也是本文研究的一个出发点。另外，绝对输入能量谱和相对输入能量谱在周期较短或较长时有较大的差别(Uang, Bertero, 1990)，应该考虑这两种输入能量谱衰减规律之间的差别，以便选择合适的能量参数进行工程应用分析。鉴于此，本文利用 266 条强震记录，对弹性和非弹性情况下的绝对和相对输入能量谱衰减规律进行了研究。本文主要对由衰减规律所确立的两种输入能量谱进行了对比分析，并重点讨论了非弹性情况下的两种输入能量谱的差别以及延性系数对这两种输入能量谱的影响。

1 绝对和相对输入能量谱

对于基底受水平地震动作用的单自由度阻尼体系，其运动方程为

$$m\ddot{u}_t + c\dot{u} + f_s = 0 \tag{1}$$

式中， f_s 为恢复力； $u_t = u + u_g$ 为质点绝对位移， u 为质点相对基底的反应位移， u_g 为地面位移。将 $u_t = u + u_g$ 代入式(1)，则

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s = -m\ddot{u}_g \tag{2}$$

即：地面运动作用下体系反应可用具有固定基底，且受等效水平侧力 $-m\ddot{u}_g$ 作用的等效体系来代替。这两种体系在具有相同的相对位移意义上来说是等效的，但在利用式(1)和式(2)建立能量方程时，可分别得出绝对输入能量和相对输入能量两种不同形式的能量反应的定义(Uang, Bertero, 1990)。其表达式如下：

绝对输入能量
$$E_a = \int m\ddot{u}_t du_g \tag{3}$$

相对输入能量
$$E_r = - \int m\ddot{u}_g du \tag{4}$$

式(3)中绝对输入能量的物理意义很明确。 $m\ddot{u}_t$ 代表施加在结构上的惯性力，这个力等于恢复力与阻尼力之和，即相当于体系的基底剪力。 E_a 代表整个基底剪力在基底位移 u_g 上所做的功。式(4)中相对输入能量物理意义则代表作用在体系质点上的等效水平侧力 $-m\ddot{u}_g$ 在体系对地面相对位移 u 上所做的功。

为了消除结构质量的影响以及分析上的方便，采用单位质量能量反应的等效速度形式

$$V_{E_a} = \sqrt{\frac{2E_a}{m}} \tag{5}$$

$$V_{E_r} = \sqrt{\frac{2E_r}{m}} \tag{6}$$

这样，对于不同周期的单自由度体系，通过求解体系的反应便可以计算绝对和相对输入能量谱。在计算体系的反应过程中，本文采用的恢复力模型为理想弹塑性性模型。其计算方法为 Newmark- β 法，采用等延性形式的能量

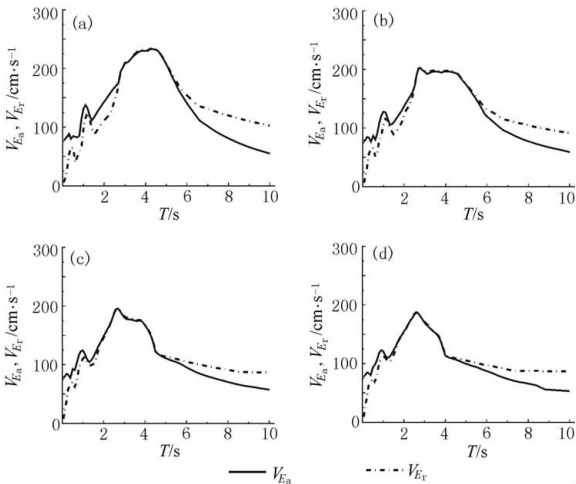


图 1 单条强震记录所计算的绝对和相对输入能量谱对比($\dot{u}_{g, \max} = 77.65 \text{ cm/s}$)
(a) $\mu=1$; (b) $\mu=2$; (c) $\mu=4$; (d) $\mu=6$

谱. 这两种输入能量谱在中等周期阶段是相等的, 当周期较小或较大时, 有较大的差别. 理论分析可知, 当周期 $T \rightarrow 0$ 时, $V_{E_g} \rightarrow \dot{u}_{g, \max}$, $V_{E_r} \rightarrow 0$; 当周期 $T \rightarrow \infty$ 时, $V_{E_g} \rightarrow 0$, $V_{E_r} \rightarrow \dot{u}_{g, \max}$. 图 1 为由 1979 年 10 月 15 日 Imperial Valley 地震中, El Centro 台阵 4 号测点一条地震记录的 230 度水平分量所计算的不同延性系数下的两种输入能量谱对比, 可以更清晰地看出这种差别.

2 强震记录数据

本文从美国西部 California 州 15 次比较大的地震中选取了 266 条强震记录(公茂盛, 2002), 并将记录按照地表以下 30 m 内土层的平均剪切波速 V_s 进行场地分类(Chou, Uang, 2000a, b), 见表 1. 各个场地上记录的震级-距离分布情况见图 2. 由于硬基岩和基岩这两类场地记录较少, 本文合为一类场地(A+B)类考虑. 另外, 本文所使用的每一条记录都包含两个水平分量和一个竖向分量, 在分析过程中所采用的是由两个水平分量所计算能量谱的几何平均值.

表 1 场地分类

NEHERP 分类	场地描述	剪切波速 $V_s/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	本文分类
A	硬基岩	$V_s > 1500$	A+B
B	基岩	$1500 \geq V_s > 760$	A+B
C	非常密实土和软基岩	$760 \geq V_s > 360$	C
D	坚硬土	$360 \geq V_s \geq 180$	D
E	软土	$V_s < 180$	
F	特殊土(液化、湿陷性土等)	$V_s < 180$	

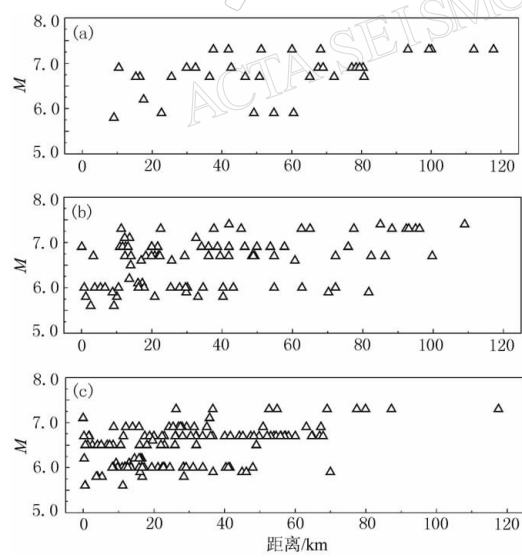


图 2 震级-距离分布图

(a) A+B 类场地记录(35 条); (b) C 类场地记录
(94 条); (c) D 类场地记录(137 条)

震级是衡量一次地震中震源释放能量大小的物理量, 研究地震动参数衰减规律时, 往往将其看作震源参数. 震级有很多种定义, 有地方震级、面波震级、体波震级、持续时间震级和矩震级等. 这几种震级除了矩震级外, 都有一个共同的特点, 就是大到一定程度会饱和(胡聿贤, 1988). 因此, 在研究地震动参数衰减规律时, 特别是在近场地, 宜取矩震级. 本文所取的震级参数为矩震级.

传播介质对地震动衰减的影响主要有 3 个方面——几何扩散、阻尼吸收和非弹性衰减(Campbell, 1985). 研究地震动参数衰减规律时, 往往将这 3 个因素归结为震源到台站或场地距离的大小. 震源到台站或场地的距离定义有很多种, 如震中距、震源距和断层距等等. 对浅源地震来说,

当距离参数远大于几倍震源体尺寸时, 这几个距离参数差别则不大; 但当距离较小时, 即

在近场区,不同的距离参数差别较大.目前大多数研究者在对地震动参数进行衰减规律分析时,倾向于使用断层距.本文也是如此,在分析过程中采用的距离参数为断层距.

3 衰减模型

选择合理的地震动参数衰减模型,是研究地震动参数衰减规律中一项十分重要的工作,所选取的模型不仅要有一定的物理意义,还应保证回归所得结果有较小的误差.本文在分析几种模型后,采用了 Boore 等(1993)在研究反应谱衰减规律时所使用的衰减模型,即

$$\lg Y_i = a + b(M_i - 6) + c(M_i - 6)^2 + d \lg(D_i^2 + h^2)^{1/2} + eG_{ci} + fG_{di} + \epsilon_{ri} + \epsilon_{di} \quad (7)$$

式中, Y_i 为针对某一固定周期待回归的能量谱数值,本文取第 i 条记录两个水平分量所计算能量等效速度的几何平均值; M_i 为第 i 条地震记录对应的矩震级; D_i 为取得第 i 条记录的断层距; G_{ci} 和 G_{di} 是为考虑场地影响而引入的已知参数,若第 i 条地震记录的场地条件为 C 类,则 $G_{ci} = 1$; 若为其它类别场地,则 $G_{ci} = 0$. 若第 i 条记录的场地条件为 D 类,则 $G_{di} = 1$; 若为其它类别场地,则 $G_{di} = 0$. 这样,对于已知每一个周期的一组能量谱数值,未知参数 a, b, c, d, e, f, h 和随机误差 ϵ_r 与 ϵ_e 的方差 $\sigma_{\lg Y}^2$ 就可以由两步回归法分析得出.

在确定衰减模型中的未知系数时,最常用方法是 Joyner 和 Boore(1981, 1993, 1994)提出的两步回归法.之所以提出这种方法,是因为所取得的强震记录的震级和距离具有一定的相关性.其具体表现就是强震记录的震级和距离参数在分布上有这样一种倾向:震级大、距离远和震级小、距离近的记录偏多,而震级大、距离近或震级小、距离远的记录偏少(图 2).若将模型中的未知系数一次解出,则这种相关性往往给回归结果带来一定的不合理性.而两步回归法通过引入虚拟变量把震级和距离解耦,将震级和距离对应的未知系数分别来求解,避免了震级距离相关性给回归结果带来的不良影响.本文在求解衰减模型中的未知系数时,采用的是两步回归法,回归所得到的系数及标准差见附表 1 和附表 2(本文只给出了 μ 为 1 和 4 时的回归系数,为了使用及理解上的方便,给出的是标准差).

4 结果分析

本文共计算了 3 类场地条件(A+B, C, D)、4 种延性系数($\mu=1, 2, 4, 6$)、阻尼比为 0.05($\xi=5\%$)的绝对和相对输入能量谱;利用两步回归法作了衰减规律回归分析,得出了地震动绝对和相对输入能量谱的衰减规律.由于笔者曾经讨论过这两种输入能量谱的衰减规律(公茂盛等, 2003),这里主要对由衰减关系所建立的两种输入能量谱进行分析对比,并重点讨论延性系数对这两种输入能量谱的影响.在进行分析时,主要以震级为 7.0、距离为 10 km 处的结果为例,并简单给出了距离为 40 km 处的对比结果.其它震级、距离条件下的对比情况与此类似.

4.1 绝对和相对输入能量谱对比

1) 弹性情况.图 3 给出的是延性系数为 1、震级取 7.0、距离分别为 10 km 和 40 km 处的结果,其中图 3c 为 10 km 处的绝对输入能量谱和相对输入能量谱的比值.可以看出,这两种能量谱在周期 0.5~1.0 s 范围内相差不大;当周期小于 0.5 s 时,绝对输入能量大于相对输入能量;当周期大于 1.0 s 时,绝对输入能量小于相对输入能量.由图 3c 可以更清晰地看出这种差别,特别是在周期较小时,对应于 A+B, C 以及 D 三类场地而言,其绝

对和相对输入能量谱最大比值分别为 1.88, 2.39 和 2.75.

2) 非弹性情况. 非弹性情况下的两种输入能量谱对比结果如图 4 所示, 本文以延性系数 4 时为例. 可以看出, 两种输入能量谱在周期 0.5 s 处相差不大; 当周期小于 0.5 s 时, 绝对输入能量大于相对输入能量; 当周期大于 0.5 s 时, 绝对输入能量小于相对输入能量. 但在短周期段, 绝对输入能量谱与相对输入能量谱的比值要比弹性情况下小. 对应于 A+B, C 以及 D 三类场地而言, 其最大比值分别为 1.60, 1.82 和 1.99. 可见, 非弹性情况下在较短周期处两种输入能量谱的差别比弹性情况下要小, 而在较长周期段的结果与弹性情况相似.

另外, 无论是弹性还是非弹性情况, 在较短周期段, D 类场地上两种输入能量谱差别最大; 在较长周期段, D 类场地上两种输入能量差别最小. 在短周期段两种输入能量谱差别之所以如此大, 本文分析是因为当周期趋向于 0 时, 绝对输入能量趋向于定值, 而相对输入能量趋向于 0 所致. 另外, 由图 3a, b 以及图 4a, b 可以得出, 场地条件对两种输入能量谱的影响非常大, 场地越软, 输入能量谱越大.

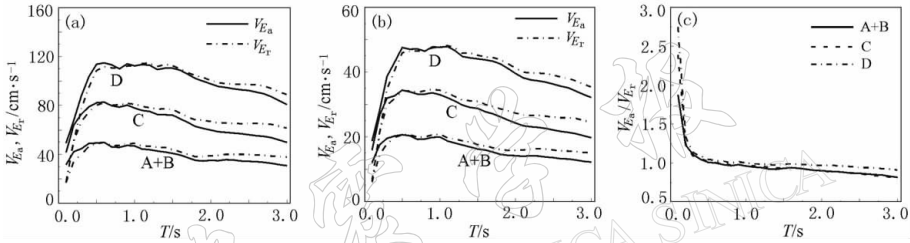


图 3 弹性情况绝对和相对输入能量谱对比 ($M=7.0, \mu=1$)
(a) $D=10\text{ km}$; (b) $D=40\text{ km}$; (c) $D=10\text{ km}$

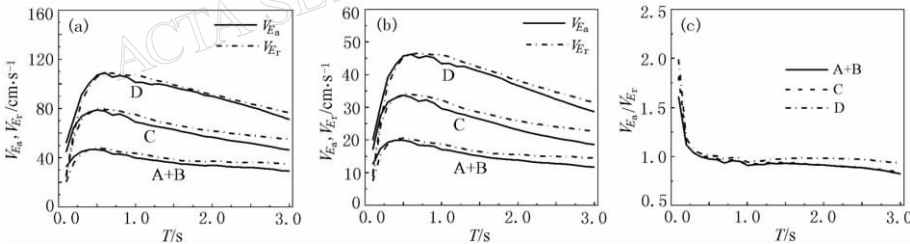


图 4 非弹性情况绝对和相对输入能量谱对比 ($M=7.0, \mu=4$)
(a) $D=10\text{ km}$; (b) $D=40\text{ km}$; (c) $D=10\text{ km}$

4.2 延性系数影响分析

本文分析得出, 延性系数对这两种输入能量谱影响较大, 无论利用哪一种输入能量谱进行工程分析, 结构物延性必须给予充分的考虑, 仅仅考虑弹性情况是远远不够的. 图 5 与图 6 分别给出了震级取 7.0、距离为 10 km 处的绝对输入能量谱和相对输入能量谱对延性系数归一化结果, 即震级为 7.0、距离为 10 km 处的不同延性系数下的能量谱与图 3a 中的弹性情况下的能量谱比值结果, 其它距离、震级条件结果与此相似. 可以得出:

1) 对绝对输入能量谱而言, 3 类场地上不同延性系数的能量谱在周期 0.3 s 处相等; 当周期小于 0.3 s 时, 随着延性系数的增大, 绝对输入能量谱增大; 当周期大于 0.3 s 时,

随着延性系数的增大, 绝对输入能量谱降低(图 5). 而 3 类场地上不同延性系数的相对输入能量谱则在周期 0.5 s 处相等(图 6).

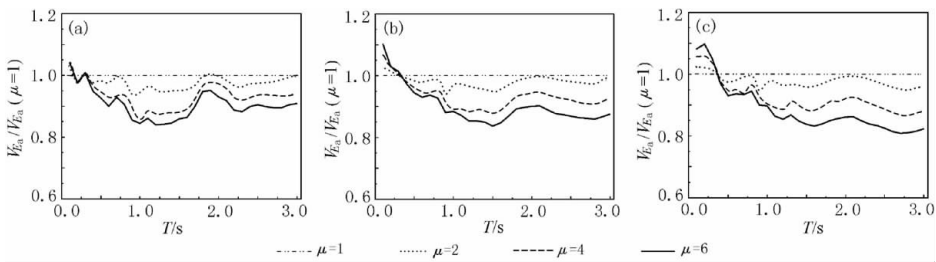


图 5 延性系数对绝对输入能量谱影响($M=7.0$, $D=10.0$ km)
(a) 场地 A+B; (b) 场地 C; (c) 场地 D

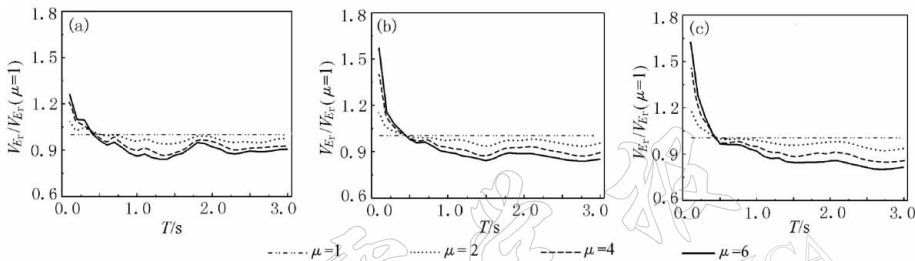


图 6 延性系数对相对输入能量谱影响($M=7.0$, $D=10.0$ km)
(a) 场地 A+B; (b) 场地 C; (c) 场地 D

2) 周期较小时, 两种输入能量谱都随着延性系数的增大而增大. 与 $\mu=1$ 时相比, 3 类场地上 $\mu=6$ 时绝对输入能量谱的放大倍数分别为 1.04, 1.1 和 1.1, 而相对输入能量谱对应的放大倍数依次为 1.27, 1.57 和 1.63. 可见, 在较小周期段, 延性系数对相对输入能量的影响要大于对绝对输入能量的影响.

3) 较长周期段(绝对输入能量谱为大于 0.3 s, 相对输入能量谱为大于 0.5 s), 两种输入能量随着延性系数的增大而降低. 与弹性情况相比, 延性系数为 6 时降低最多. 不同延性系数下的能量谱最大降低幅度见表 2. 由表 2 可知, 对同一类场地而言, 不同延性系数下的绝对和相对输入能量谱最大降低幅度相差不大, 并且随着场地的变软, 最大降低幅度出现的周期有增大的趋势.

表 2 随延性系数增加两种输入能量谱最大降低幅度及对应周期

场地条件	延性系数	最大降低幅度		对应周期/s	
		V_{E_a}	V_{E_r}	V_{E_a}	V_{E_r}
A+B	2	7.2%	6.0%	0.9	1.4
	4	15.2%	13.6%	1.0	1.4
	6	16.1%	16.0%	1.2	1.4
C	2	6.3%	6.6%	0.9	2.8
	4	12.7%	12.7%	1.5	2.8
	6	16.3%	16.2%	1.5	2.8
D	2	5.7%	7.7%	0.9	2.8
	4	13.6%	16.5%	2.8	2.7
	6	19.2%	20.0%	2.7	2.7

5 讨论和结论

能量谱很好地反映了地震动的三要素特性, 特别是持时对结构非弹性反应的影响得到

了充分的考虑. 但如何利用能量谱进行工程分析, 一直是地震工程中研究的一个热点和难点问题. 本文在对地震动绝对和相对输入能量谱衰减规律进行研究的基础上, 对由衰减关系所建立的绝对和相对输入能量谱进行了对比分析, 并重点讨论了延性系数对这两种输入能量谱的影响, 结果可供参考:

1) 两种输入能量谱在中等周期范围内(0.5 s 左右)相差不大; 当周期较小时, 绝对输入能量谱大于相对输入能量谱; 当周期较大时, 绝对输入能量谱小于相对输入能量谱, 其周期的分界点在 0.5 s 左右.

2) 延性系数对两种输入能量谱影响较大. 周期较小时, 随着延性系数的增大, 两种输入能量谱增大; 周期较大时, 随着延性系数的增大, 两种输入能量谱降低. 但在周期较小时, 延性系数对相对输入能量谱的影响要大于对绝对输入能量谱的影响; 周期较大时, 延性系数对两种输入能量谱的影响相似.

3) 两种输入能量谱对延性系数的变化比较敏感, 不同周期处受延性系数影响不同, 并且与弹性情况相差较大. 无论理论研究还是工程应用, 仅考虑弹性情况是远远不够的. 相对输入能量谱在短周期段对延性系数的变化更为敏感.

另外, 至于如何利用输入能量谱及其衰减规律进行工程场地安全性评价、地震小区划以及重大结构物地震危险性评估等工作, 都在本文的进一步研究当中.

感谢 Chia-Ming Uang 教授(University of California, San Diego)为本文提供强震记录及提出宝贵建议.

参 考 文 献

- 公茂盛. 2002. 地震动能量衰减规律的研究[D]: [学位论文]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 23~24
- 公茂盛, 谢礼立, 章文波. 2003. 地震动输入能量衰减规律研究[J]. 地震工程与工程振动, **23**(3): 15~24
- 胡聿贤. 1988. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 177~178
- 王前信, 王孝信. 1979. 工程结构地震力理论[M]. 北京: 地震出版社, 118
- Boore D M, Joyner W B, Fumal T E. 1993. *Estimation of Response Spectra and Peak Acceleration From Western North American Earthquakes: An Interim Report*[R]. US Geo. Survey Open File Report, 93~509
- Campbell K W. 1985. Strong motion attenuation relations: A ten-year perspective[J]. *Earthquake Spectra*, **1**(4): 759~803
- Chapman M C. 1999. On the use of elastic input energy for seismic hazard analysis[J]. *Earthquake Spectra*, **15**(4): 607~634
- Chou C C, Uang C M. 2000a. *An Evaluation of Seismic Energy Demand: An Attenuation Approach*[R]. PEER Report, 2000/4, 3~5
- Chou C C, Uang C M. 2000b. Establishing absorbed energy spectral-an attenuation approach[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **29**: 1 441~1 455
- Joyner W B, Boore D M. 1981. Peak horizontal acceleration and velocity from strong-motion records including records from 1979 Imperial Valley, California earthquake[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **71**(6): 2 011~2 038
- Joyner W B, Boore D M. 1993. Method for regression of strong-motion data[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **83**(2): 469~487
- Joyner W B, Boore D M. 1994. Errata[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **84**(3): 955~956
- Uang C M, Bertero V V. 1990. Evaluation of seismic energy in structures[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **19**: 77~90

附表 1 绝对输入能量谱回归系数及标准差

μ	T/s	a	b	c	d	e	f	h/km	σ_{lgY}
1	0.1	1.889	0.4323	-0.0412	-0.7477	0.1204	0.1915	4.7102	0.1884
	0.2	2.0082	0.4785	-0.1359	-0.6890	0.1818	0.2065	5.3232	0.1836
	0.3	1.9459	0.5232	-0.1746	-0.6259	0.2141	0.2960	3.9860	0.1858
	0.4	1.9780	0.5099	-0.1112	-0.6668	0.2077	0.3267	3.9418	0.1985
	0.5	1.9556	0.5051	-0.0898	-0.6586	0.2217	0.3630	3.8311	0.2057
	0.6	1.9571	0.5112	-0.0961	-0.6628	0.2208	0.3636	3.1048	0.2117
	0.7	1.8707	0.3857	0.0607	-0.6453	0.2387	0.3908	2.4755	0.2207
	0.8	1.8604	0.3920	0.0485	-0.6331	0.2347	0.3808	2.3248	0.2218
	0.9	1.8819	0.3475	0.1038	-0.6459	0.2287	0.3810	2.8790	0.2269
	1.0	1.8822	0.3566	0.0905	-0.6426	0.2199	0.3791	3.3940	0.2267
	1.1	1.8612	0.3598	0.0917	-0.6493	0.2349	0.4088	3.6552	0.2307
	1.2	1.8450	0.3876	0.0883	-0.6626	0.2334	0.4107	3.4391	0.2358
	1.3	1.8165	0.3839	0.1154	-0.6701	0.2324	0.4096	3.4173	0.2392
	1.4	1.8033	0.3891	0.1368	-0.6870	0.2366	0.4203	3.7269	0.2419
	1.5	1.7895	0.4062	0.1393	-0.7004	0.2470	0.4328	4.1294	0.2445
	1.6	1.7748	0.3869	0.1666	-0.7021	0.2416	0.4391	4.5471	0.2550
	1.7	1.7229	0.3905	0.1721	-0.6854	0.2473	0.4519	4.5373	0.2631
	1.8	1.6585	0.4056	0.1701	-0.6673	0.2544	0.4656	4.1651	0.2689
	1.9	1.6382	0.4069	0.1846	-0.6711	0.2479	0.4607	3.8179	0.2731
	2.0	1.6363	0.4266	0.1800	-0.6809	0.2335	0.4458	3.6147	0.2762
	2.1	1.6248	0.4654	0.1581	-0.6874	0.2234	0.4362	3.5273	0.2771
	2.2	1.6246	0.4973	0.1411	-0.6938	0.2128	0.4254	3.5848	0.2832
	2.3	1.6117	0.5163	0.1301	-0.6928	0.2121	0.4242	3.5638	0.2912
	2.4	1.5944	0.5318	0.1227	-0.6924	0.2151	0.4289	3.5211	0.2975
	2.5	1.5894	0.5426	0.1226	-0.7005	0.2140	0.4289	3.6176	0.3017
	2.6	1.5792	0.5499	0.1265	-0.7058	0.2125	0.4288	3.6843	0.3040
	2.7	1.5649	0.5622	0.1246	-0.7069	0.2125	0.4273	3.7158	0.3045
	2.8	1.5521	0.5747	0.1158	-0.7078	0.2144	0.4255	3.7724	0.3064
	2.9	1.5343	0.5914	0.0981	-0.7034	0.2128	0.4239	0.7696	0.3081
	3.0	1.5169	0.6017	0.0880	-0.6978	0.2089	0.4199	3.8063	0.3085
4	0.1	1.9152	0.4462	-0.0647	-0.7465	0.1342	0.2008	4.9279	0.1841
	0.2	1.9422	0.4835	-0.1278	-0.6599	0.2017	0.2448	4.6164	0.1766
	0.3	1.9343	0.5110	-0.1355	-0.6379	0.2140	0.3077	3.8836	0.1761
	0.4	1.9191	0.4955	-0.0881	-0.6401	0.2174	0.3338	3.6221	0.1873
	0.5	1.8952	0.4728	-0.0473	-0.6365	0.2271	0.3602	3.3301	0.1944
	0.6	1.8681	0.4449	-0.0013	-0.6381	0.2317	0.3764	3.1199	0.2010
	0.7	1.8198	0.3943	0.0615	-0.6304	0.2385	0.3888	2.8669	0.2063
	0.8	1.8199	0.3953	0.0607	-0.6317	0.2451	0.3969	3.0044	0.2088
	0.9	1.7922	0.3929	0.0799	-0.6290	0.2394	0.3989	3.1320	0.2098
	1.0	1.7672	0.3858	0.0942	-0.6331	0.2389	0.4050	3.3158	0.2121
	1.1	1.7442	0.3895	0.1047	-0.6311	0.2377	0.4114	3.2889	0.2156
	1.2	1.7201	0.3893	0.1216	-0.6354	0.2395	0.4166	3.3808	0.2207
	1.3	1.7200	0.3909	0.1203	-0.6409	0.2395	0.4256	3.5066	0.2241
	1.4	1.7037	0.3990	0.1285	-0.6496	0.2421	0.4314	3.6572	0.2278
	1.5	1.6896	0.4011	0.1390	-0.6543	0.2422	0.4320	3.8021	0.2315
	1.6	1.6670	0.4067	0.1450	-0.6551	0.2440	0.4368	3.8440	0.2369
	1.7	1.6474	0.4244	0.1428	-0.6579	0.2412	0.4374	3.7581	0.2408
	1.8	1.6297	0.4437	0.1403	-0.6622	0.2368	0.4368	3.7352	0.2427

续附表 1

μ	T/s	a	b	c	d	e	f	h/km	σ_{lgY}
4	1.9	1.6235	0.4526	0.1380	-0.6673	0.2308	0.4308	3.8093	0.2470
	2.0	1.6232	0.4655	0.1397	-0.6780	0.2231	0.4236	3.8852	0.2516
	2.1	1.6121	0.4838	0.1332	-0.6828	0.2192	0.4210	3.8946	0.2573
	2.2	1.5979	0.5011	0.1225	-0.6842	0.2190	0.4205	3.9179	0.2629
	2.3	1.5898	0.5129	0.1176	-0.6883	0.2167	0.4176	3.9338	0.2674
	2.4	1.5835	0.5253	0.1143	-0.6935	0.2136	0.4125	3.9931	0.2707
	2.5	1.5797	0.5371	0.1100	-0.6984	0.2075	0.4045	4.0196	0.2742
	2.6	1.5662	0.5448	0.1100	-0.6978	0.2035	0.3997	4.0150	0.2771
	2.7	1.5529	0.5548	0.1061	-0.6972	0.2011	0.3951	4.0186	0.2796
	2.8	1.5395	0.5627	0.1023	-0.6979	0.2025	0.3932	4.0644	0.2805
	2.9	1.5210	0.5724	0.0957	-0.6954	0.2039	0.3942	4.0685	0.2814
	3.0	1.5066	0.5829	0.0888	-0.6917	0.2014	0.3892	4.0779	0.2818

附表 2 相对输入能量谱回归系数及标准差

μ	T/s	a	b	c	d	e	f	h/km	σ_{lgY}
1	0.1	1.9622	0.5165	-0.2255	-0.9111	0.0163	0.0260	8.9075	0.3063
	0.2	2.0804	0.4575	-0.1693	-0.7504	0.1769	0.1709	8.2458	0.2135
	0.3	1.9371	0.4823	-0.1591	-0.6274	0.2215	0.2871	4.9365	0.1921
	0.4	1.9705	0.4868	-0.1121	-0.6524	0.2050	0.3102	4.3421	0.1952
	0.5	1.9725	0.4863	-0.0894	-0.6571	0.2166	0.3480	4.2501	0.2010
	0.6	1.9556	0.4461	-0.0331	-0.6564	0.2177	0.3510	3.3863	0.2071
	0.7	1.8916	0.3679	0.0615	-0.6391	0.2313	0.3718	2.6105	0.2112
	0.8	1.8909	0.3849	0.0422	-0.6333	0.2308	0.3649	2.5099	0.2093
	0.9	1.9024	0.3291	0.1037	-0.6381	0.2266	0.3640	2.9337	0.2152
	1.0	1.9158	0.3499	0.0832	-0.6430	0.2190	0.3613	3.5579	0.2126
	1.1	1.9093	0.3494	0.0844	-0.6536	0.2289	0.3883	3.8871	0.2152
	1.2	1.9003	0.3678	0.0862	-0.6665	0.2261	0.3907	3.7706	0.2170
	1.3	1.8806	0.3757	0.0986	-0.6738	0.2223	0.3856	3.5783	0.2175
	1.4	1.8631	0.3933	0.1067	-0.6844	0.2283	0.3953	3.6971	0.2191
	1.5	1.8437	0.3983	0.1120	-0.6913	0.2451	0.4106	3.9762	0.2193
	1.6	1.8299	0.3693	0.1391	-0.6879	0.2426	0.4158	4.3145	0.2252
	1.7	1.7901	0.3685	0.1431	-0.6730	0.2458	0.4262	4.3774	0.2298
	1.8	1.7428	0.3748	0.1453	-0.6603	0.2534	0.4385	4.0316	0.2326
	1.9	1.7369	0.3718	0.1575	-0.6652	0.2480	0.4303	3.7104	0.2322
	2.0	1.7435	0.3780	0.1568	-0.6721	0.2363	0.4131	3.5278	0.2330
	2.1	1.7400	0.4028	0.1411	-0.6747	0.2244	0.4000	3.3744	0.2315
	2.2	1.7374	0.4316	0.1220	-0.6742	0.2143	0.3890	3.3210	0.2330
	2.3	1.7307	0.4509	0.1078	-0.6710	0.2109	0.3848	3.2778	0.2373
	2.4	1.7266	0.4665	0.0965	-0.6738	0.2123	0.3879	3.2433	0.2412
	2.5	1.7271	0.4760	0.0934	-0.6832	0.2162	0.3909	3.2833	0.2439
	2.6	1.7260	0.4846	0.0919	-0.6894	0.2169	0.3893	3.3370	0.2445
	2.7	1.7208	0.4969	0.0849	-0.6915	0.2192	0.3868	3.4137	0.2449
	2.8	1.7142	0.5094	0.0720	-0.6912	0.2218	0.3846	3.4392	0.2458
	2.9	1.7114	0.5182	0.0576	-0.6898	0.2182	0.3791	3.4515	0.2462
	3.0	1.7120	0.5227	0.0510	-0.6909	0.2125	0.3719	3.5244	0.2464

续表 2

μ	T/s	a	b	c	d	e	f	h/km	σ_{lgV}
4	0.1	1.9858	0.5064	-0.2153	-0.8716	0.0807	0.1079	8.1373	0.2672
	0.2	1.9800	0.4703	-0.1549	-0.6879	0.1951	0.2209	6.0491	0.1913
	0.3	1.9502	0.4816	-0.1271	-0.6436	0.2134	0.2973	4.3676	0.1778
	0.4	1.9399	0.4805	-0.0897	-0.6394	0.2115	0.3186	3.8905	0.1830
	0.5	1.9234	0.4603	-0.0490	-0.6377	0.2203	0.3442	3.5735	0.1884
	0.6	1.8955	0.4354	-0.0055	-0.6364	0.2248	0.3596	3.2669	0.1934
	0.7	1.8623	0.4169	0.0246	-0.6284	0.2325	0.3725	3.0005	0.1967
	0.8	1.8517	0.3880	0.0553	-0.6306	0.2399	0.3811	3.1474	0.1980
	0.9	1.8349	0.3812	0.0704	-0.6280	0.2367	0.3846	3.2860	0.1997
	1.0	1.8314	0.3901	0.0702	-0.6349	0.2358	0.3901	3.5127	0.1990
	1.1	1.8134	0.3855	0.0816	-0.6344	0.2335	0.3950	3.5006	0.2005
	1.2	1.7967	0.3851	0.0922	-0.6386	0.2345	0.3982	3.5662	0.2035
	1.3	1.7738	0.3849	0.1044	-0.6404	0.2346	0.4054	3.6187	0.2049
	1.4	1.7586	0.3911	0.1096	-0.6452	0.2375	0.4096	3.7080	0.2074
	1.5	1.7460	0.3874	0.1197	-0.6465	0.2383	0.4092	3.7950	0.2090
	1.6	1.7279	0.3886	0.1235	-0.6445	0.2402	0.4115	3.7782	0.2121
	1.7	1.7148	0.3990	0.1213	-0.6453	0.2377	0.4099	3.6419	0.2140
	1.8	1.7028	0.4135	0.1171	-0.6473	0.2339	0.4077	3.5831	0.2138
	1.9	1.7019	0.4188	0.1134	-0.6508	0.2295	0.4006	3.6286	0.2149
	2.0	1.7053	0.4246	0.1143	-0.6573	0.2229	0.3921	3.6561	0.2163
	2.1	1.7017	0.4356	0.1085	-0.6597	0.2180	0.3867	3.6331	0.2184
	2.2	1.6916	0.4450	0.0999	-0.6577	0.2179	0.3844	3.6026	0.2205
	2.3	1.6866	0.4520	0.0940	-0.6576	0.2153	0.3797	3.5683	0.2216
	2.4	1.6853	0.4611	0.0886	-0.6600	0.2115	0.3730	3.5871	0.2223
	2.5	1.6885	0.4697	0.0826	-0.6643	0.2060	0.3634	3.6202	0.2229
	2.6	1.6850	0.4760	0.0794	-0.6647	0.2019	0.3585	3.6305	0.2232
	2.7	1.6825	0.4822	0.0747	-0.6653	0.1988	0.3524	3.6485	0.2232
	2.8	1.6804	0.4863	0.0703	-0.6671	0.1987	0.3478	3.6767	0.2218
	2.9	1.6786	0.4910	0.0647	-0.6694	0.1985	0.3457	3.7034	0.2209
	3.0	1.6810	0.4955	0.0598	-0.6709	0.1939	0.3370	3.7318	0.2198

STUDY ON COMPARISON BETWEEN ABSOLUTE AND RELATIVE INPUT ENERGY SPECTRA AND EFFECTS OF DUCTILITY FACTOR

Gong Maosheng¹⁾ Xie Lili^{1, 2)}

1) *Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China*

2) *Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China*

Abstract: Based on 266 strong ground motion records, an attenuation relationship was developed for both absolute and relative input energy spectra. The comparison of the two kinds of input energy spectra constructed from the attenuation relationship was made in this paper. The results show that there is little difference between the absolute input energy spectra and relative ones at the periods of 0.5~1.0 s for elastic systems and at the period of 0.5 s for inelastic systems. The absolute input energy spectra are much larger than relative ones in very short period range but some less than relative ones in long period range. It is also found that the ductility factor has a significant effect on both absolute and relative input energy spectra. The absolute input energy spectra increase with the increasing of ductility factor for the periods less than 0.3 s but decrease for the periods larger than 0.3 s. The absolute input energy spectra for different ductility factor are almost equivalent at the period about 0.3 s, but for relative input energy spectra, the period is about 0.5 s. The effect of ductility on the relative input energy spectra in the short period range is much larger than that on the absolute input energy spectra, especially on the softer site class.

Key words: input energy spectra; ground motion; attenuation relationship; ductility factor; two-stage regressive method