

文章编号: 1000-4750(2011)01-0019-07

结构瞬时输入能量反应持时谱的研究

*陈 逵¹, 刘哲锋², 沈蒲生¹

(1. 湖南大学土木工程学院, 湖南, 长沙 410082; 2. 长沙理工大学土木与建筑学院, 湖南, 长沙 410076)

摘 要: 现有抗震设计理论大多是基于承载力或强度的设计方法, 与其相应的反应谱理论的最大缺陷是无法反映地震持时的影响, 以地震能量作为设计参数的抗震设计理论则有望弥补这一不足。该文在地震瞬时输入能量概念的基础上, 利用统计学原理对结构的反应持时提出一种新的定义, 用以描述地震波对结构的持时效应, 并通过建立相应的持时谱来研究结构动力参数以及地震波特征参数的变化对该持时效应的影响。研究表明: 结构阻尼比的增大将使瞬时输入能持时谱的曲线更加平滑, 地震波加速度幅值的变化对谱值没有影响, 而随着地震波峰值速度与峰值加速度比值的增加, 谱值趋于增加。通过总结 100 条地震波瞬时输入能持时谱曲线的变化规律, 提出了阻尼比为 5% 时的线性单自由度体系瞬时输入能持时谱的简化计算模型, 该模型的获得将为结构能量输入历程的预估以及以其为基础的结构损伤历程研究提供必要的基础。

关键词: 总输入能; 瞬时输入能; 地震持时; 线性单自由度体系; 反应谱

中图分类号: TU311; TU311.3 **文献标识码:** A

STUDY ON THE DURATION SPECTRA OF STRUCTURAL MOMENTARY INPUT ENERGY RESPONSE

*CHEN Kui¹, LIU Zhe-feng², SHEN Pu-sheng¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China;

2. College of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410076, China)

Abstract: Most of current methods in the aseismic design of structures require the provision of sufficient strength against anticipated seismic effects. The corresponding design response spectra can not reflect the effect of the time duration of an earthquake. The energy based aseismic design is known as an alternative design methodology. A parameter study is carried out on input the duration of the structural energy response based on the momentary input energy and statistical theory, which can reflect the effects of the duration on structures. By establishing the duration of momentary input energy spectra of a linear single degree of freedom (SDOF) system, the effects of the structural dynamic parameters and the characteristics of seismic on the duration were observed. It is found that peak value of the duration of momentary input energy spectrum decreases obviously with damping ratio increase and the changing of peak ground acceleration do not have effects on the duration of momentary input energy spectrum. Based on a total of 100 ground motion records from many significant earthquakes with different peak ground velocities to acceleration (V/A), two parts simple function is suggested according to the shapes of spectra. A simplified model is developed for calculating the duration of momentary input energy spectra to the linear SDOF system with 5% damping. This research conclusion provided a theoretical foundation for more research of the quantization to the cumulative damage in time process based on input energy time histories.

Key words: input energy; momentary input energy; ground motion duration; linear SDOF system; response spectra

收稿日期: 2009-07-08; 修改日期: 2009-09-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(50908022)

作者简介: *陈 逵(1979—), 男, 湖南长沙人, 博士生, 主要从事高层建筑抗震研究(E-mail: kuichen813@yahoo.cn);

刘哲峰(1976—), 男, 湖南长沙人, 讲师, 博士, 从事高层建筑抗震研究(E-mail: lzf0072006@163.com);

沈蒲生(1939—), 男, 江西新淦人, 教授, 博导, 主要从事混凝土结构基本理论及高层建筑结构研究(E-mail: pssheng1@163.com).

目前规范所采用的抗震设计方法多集中于对结构地震反应最大值的控制,没有考虑地震波持续时间对结构产生的影响,然而对于具有明显累积损伤特性的钢筋混凝土结构而言,持时对结构损伤的影响不可忽略^[1-2]。地震能量分析方法是自20世纪50年代以来提出的一种的抗震设计思想,利用能量参数对持时进行定义为地震持时研究提出了新的思路^[3-4]。地震能量持时的定义可以分为两大类,一类是通过对地面运动加速度记录进行直接处理而得到的,故只与地面运动记录有关,而与结构特征无关,称为地震能量记录持时,一条地震波仅对应一个记录持时。较为典型的能量记录持时定义如Trifunac所提出的:地震能量从总能量的5%累积到95%所经历的时间^[3]。这种定义方法的优势在于能够充分反映地震动的原始特征,但不足之处在于:

1) 由于没有与结构反应相联系,因此无法有效建立结构反应与地震持时之间的联系;2) 时间段的界定掺入了主观规定,缺乏足够的科学依据^[5-6]。另一类定义是根据结构在地震波作用下的能量反应时程特征所作出的,即持时不仅与地面运动有关,也与结构物有关,称为能量反应持时。这类持时定义虽然克服了记录持时仅仅只反映地震动参数的缺点,但目前已有的定义仍然是采用反应能量达到总能量的百分比数值所需时间的方法来进行界定,与记录持时一样也掺入了主观规定^[5]。本文在结构瞬时输入能量概念的基础上提出了一种新的结构能量反应持时定义,由于引入了统计学方法,使得该定义对持时的界定更为客观。

同一地震波对不同周期结构的持时效应是不同的,因此仅仅基于地震波加速度的记录持时并不能体现地震波对结构的持时效应,本文的研究目的就是通过构建结构瞬时能量反应持时谱,来探究不同地震波对于不同周期结构持时效应影响的规律,并通过一个简化模型来近似描述这一规律,为进一步探索结构损伤与地震波持时之间的关系提供必要的研究基础,同时也可以为结构弹塑性时程分析中地震波的选择提供依据。

1 瞬时输入能时程

水平地震作用下单自由度体系的相对能量反应方程为:

$$\int_0^t m\ddot{x}\dot{x}dt + \int_0^t c\dot{x}\dot{x}dt + \int_0^t f\dot{x}dt = -\int_0^t m a_g \dot{x}dt \quad (1)$$

式(1)等号左边分别为结构的相对动能 $E_K(t)$ 、阻尼耗能 $E_D(t)$ 、结构的变形能 $E_Y(t)$,等号右边为相对输入能 $E_I(t)$ 。地震结束时的相对输入能 E_I 称为相对总输入能,简称总输入能^[7]。结构反应历程中连续两个速度零点之间被输入的能量称为瞬时输入能 ΔE ^[8-9],由于两点之间动能增量为零,有:

$$\Delta E_i(t) = \Delta E_{D_i}(t) + \Delta E_{Y_i}(t) \quad (2)$$

$$-\int_t^{t+\Delta t} m a_g \dot{x}dt = \int_t^{t+\Delta t} c \dot{x}\dot{x}dt + \int_t^{t+\Delta t} f \dot{x}dt \quad (3)$$

两个速度零点之间的时间间隔称为瞬时段 Δt ,即结构经历半次振动循环所需要的时间。结构在地震过程中一次往返振动所用的时间是变化的,因此 Δt 是一个变值。结构在地震反应过程中开始和结束时的速度均为零,因此结构总输入能 E_I 和瞬时输入能之间的关系为:

$$E_I(t) = \sum_{i=1}^N \Delta E_i(t) \quad (4)$$

式中, i 指结构经历的第 i 个半次振动循环。图1中的虚线表示一个典型结构的总输入能量时程,实线表示各瞬时段上输入的瞬时能量,称为瞬时输入能量直方图,其中每个矩形的面积等于相应瞬时段上被输入的瞬时能量量值,矩形纵坐标向的边长为:

$$\Delta \bar{E}_i(t) = \Delta E_i(t) / \Delta t_i \quad (5)$$

式中, $\Delta \bar{E}_i(t)$ 称为第 i 个半次振动循环的平均瞬时输入能。

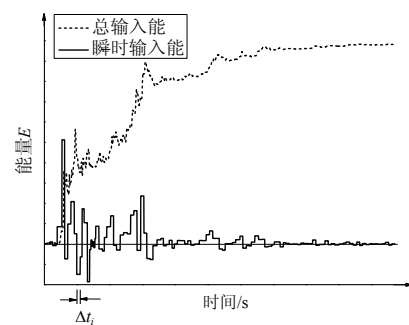


图1 SDOF体系典型能量反应时程曲线

Fig.1 The typical reaction of energy time histories for SDOF system

由瞬时输入能直方图的定义可知,直方图的总面积 S 即为结构总输入能 E_I ,瞬时输入能直方图越狭长,表明能量时程曲线增长越快。因此通过瞬时输入能直方图能够了解地震能量输入的历程,同时,由于瞬时输入能量与结构位移之间具有对应关系^[8-9],因此通过瞬时输入能直方图也能够了解结构位移反应历程的特点。

图 2 为 Taft 波对两个不同周期 SDOF 体系的能量和位移反应时程。通过对比可以发现, 结构总输入能随结构周期不同数值相差很大, 对此许多学者已经有过较为深入的研究^[10-11]。除了最终输入能量的不同之外, 能量输入的历程也有很大差别, 相应的位移历程也有着不同的特征。如图 2(a)所示, 周期为 0.8s 的结构在 3s—8s 时间段上有着高量值的瞬时能量输入, 其位移时程在相应时间段上形成了很大的位移往复, 但随后瞬时输入能量迅速减小, 对

应的位移幅值也迅速减小, 整个位移历程类似于一种脉冲型模式; 图 2(b)显示的是周期为 3.8s 的结构反应历程, 可见瞬时输入能的大小在整个时间轴上相对比较均匀, 相应的位移时程在整个时间段内变化幅度不大, 形成往复型的位移模式。从这个例子可以看出不同结构在相同地震波作用下的能量输入历程有着很大差别, 这种差别导致了结构位移历程模式的截然不同。如果将瞬时能量输入相对集中的时间段定义为结构的反应持时, 那么这一持时也体现了结构位移反应最为强烈的时间段, 而且这一持时随结构周期的变化而变化。

2 结构瞬时输入能量反应持时定义

由式(4)可知结构反应能量时程增量变化与瞬时输入能直方图正半轴部分的分布关系密切。引用统计学理论中一阶矩、二阶矩的概念定义瞬时输入能直方图正半轴分布的重心坐标 t_c 和分布特性参数 t_d 。其数学表达式为:

$$t_d = 2 \cdot \left(\frac{\int_0^T (t - t_c)^2 \cdot \Delta \bar{E}_i(t) dt}{\int_0^T \Delta \bar{E}_i(t) dt} \right)^{1/2} = 2 \cdot \left(\frac{\sum_0^T (t - t_c)^2 \cdot \Delta \bar{E}_i(t) \cdot \Delta t}{\sum_0^T \Delta \bar{E}_i(t) \cdot \Delta t} \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$t_c = \frac{\int_0^T t \cdot \Delta \bar{E}_i(t) dt}{\int_0^T \Delta \bar{E}_i(t) dt} = \frac{\sum_0^T t \cdot \Delta \bar{E}_i(t) \cdot \Delta t}{\sum_0^T \Delta \bar{E}_i(t) \cdot \Delta t} \quad (7)$$

式中: $\Delta \bar{E}_i(t) \geq 0$; \sum 求和表示对应数据离散点情况; Δt 为加速度记录离散点之间的时间间隔; t 为积分时刻的时间; T 为地震波能量记录时间的长度。采用瞬时输入能直方图的正半轴部分不会影响结构能量的增长特征, 仅使总输入能数值有所增大, 但根据统计增大幅度相对总输入能数值都较小, 在工程可接受范围内。 t_c 参数的物理意义为瞬时输入能直方图正半轴部分全部面积的重心相对于坐标轴的位置, t_c 附近的时段是能量输入最为强烈的部分。 t_d 参数具有时间量纲, 它反映了瞬时输入能直方图正半轴能量相对于其重心的一个分布特性。结构能量的反应持时越短, 瞬时输入能直方图越集中, t_d 就越小; 结构能量反应持时越长, 瞬时输入能直方图越分散, t_d 就越大。图 3 所示为某一地震波对单位质量 SDOF 结构能量反应的瞬时输入能直

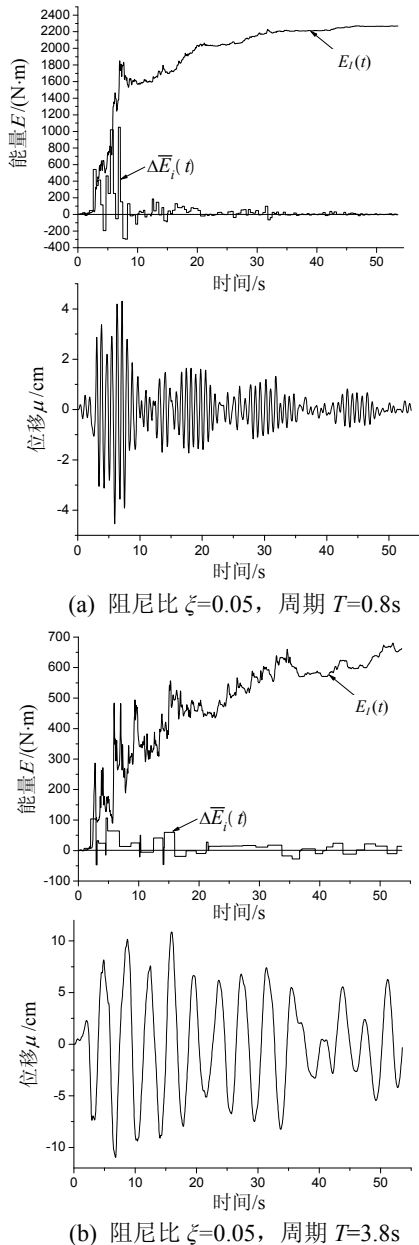


图 2 Taft 波对不同周期的单位质量 SDOF 体系的能量位移反应时程

Fig.2 The reaction of per unit mass energy and displacement time histories of two SDOF systems with $\zeta=0.05$ and $T=0.8, 3.8$ sec to Taft ground motion

方图及其 t_c 、 t_d 参数。

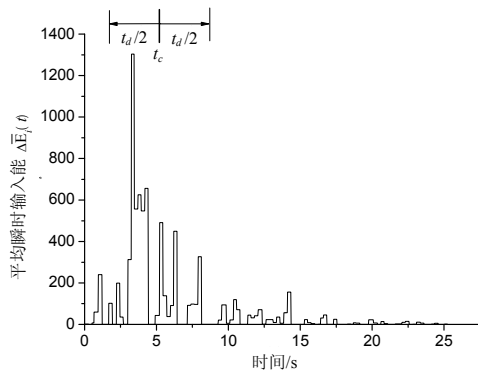


图3 平均瞬时输入能直方图及 t_c 、 t_d 参数

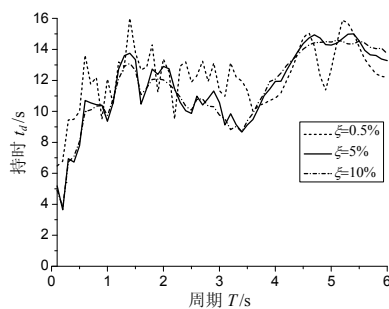
Fig.3 The mean of momentary input energy histogram and t_c , t_d parameters

3 瞬时输入能量持时的影响因素

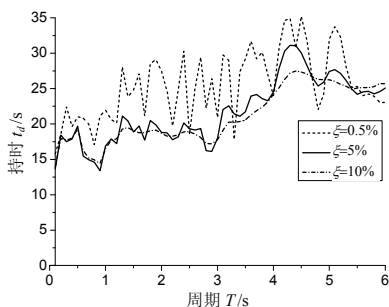
结构能量反应持时体现了地震在时间上的持续特征与结构反应历程之间的联系,其影响因素包括:1) 结构动力参数(周期、阻尼比);2) 地震波特征参数(幅值、频谱特性)。周期的影响能够以谱的形式体现,进而讨论其它因素对持时谱的影响。

3.1 阻尼比的影响

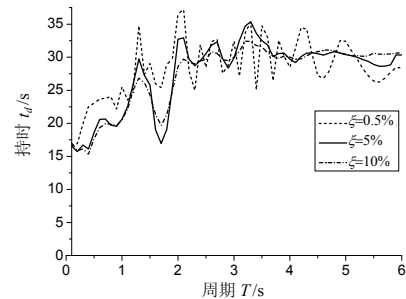
限于篇幅,本文仅展示了三条地震波在不同阻尼比下的结构瞬时输入能反应持时谱,如图4。由图4可知,谱曲线总体上呈增函数趋势,阻尼比越小,谱曲线的跳跃性越强,随着结构阻尼比的逐渐变大,持时谱随周期增加的规律逐渐凸显,曲线的跳跃性逐渐消失,且谱值有变小的趋势。阻尼比的



(a) Cholame 波的持时 t_d 谱



(b) EI Centro 波的持时 t_d 谱



(c) Taft 波的持时 t_d 谱

图4 三条地震波在不同阻尼比结构中的瞬时输入能持时谱

Fig.4 The three duration of momentary input energy spectras of earthquake strong motions with different damping

增大导致结构的阻尼耗能逐渐增加,阻尼的增大削弱了结构的速度脉冲效应,从而也使得持时谱的规律性得到体现。

3.2 地震波加速度幅值的影响

由于加速度调幅只是将地震波数据同时放大或缩小相同倍数,这一过程改变了局部时间点上的能量输入大小,但并不会改变地震波能量的时频分布特性,即不会改变输入能量在时间轴上的分布状况^[12],从而反映地震波时频分布模式的结构瞬时输入能反应持时谱也不会随地震波加速度幅值的调整而改变。将几条典型地震波调幅后计算结构的瞬时输入能反应持时谱也验证了这一观点。

3.3 地震波频谱特性的影响

已有的研究表明地震波峰值速度与峰值加速度比值(V/A)对结构总输入能、最大瞬时输入能都有重要影响,是反映地震波频谱特性的一个重要参数^[10-11,13],同时也是区分近场脉冲型地震的一个重要指标^[14]。本文从美国加州大学 PEER NGA 地震动数据库选取了美国、日本、中国台湾等几个国家和地区 100 条强震记录,根据其 V/A 的值分成几个数值区域,分别计算每一条地震波在阻尼比为 5% 时的 SDOF 结构体系瞬时输入能持时谱。再将得到的持时谱值平均,得到与 V/A 数值区域相关的平均持时谱曲线,如图 5 所示。

从图 5 中可以较为明显的看出瞬时输入能持时谱在低周期区域中都有一个比较陡的上升段,且随着周期的增大,谱曲线趋于水平,但随着 V/A 的增大这个上升段的斜率逐渐减小,且上升段与水平段的交点逐渐向长周期方向移动。在整个周期段上,谱值随 V/A 值的增大而增大。由于地震波在某一频带上能量沿时间轴的分布特点决定了对应周期结

构能量输入历程的特点,因此这种谱型特点与地震波能量在低频带区域分布趋于平缓有一定联系^[12,15]。

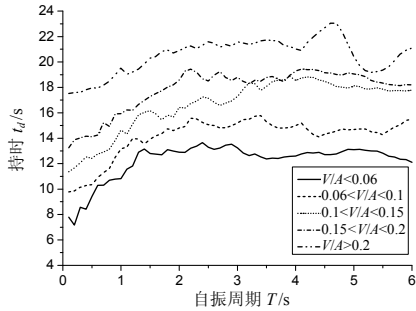


图5 100条地震波的瞬时输入能平均持时谱
Fig.5 The mean of one hundred duration of momentary input energy spectras on earthquake strong motions

4 结构能量反应持时谱简化计算

根据图5显示的地震瞬时输入能持时谱型特点,提出图6所示的持时谱简化模型。简化模型由 t_a 值起始的上升段和水平段构成。其中 t_{max} 为谱峰值, T_1 为上升段达到峰值的周期。以下分别讨论地震波 V/A 值对阻尼比为5%时的谱型参数 t_a 、 t_{max} 和 T_1 的影响。

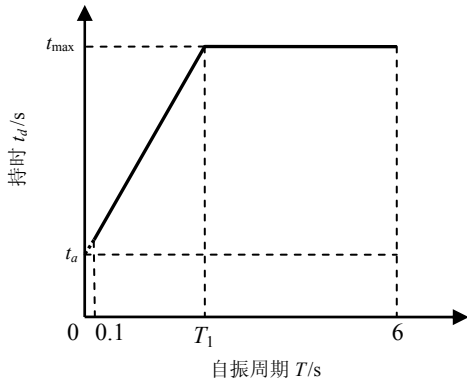


图6 持时 t_d 谱简化计算模型
Fig.6 Simplified model of td spectra

1) 对 T_1 的影响。

图7(a)所示为100条地震记录 V/A 值和能量持时曲线的参数 T_1 的对应关系图。从图7(a)中可以看出随着 V/A 值的增加,最大持时对应的周期值 T_1 有呈指数函数增大的趋势,根据点的分布来看可以采用指数函数来拟合。将图7(a)中点采用指数拟合可以得到下式:

$$T_1 = 2.616 - 1.782 \cdot e^{-V/(0.09 \cdot A)} \quad (8)$$

2) 对 t_a 的影响。

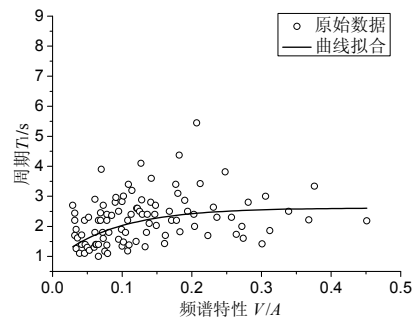
图7(b)所示为100条地震记录 V/A 值和能量持时曲线参数 t_a 的对应关系图。图7(b)中随着 V/A 值的增加,简化持时谱直线初始值 t_a 有线性增加的趋势。将图7(b)中点采用线性拟合可以得到下式:

$$t_a = 6.395 + 38.669 \cdot V/A \quad (9)$$

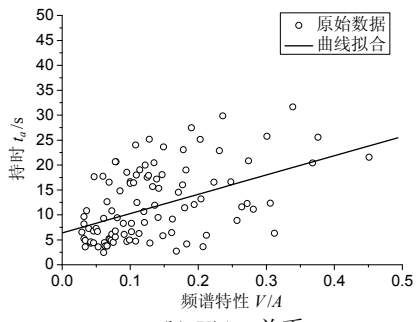
3) 对 t_{max} 的影响。

图7(c)所示为100条地震记录 V/A 值和能量持时谱曲线参数 t_{max} 的对应关系图。图7(c)中显示随着地震波 V/A 值的增加, t_{max} 值呈现线性增长的趋势。根据这一特性采用线性拟合,可以得到下式:

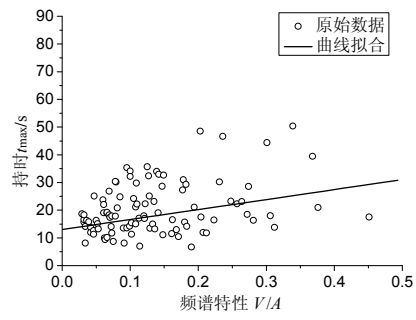
$$t_{max} = 13.022 + 36.01 \cdot V/A \quad (10)$$



(a) $V/A-T_1$ 关系



(b) $V/A-t_a$ 关系



(c) $V/A-t_{max}$ 关系

图7 地震波 V/A 值与简化谱曲线各参数拟合关系

Fig.7 The values of V/A versus parameters of simplified spectra

图8为根据式(8)一式(10)获得的不同频谱特性地震动瞬时输入能持时谱与原谱的比较,比较可见

简化方法的结果与原谱型较为一致, 在 $V/A < 0.1$ 和 $V/A > 0.2$ 两种情况下中周期结构中持时谱简化计算值比实际值要长些, 这在结构地震动分析中是偏于安全的。对于一个 ξ 为 5% 线性单自由度体系, 根据地震波的 V/A 值和结构自振周期可以方便的计算出相应的瞬时输入能量持时。

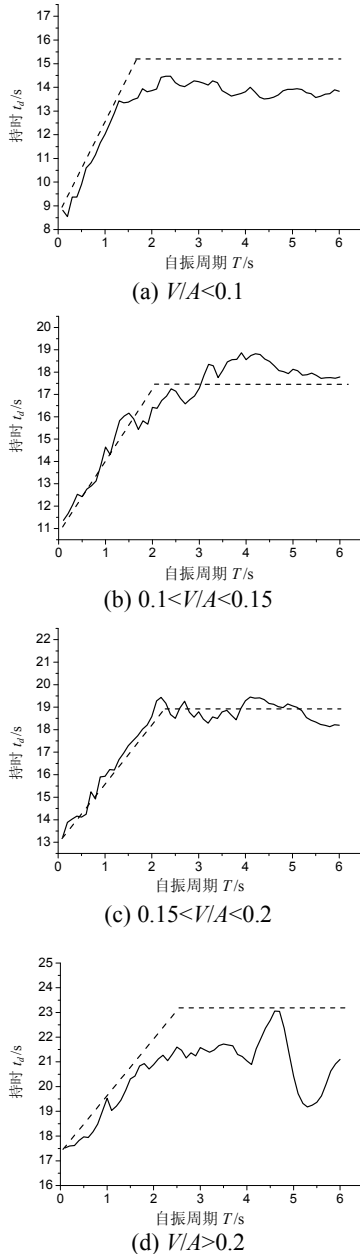


图 8 不同频谱特性地震瞬时输入能量平均持时 t_d 谱与简化计算结果的对比(实线:平均持时谱; 虚线:简化计算结果)

Fig.8 Correlation between average t_d spectra and estimated average $2t_d$ spectra (solid: average t_d spectra; dash: estimated results)

5 结论

本文讨论了地震动幅值、频谱特性和结构阻尼

比对瞬时输入能量持时谱的影响, 并根据大量的强震记录建立了可用于工程参考的地震动瞬时输入能持时谱。主要有以下结论:

(1) 瞬时输入能直方图沿时间轴的分布模式与结构位移历程模式有密切的关系。

(2) 根据统计理论建立的瞬时输入能持时的定义能够较好地反映结构能量及位移时程在时间轴上的变化规律, 同时也能够消除以往能量反应持时定义中的主观因素。

(3) 同一地震波对不同周期结构的能量及位移反应的持时效应是不同的。

(4) 结构阻尼比的增加使得瞬时输入能持时谱曲线更加平滑化, 也使得谱值有减小的趋势。

(5) 瞬时输入能持时谱在达到谱峰值之前随着结构周期的增加而谱值线性增大; 在达到谱峰值后, 随结构周期的增加其谱值基本不产生较大变化, 仅出现微小波动。

(6) 获得的瞬时输入能持时简化计算方法能够较为准确的计算结构在某类地震作用下的能量反应持时。

参考文献:

- [1] Jeong Garrett D, Iwan Wilfred D. The effect of earthquake duration on the damage of structures [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1988, 16(8): 1201-1211.
- [2] Iervolino Iunio, Manfredi Gaetano, Cosenza Edoardo. Ground motion duration effects on nonlinear seismic responses [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2006, 35(1): 21-38.
- [3] Trifunac M D, Novikova E I. Duration of strong ground motion in terms of earthquake magnitude epicentral distance, site conditions and site geometry [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1994, 23(7): 1023-1043.
- [4] Rutenberg Avigdor, Jennings Paul C, Housner George W. The response of Veterans hospital building 41 in the San Fernando earthquake [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1982, 10(3): 349-517.
- [5] 尹保江, 黄宗明, 白绍良. 对地震地面运动持续时间定义的对比如分析及改进建议[J]. 工程抗震, 1999, 6(2): 43-45.
Yin Baojiang, Huang Zongming, Bai Shaoliang. Comparison analysis and suggestion of definition of earthquake duration [J]. Earthquake Resistant Engineering, 1999, 6(2): 43-45. (in Chinese)
- [6] 谢礼立, 周雍年. 地震记录持时与工程持时[J]. 地震工程与工程振动, 1988, 8(3): 12-20.

- Xie Lili, Zhou Yongnian. Ground motion recorded duration and enginee duration [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1988, 8(3): 12—20. (in Chinese)
- [7] Uang C M, Bertero V V. Evaluation of seismic energy in structures [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1990, 19: 77—90.
- [8] 胡冗冗, 王亚勇. 地震动瞬时能量与结构最大位移反应关系研究[J]. *建筑结构学报*, 2000, 21(1): 71—76.
Hu Rongrong, Wang Yayong. A study on relation of instantaneous energy of earthquake strong motion and maximum displacement response of structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2000, 21(1): 71—76. (in Chinese)
- [9] Hori Norio, Inoue Norio. Damaging properties of ground motions and prediction of maximum response of structures based on momentary energy response [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2002, 31: 1657—1679.
- [10] 刘哲锋, 沈蒲生, 胡习兵. 地震总输入能量与瞬时输入能量谱的研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2006, 26(6): 31—36.
Liu Zhefeng, Shen Pusheng, Hu Xibing. Study on input energy and momentary input energy spectra of earthquake strong motion [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2006, 26(6): 31—36. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] 曹晖, 林学鹏. 地震动非平稳特性对结构非线性响应影响的分析[J]. *工程力学*, 2006, 23(12): 30—35.
Cao Hui, Lin Xuepeng. The effect of nonstationary characteristic of earthquake ground motion on the structural nonlinear response [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(12): 30—35. (in Chinese)
- [13] Sucuoglu H, Nurtug A. Earthquake ground motion characteristics and seismic energy dissipation [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1995, 24: 1195—1213.
- [14] Chopra A K, Chintanapakdee C. Comparing response of SDF systems to near-fault and far-fault earthquake motions in the context of spectral regions [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2001, 30(12): 1769—1789.
- [15] Basu Biswajit, Gupta Vinay K. Seismic response of SDOF system by wavelet modeling of nonstationary process [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 26(5): 1142—1150.

(上接第 11 页)

- [11] 张鑫, 贾留东, 魏焕卫. 建筑物平移与纠倾技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 知识产权出版社, 2008.
Zhang Xin, Jia Liudong, Wei Huanwei. Technology of moving and incline-rectifying of buildings [M]. Beijing: China Water Power Press, Intellectual Property Publishing House, 2008. (in Chinese)
- [12] 刘祖德. 地基应力解除法纠偏处理[J]. *土工基础*, 1990, 4(4): 1—6.
Liu Zude. Tilt-Correcting of foundation stress relieve method [J]. *Soil Engineering and Foundation*, 1990, 4(4): 1—6. (in Chinese)
- [13] 唐业清. 建(构)筑物纠倾新技术[J]. *建筑技术*, 1995, 4(6): 323—327.
Tang Yeqing. New technology of building rectification [J]. *Architecture Technology*, 1995, 4(6): 323—327. (in Chinese)
- [14] 焦五一. 地基变形计算的新参数——弦线模量的原理和应用[J]. *水文地质工程地质*, 1982(1): 30—33.
Jiao Wuyi. The new parameters of base deformation calculation——chord modulus principle and application [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1982(1): 30—33. (in Chinese)
- [15] 徐向东, 贾留东, 孙剑平. 建(构)筑物基底掏土灌水法纠倾——设计方法与工程实例[J]. *建筑结构学报*, 1999, 20(5): 61—65.
Xu Xiangdong, Jia Liudong, Sun Jianping. Design and practice for rectifying leaning building by digging-out soils and filling-in water [J]. *Journal of Building Structures*, 1999, 20(5): 61—65. (in Chinese)
- [16] Pryke J F S. The Pynford underpinning method [M]// Thorburn S, Littlejohn G S. *Underpinning and Rentention*, 2nd ed. Blackie Academic & Professional, an imprint of Chapman & Hall, Glasgow, UK, 1993: 157—197.
- [17] GB50068-2001, 建筑结构可靠度设计统一标准[S]. 2002.
GB50068-2001, Unified standard for reliability design of building structures [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [18] GB50153-2008, 工程结构可靠性设计统一标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
GB50153-2008, Unified standard for reliability design of engineering structures [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2009. (in Chinese)