

王德才, 叶献国, 常磊. 2011. 考虑场地条件与设计地震分组的输入能量谱研究. 地震学报, 33(1): 91-102.
Wang Decai, Ye Xianguo, Chang Lei. 2011. A study on input energy spectrum in consideration of site effect and design earthquake classification. *Acta Seismologica Sinica*, 33(1): 91-102.

考虑场地条件与设计地震分组的 输入能量谱研究^{*}

王德才^{1),*} 叶献国^{1,2)} 常 磊¹⁾

1) 中国合肥 230009 合肥工业大学土木与水利工程学院

2) 中国合肥 230009 安徽省土木工程结构与材料省级实验室

摘要 建立简单适用的设计输入能量谱是将能量方法应用于实际工程设计及校核的前提。选择了Ⅰ类、Ⅱ类和Ⅲ类场地共694条水平地震动记录, 分析了不同的场地类别和设计地震分组下输入能量谱的特点。通过12个不同地震动参数与能量谱值的相关性分析, 得到了表征地震输入能量的地震动参数。基于我国现行规范规定的设防烈度和设防水准, 提出了地震分组指标, 并建立了相应的阻尼比为5%的弹性单自由度体系设计输入能量谱, 为应用能量设计法及选择地面运动输入奠定了基础并提出相关建议。

关键词 能量谱 场地条件 相关性 强度指标 设计地震分组 地震动记录

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2011.01.008 中图分类号: P315.9 文献标识码: A

A study on input energy spectrum in consideration of site effect and design earthquake classification

Wang Decai^{1),*} Ye Xianguo^{1,2)} Chang Lei¹⁾

1) School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

2) Anhui Provincial Civil Structural and Material Laboratory, Hefei 230009, China

Abstract: Establishing a simplified applicable design input energy spectrum is the basis of applying the energy method to practical engineering design and verification. This paper has chosen 694 horizontal seismic records on class I, II and III sites, and analyzed energy spectrum with different classification of design earthquakes and site classes. The correlation between 12 different ground motion parameters and the energy spectrum is examined, and a ground motion parameter among them having strong relation with ground motion input energy is selected. Based on the provisions of fortification intensity and security standard in the present code, a new parameter of classification of design earthquake is put forward and the corresponding design input energy spectrum for damping ratio of 5% of the elastic single degree of freedom system is built. Furthermore,

* 基金项目 国家自然科学基金重大研究计划项目(90715016), 安徽省自然科学基金项目(070415220)和土木工程国家重点实验室开放基金项目(SLDRCE08-HZ-01)资助。

收稿日期 2009-06-24 收到初稿, 2010-08-13 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: wdecai@163.com

some valuable recommendations for using the energy-based design method and selection of input ground motion are proposed.

Key words: energy spectrum; site condition; correlation; intensity measure; classification of design earthquake; strong ground motion records

引言

由于基于能量概念的分析和设计方法综合考虑了力和位移这两个重要的结构设计参数,而且可以考虑强震时对结构损伤的影响,与其它方法相比,能够更全面地反映地震作用的特性及其对结构的影响。因此,自从 Housner(1956)提出能量设计方法的概念以来,众多学者对能量方法已进行了大量的研究(Akiyama, 1985; Uang, Bertero, 1990; Fajfar, Vidic 1994; Decanini, Mollaoli, 1998; Surahman, 2007)。已有的研究结果表明,当结构的质量和自振周期确定后,地震动作用下输入到结构的能量是一个相对稳定的值,地面运动总输入能量的确定也是能量方法需要解决的关键问题。由于采用谱的形式便于设计应用,因此较多文献对地震动输入能量谱进行了研究(Chai, Fajfar, 2000; Riddell, Garcia, 2001; Manfredi, 2001; Benavent *et al.*, 2002; 程光煜, 叶列平, 2008; 周云等, 2008),但是以上文献没有按我国场地分类以及设计地震分组的特点进行输入能量谱的研究。

由于场地以及震级和震中距等地震环境对地震动的频谱组成会有较大的影响,即使在相同的地震动峰值条件下,地震动的输入能量谱也会有很大的差别。因此我们还必须研究具有相同峰值的地震动在不同场地条件下以及考虑震级和震中距(或断层距)等地震环境影响的输入能量谱。

按照我国的场地类别划分特点选择了 694 条水平地震动记录,讨论在相同峰值地震动下的场地类别、设计地震分组对弹性单自由度体系(SDOF)输入能量谱的影响,通过分析 12 个地面运动参数与输入能量谱值之间的相关性,寻找能表征地震动作用下结构输入能量大小的地震动参数,据此提出考虑震级和震中距(或断层距)等地震环境影响的分组指标,并建议供设计使用的多线型输入能量谱,为应用能量设计法及选择地面运动输入奠定基础。

1 单自由度体系输入能量计算方法

单自由度体系的运动方程可表示为

$$m\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + f_s(u, \dot{u}) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

式中, $u(t)$ 、 $\dot{u}(t)$ 和 $\ddot{u}(t)$ 分别为各时刻体系相对于地面的位移、速度和加速度; m 为体系的质量; C 为体系的粘滞阻尼系数; f_s 为体系的恢复力,对于弹性体系, $f_s = ku(t)$, k 为弹性体系的刚度; $\ddot{u}_g(t)$ 为各时刻地面运动加速度。

将运动微分方程两端对体系相对位移积分,可得到相对位移定义的相对能量方程

$$\int_0^u m\ddot{u} d\ddot{u} + \int_0^u C\dot{u} du + \int_0^u f_s du = - \int_0^u m\ddot{u}_g du \quad (2)$$

将上式变换为对时间 t 积分,即得到单自由度体系地震反应时的能量计算表达式(Uang, Bertero, 1990),可简写为

$$E_K + E_D + E_A = E_I \quad (3)$$

其中, $E_K = \int_0^t m\ddot{u}\dot{u} dt$, 为体系相对位移的动能; $E_D = \int_0^t C\dot{u}^2 dt$, 为体系的阻尼耗能; $E_A = \int_0^t f_s \dot{u}^2 dt$, 为体系的变形能, 由可恢复的弹性应变能 E_E 和不可恢复的累积滞回耗能 E_H 组成, 即 $E_A = E_E + E_H$; $E_I = -\int_0^t m\ddot{u}_s \dot{u} dt$, 为从地震开始时起对结构的总输入能。对于弹性体系, 由于累积滞回耗能 $E_H = 0$, 因此体系变形能即为可恢复的弹性应变能。

本文中地面运动对弹性单自由度体系的总输入能量按照式(3)采用逐步积分方法进行计算, 体系的临界阻尼比取为 5%, 周期范围为 0.05—6 s。为了消除质量影响及计算方便, 除了计算各地面运动参数与输入能量谱值之间相关性时使用单位质量输入能量值, 其它分析均采用常用的单位质量输入能量等效速度 V_E 的形式(Akiyama, 1985; Uang, Bertero, 1990), 即

$$V_E = \sqrt{\frac{2E_i}{m}} \quad (4)$$

2 强震记录的选择与分类

本文以美国太平洋地震工程研究中心(PEER)地震动记录数据库(NGA)和 Ambraseys 等(2004)发布的欧洲地面运动记录光盘数据库(SMDN)作为数据源, 前者包括了世界各地的主要地震动记录并且经过统一校正处理, 后者是从欧洲和中东的所有强震记录中经过严格筛选并统一处理后得到的 462 组记录, 并且给出了部分台站的详细钻孔资料。

由于本文选择的记录需考虑按中国规范的场地类别进行划分, 而目前各国规范对场地分类的划分标准尚存在着一定的差异, 我国《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)(国家质量监督检验检疫总局, 中华人民共和国建设部, 2001)(以下简称抗震规范)规定以 20 m 深度范围内土层的等效剪切波速和覆盖层厚度来划分场地类别, 而通常各强震记录数据库只有运动记录场地地表以下 30 m 范围内的土层等效剪切波速值或场地地质条件的简单描述。耿淑伟(2005)搜集了美国西部 254 个台站场地的钻孔资料, 共确定了 713 条记录的场地类别。吕红山和赵凤新(2007)对中美两国场地类别划分进行了对比分析, 得出了中国的 I—IV 类场地与地表 30 m 等效剪切波速之间的对应关系分别大致为: 大于 510 m/s, 260—510 m/s, 150—260 m/s 和小于 150 m/s。

参考上述文献以及计算 SMDN 中给出详细钻孔资料台站场地的 20 m 深度范围内土层的等效剪切波速和覆盖层厚度, 最终分别选择了 I 类、II 类和 III 类场地地面运动记录为 193, 310 和 191 条。由于满足 IV 类场地的记录很少, 不具有统计意义, 因此本文未对 IV 类场地进行研究。选择的大部分记录的场地类型都是由台站钻孔详细资料通过计算得到的, 从而保证了得到的统计规律可以作为工程参考。为了使地震动强度不能太小, 每条记录对应的震级都大于 4, 且峰值加速度都大于 $0.02g$ (g 为重力加速度, 值为 9.8 m/s^2)。不同场地各记录的震级与震中距分布见图 1。从图中可以看出, 大部分记录震级集中在 5.5—8 之间, 震中距集中在 10—150 km 之间。因此, 选择的记录具有较广的覆盖范围且大部分为破坏性地震的记录。

3 场地类别与设计分组的影响

将各类场地对应的地面运动加速度记录分别调整至相同的峰值加速度 $0.2g$, 计算结构临界阻尼比为 5%, 初始周期为 0.05—6 s 范围内不同周期的弹性单自由度体系在不同

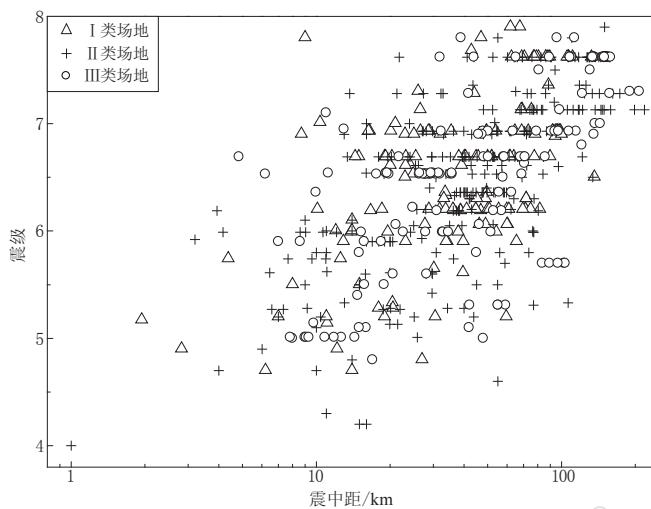


图 1 震级与震中距分布

Fig. 1 Distribution of magnitude and epicentral distance

地面运动作用下的输入能量等效速度时程, 取不同周期对应的等效速度时程最大值, 建立阻尼比为 5%, 周期在 0.05—6 s 范围内各条记录的输入能量等效速度谱。然后可以分析在相同的设计地震动下, 场地类型和设计地震分组对输入能量等效速度谱的影响。

通过计算 I 类、II 类和 III 类场地 3 组地面运动记录等效速度谱各周期点谱值的平均值, 得到平均等效速度谱, 如图 2a 所示。平均谱曲线由上升段、平台段和下降段组成。场地的类别不同, 则各段之间的分界特征周期点也有所不同。随着场地土逐渐变软, 两分界特征周期点逐渐变大, 并且平台段的长度也逐渐变长。

抗震规范以地震影响系数曲线的设计特征周期 T_g 将每类场地分为 3 组, 从而考虑震级和震中距(或断层距)等对反应谱的影响。根据《中国地震动参数区划图》(GB18306-2001) (胡聿贤, 2001) 对地震动特征周期 T_g 的定义, 以及关于 II 类场地、阻尼比 5% 的反应谱特征周期分区值的规定和地震动反应谱特征周期土层调整表的规定, 并参考翟长海和谢礼立 (2006) 的分组方法, 计算了不同场地各条记录的特征周期并进行了分组, II 类场地的 310 条记录按 T_g 进行分组后, 各组记录的平均等效速度谱如图 2b 所示。第 1 组至第 3 组所采用的记录数量分别为 95, 38 和 177。从图中可以看出, 随着设计地震分组由第 1 组至第 3 组的改变, 分界特征周期点逐渐变大的同时谱峰值也逐渐变大。设计地震分组对谱的峰值和特征周期点均有明显影响。这是由于输入能量的大小不但与幅值相关, 而且与地震动的持时和频谱特性有密切关系。因此, 输入能量等效速度谱可以表征地面运动的幅值、频谱和持时特性。

随着场地土变软, 等效速度谱不但分界点特征周期不断变长, 而且谱峰值也逐渐变大。设计地震分组由第 1 组至第 3 组, 分界点特征周期也逐渐变长, 并且谱峰值也不断变大, 这与加速度反应谱有明显的不同。

由于在相同的地震动峰值下, 场地类别以及地震环境对输入能量谱的峰值和分界点特征周期均有影响, 因此建立实际工程使用的设计输入能量谱, 需要能表征地震动输入能量的地震动参数对地面运动记录进行分类来建立设计谱。

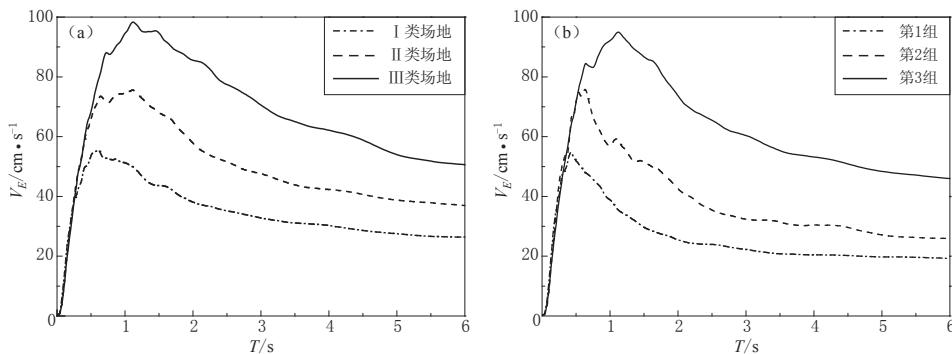


图 2 不同场地类型和设计地震分组的平均输入能量谱

(a) 不同场地类型; (b) II类场地不同设计地震分组

Fig. 2 Average input energy spectrum of different site condition and classification of design earthquake
(a) Different site condition, (b) classification of design earthquake for site II

4 与输入能量相关的地震动参数确定

4.1 不同地震动参数的定义

在地震工程研究过程中,针对不同的研究目的及地面运动的不同特性提出了不同的地震动参数(叶献国, 1998; Riddell, Garcia, 2001),如常用的地面运动峰值加速度等。对于如何衡量地面运动对结构输入能量的大小,不同文献提出了不同的地震动参数。下面通过分析 12 个不同的地震动参数与各周期点输入能量谱值之间的相关性,得到用于衡量地面运动对弹性单自由度体系输入能量较为合适的地震动参数。

分析的地震动参数包括峰值参数、均方根参数、谱强度参数和混合参数。峰值参数包括峰值加速度(PGA)、峰值速度(PGV)和峰值位移(PGD);均方根参数包括加速度均方根(a_{rms})和速度均方根(v_{rms});谱强度参数包括加速度谱强度(ASI)和速度谱强度(VSI),加速度谱强度定义为加速度反应谱曲线下周期 0.1—0.5 s 的面积,速度谱强度定义为速度反应谱曲线下周期 0.1—2.5 s 的面积;混合地震动参数为综合考虑地震动特性的参数,包括使用较广泛的地面运动能量指标 Arias 强度参数 I_a , Araya 和 Saragoni(1985)提出的地面运动潜在破坏势参数 P_d , Fajfar 等(1989)提出的针对中长周期结构的地震动参数 I_f , Park 等(1985)提出的特征强度 I_c ,以及将 Kuwamura 和 Galambos(1989)提出的预测输入能量表达式中的卓越周期用峰值速度与峰值加速度比值(V/A)代替得到的地面运动参数 I_e 。Fajfar 和 Vidic(1994)认为,一般的地面运动并不存在明显的卓越周期,由于 V/A 与 Newmark-Hall 弹性谱中的常加速度段与常速度段的过渡周期值之间存在较强的相关性,而过渡周期值通常被定义为地面运动的卓越周期,因此在等式中可以采用 V/A 代替卓越周期。各参数表达式见表 1。

各参数表达式中, $a(t)$, $v(t)$ 和 $d(t)$ 分别为加速度、速度和位移时程各时间点的值; t_1 和 t_2 分别为计算时程的起止时间点; S_a 和 S_v 分别为谱加速度和谱速度值, ξ 为临界阻尼比, T 为反应谱的周期; D_r 为加速度时程的总持时, v_0 为加速度时程单位时间内的穿零次数; t_d 为 Trifunac-Brady 用地震动记录本身的相对能量定义的强震持时, 定义为达到地震动总能量 5% 和 95% 所经历的时间间隔, 即 90% 能量持时(Trifunac, Brady, 1975)。

表 1 不同类型参数的表达式
Table 1 Expressions of different types of parameters

类型	表达式
峰值参数	$PGA = \max(a(t))$; $PGV = \max(v(t))$; $PGD = \max(d(t))$
均方根参数	$a_{rms} = \left(\frac{\int_{t_1}^{t_2} a^2(t) dt}{t_2 - t_1} \right)^{1/2}$; $v_{rms} = \left(\frac{\int_{t_1}^{t_2} v^2(t) dt}{t_2 - t_1} \right)^{1/2}$
谱强度参数	$ASI(\xi) = \int_{0.1}^{0.5} S_a(T, \xi) dT$; $VSI(\xi) = \int_{0.1}^{2.5} S_v(T, \xi) dT$
混合参数	$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{D_r} a^2(t) dt$; $P_d = \frac{I_a}{v_{rms}^2}$; $I_f = PGV t_d^{0.25}$; $I_c = a_{rms}^{1.5} t_d^{0.5}$; $I_e = \frac{V}{A} \int_0^{D_r} a^2(t) dt$

4.2 相关性分析

计算了 694 条地面运动记录的不同地震动参数和周期范围为 0.05—6 s, 阻尼比为 5% 的弹性单自由度体系单位质量输入能量谱. 通过计算输入能量谱各周期点谱值与 12 个不同指标之间的 Pearson 相关系数的大小确定相关性的强弱. 两变量 X 与 Y 之间的 Pearson 相关系数计算表达式为

$$\rho_{Pearson} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\left[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \right]^{1/2}} \quad (5)$$

式中, \bar{X} 和 \bar{Y} 分别为所有数据点 X_i 和 Y_i 的均值, n 为 (X_i, Y_i) 对应的数据点数. 为了更全面地分析输入能量与各指标的相关性, 对各周期点输入能量谱值与强度指标之间分别进行线性回归分析和非线性回归分析. 非线性回归表达式与 Riddle 和 Garcia(2001)假定的输入能量与地震动参数之间的关系表达式相同, 即为

$$\text{线性} \quad E = \alpha + \beta P \quad (6)$$

$$\text{非线性} \quad E = \alpha P^\beta \quad (7)$$

式中, E 为输入能量, P 为地震动参数, α 和 β 为回归系数. 由于通过计算 Pearson 相关系数大小确定相关性的强弱, 因此进行非线性相关性分析时, 分别对 E 和 P 求对数后计算相关系数, 这样得到的 Pearson 相关系数即为二者之间按式(7)拟合后得到的.

通过线性和非线性相关性分析, 各周期点输入能量谱值与 8 个相关性较好的参数之间的相关系数谱见图 3. 从参数的定义可以看出, 相关性较好的 8 个参数为与速度相关的参数和混合地震动参数. 图 3a 为线性相关系数谱, 从图中可以看出, 在短周期范围内相关性较好的参数为 I_a , I_c 和 I_e ; 在 0.6—2.5 s 之间 I_e , v_{rms} 和 VSI 与各周期点总输入能量相关性较好; 而在长周期段相关性较好的参数为 v_{rms} , I_f 和 I_e , 且三者与各点输入能量之间相关系数相差不大.

图 3b 为非线性相关系数谱. 从图中可以看出短周期范围内相关系数较大的参数仍为 I_a , I_c 和 I_e . 但是在中长周期段 I_a 和 I_c 的相关系数值逐渐变小. 在中长周期范围内, 相关系数较大的参数为 I_e , I_f 和 v_{rms} . VSI 在中等周期范围的相关系数较大, 但在长周期段不断减小. 从线性和非线性相关性来看, 在整个周期范围内与其它参数相比而言, 相关性较

好的参数为 I_e . I_e 在短周期范围的相关系数值仅次于 I_a 和 I_c , 但 I_a 和 I_c 在中长周期的相关系数较小. 在中长周期范围内, 大部分周期点的相关系数值都高于 VSI. 与 I_f 和 v_{rms} 相比, 尽管在长周期范围内二者的相关系数值略高于 I_e , 但是相差很小. 在短周期和中等周期范围内二者的相关系数值则小于 I_e , 尤其是线性相关系数值. 与 PGV 和 P_d 相比, 在整个周期范围内 I_e 的相关系数值都大于二者的相关系数值 PGV 和 P_d .

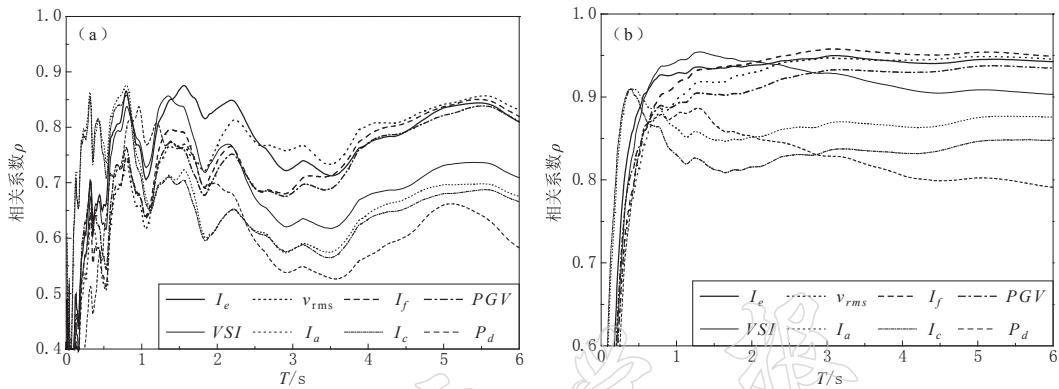


图 3 各参数对应的相关系数谱

(a) 线性; (b) 非线性

Fig. 3 Correlation coefficient spectrum of different index

(a) linear; (b) nonlinear

计算了各指标与能量谱峰值之间的相关系数, I_e 与能量谱峰值之间的相关系数为 0.9087, 而其它参数均小于 0.9. 因此, I_e 可以作为衡量地面运动输入能量的强度指标, 从而可为能量设计方法中选择地面运动记录提供依据, 以及作为调整地面运动记录的地震动参数.

5 设计等效速度谱的建立

由于目前的抗震规范是基于强度的设计方法, 所以衡量地面运动强度采用峰值加速度, 采用的设计反应谱是加速度反应谱的形式, 地震区划采用的地震动参数也为峰值参数. 但抗震规范中加速度反应谱通常改变的只是反应谱的特征周期, 而由前面分析可知, 在相同的地震动峰值下, 随着场地类型和设计地震分组的改变, 输入能量等效速度谱的两分界点特征周期和谱平台段峰值都会改变, 从而也使得设计地震分组对输入能量等效速度谱的谱值及特性有很大的影响.

5.1 设计地震分组划分

为了建立基于相同设防水准和设防烈度的设计等效速度谱, 不仅需要考虑不同的场地类型, 而且还需要考虑到设计地震分组, 并且地震分组与输入能量等效速度谱谱值和分界点特征周期关系密切. 因此, 需要采用能反映等效速度谱特点, 并与等效速度谱相关性较好的参数进行设计地震分组, 才能得到较为可靠的设计谱. 通过各地面运动参数与各周期点输入能量谱值之间的相关性分析发现, I_e 与各周期点的输入能量之间的相关性较好, 也即与 V_E 相关性较好的参数为 $\sqrt{I_e}$. 为了消除峰值加速度的影响, 定义分组参数 T_e (单位为 s).

$$T_e = \frac{\sqrt{I_e}}{PGA} \quad (8)$$

抗震规范中加速度反应谱的建立是通过特征周期 T_g 来考虑地震环境对反应谱形状的影响的。通过各条地面运动记录的统计分析，各类场地记录 T_e 与 T_g 之间的相关系数在 0.80 左右，而通常两组数值之间相关系数达到 0.6 则被认为具有较强的相关性。图 4 给出了Ⅱ类 T_e 值与特征周期 T_g 的分布图。随着 T_g 逐渐变大， T_e 通常也逐渐变大，二者之间呈现出较强的相关性。因此，采用 T_e 进行分组也体现了目前规范采用 T_g 进行设计地震的特点。

地震学研究表明，峰值加速度和峰值速度通常是由不同频率成分的地震动记录所形成的，峰值加速度通常与高频波相关而峰值速度与中低频波相关。由于随着断层距的增大，高频波衰减较快，从而导致峰值加速度衰减更迅速，造成离断层较近的地面运动具有较低的 V/A 值。因此，断层距较小的记录通常为短持时、高频、脉冲型，而断层距较大的地面运动记录通常具有较长持时和更丰富的频率成分。Tso 等(1992)研究表明，大部分较低 V/A 值的地面运动记录从小震或中震取得的，而较高 V/A 值的地面运动记录则从较大的震中距和震级的地震中取得的；具有较低 V/A 值的地面运动记录地震动能量集中在高频部分，较高 V/A 值的地面运动记录地震动能量集中在低频部分。一般而言，场地土越软，V/A 值相对越大，震级越大，地面运动持时越长。从以上分析可以得出，震中距和震级越大，地面运动持时相对越长；V/A 值越大，则 T_e 值相对越大。反之，则 T_e 值相对越小。图 5 为Ⅱ类场地地震动记录按 T_e 值大小分组后各组记录的震级和震中距分布。可以看出，总体上震级和震中距越大， T_e 值也越大。因此， T_e 反映了场地类型、震级和震中距(或断层距)等的影响。

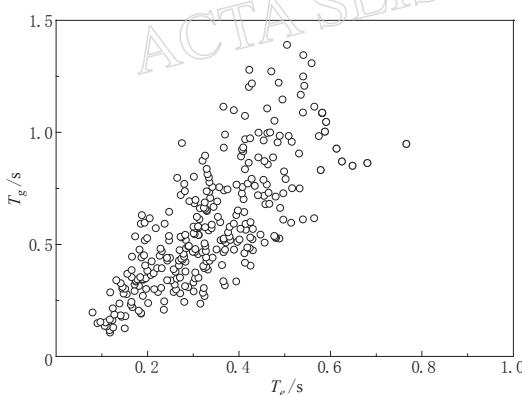


图 4 Ⅱ类场地记录的 T_e 与 T_g 分布

Fig. 4 Distribution of T_e and T_g in the records of site II

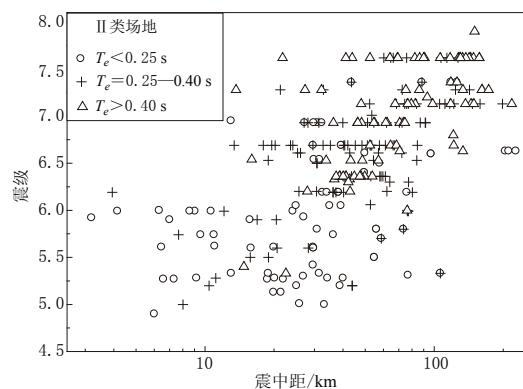


图 5 按 T_e 分组后各组的震级和震中距分布

Fig. 5 Distribution of magnitude and epicentral distance grouped by T_e

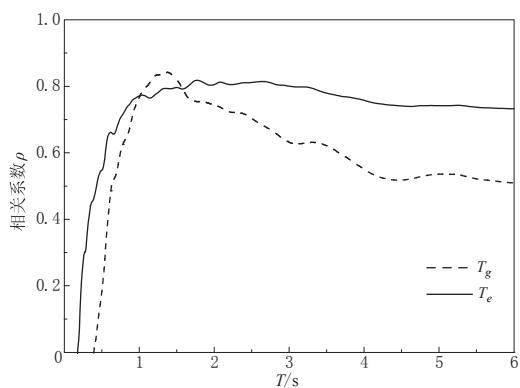
在相同的幅值条件下，与 T_g 相比较， T_e 同时考虑了地面运动的频谱特性和持时对输入能量的影响，更全面反映了地面运动的特点。此外，通过对 T_e 和 T_g 分别与等效速度谱值之间的相关性分析(图 6)可见，除了周期在 1.0—1.5 s 外，其它各周期点 T_e 与输入能量之间的相关性强于 T_g 。因此，采用参数 T_e 进行设计地震分组建立设计输入能量等效速度谱，更能反映能量谱的特点，采用 T_e 划分设计地震分组建立等效速度谱更加合理。

5.2 设计输入能量等效速度谱的建立

根据数据拟合得到的 T_g 与 T_e 之间的大致对应关系，并考虑不同设计地震分组特征周

期 T_g 的范围以及各类场地的 T_e 及 T_g 值分布情况, 采用 T_e 对不同场地地面运动记录进行分组。与抗震规范相同将不同场地类别分为 3 组, 各组的 T_e 范围如表 2 所示。

将不同场地类别地面运动加速度记录峰值调整至设防烈度为Ⅷ度, 设防水准为 50 年超越概率为 10% 对应的峰值加速度 $0.2g$, 计算各条地面运动记录的等效速度谱, 以此作为建立供设计参考的等效速度谱的基准。建立设计谱的各组记录数量、 T_e 均值及 T_g 均值见表 3。从表中可以看出, 各组记录的 T_g 均值均大于抗震规范划分

图 6 T_e , T_g 与输入能量之间相关系数谱Fig. 6 Correlation coefficient spectrum of T_e and T_g 表 2 不同场地类别按 T_e 进行分组分区表Table 2 Grouping of different site condition according to T_e

按 T_e 分组 组号	场地类别		
	I	II	III
1	≤ 0.2	≤ 0.28	≤ 0.38
2	$0.2 \sim 0.28$	$0.28 \sim 0.38$	$0.38 \sim 0.52$
3	> 0.28	> 0.38	> 0.52

胡聿贤, 2001). 计算了各组记录的均值加一倍标准差反应谱, 如图 7 所示。若假定谱纵坐标为对数正态概率数分布, 84.1% 保证率大约相当于均值加一倍标准差值。因此, 图 7 为具有 84.1% 可靠水平, 阻尼比为 5% 的单自由度体系输入能量等效速度谱。从图 7 可以看出, 随着场地土逐渐变软, 等效速度谱平台段长度逐渐变长, 并且峰值也逐渐变大; 设计

表 3 各组地震动记录数量、 T_e 平均值及 T_g 范围Table 3 Number of each group records, the average value of T_e and the scope of T_g

按 T_e 分组 组号	场地类别								
	I			II			III		
记录数	T_e 均值/s	T_g 均值/s	记录数	T_e 均值/s	T_g 均值/s	记录数	T_e 均值/s	T_g 均值/s	
1	69	0.149	0.262	115	0.205	0.377	83	0.265	0.469
2	49	0.245	0.409	88	0.322	0.586	52	0.432	0.846
3	75	0.358	0.619	107	0.476	0.811	56	0.653	1.188

表 4 Ⅷ度设防烈度地震水准下的设计谱参数

Table 4 Parameter of the proposed design spectrum for grade Ⅷ fortified earthquake

T_e 分组 组号	场地类别											
	I				II				III			
记录数	T_e 均值/s	T_g 均值/s	记录数	T_e 均值/s	T_g 均值/s	记录数	T_e 均值/s	T_g 均值/s	记录数	T_e 均值/s	T_g 均值/s	
1	0.20	0.60	50	0.5	0.35	0.82	72	0.5	0.50	1.00	90	0.5
2	0.35	0.85	75	0.5	0.50	1.15	100	0.5	0.75	1.45	140	0.5
3	0.55	1.20	105	0.5	0.70	1.60	145	0.5	1.00	2.00	205	0.5

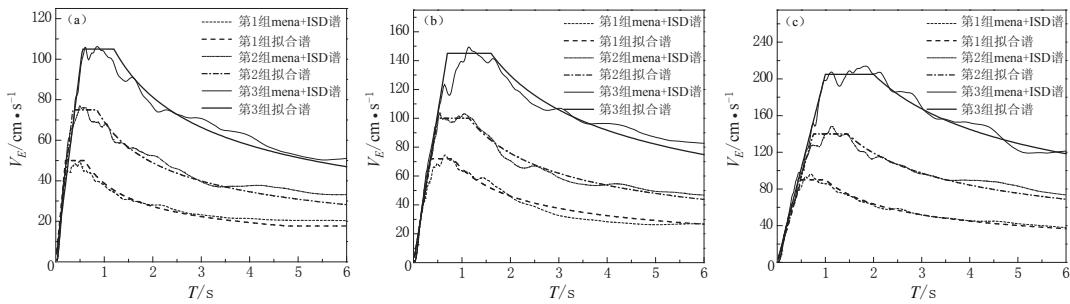


图 7 不同分组均值加一倍标准差谱和建议设计谱

(a) I 类场地; (b) II 类场地; (c) III 类场地

Fig. 7 Mean plus standard deviation spectra and the proposed spectra
(a) Site I ; (b) site II ; (c) site III

地震分组从第 1 组至第 3 组, 等效速度谱平台段长度也不断变长, 峰值不断变大, 而下降段衰减系数几乎不变。

图 7 中不同场地的各组等效速度谱大致由上升段、平台段和下降段组成。由理论分析可知, 当结构周期 $T \rightarrow 0$ 时, $V_E \rightarrow 0$; 当 $T \rightarrow \infty$ 时, $V_E \rightarrow PGV$ 。因此, 等效速度谱的下降段最终会趋于一个常数值。为了方便使用, 采用图 8 的分段形式进行建立阻尼比为 5% 的弹性单自由度体系输入能量等效速度设计谱。

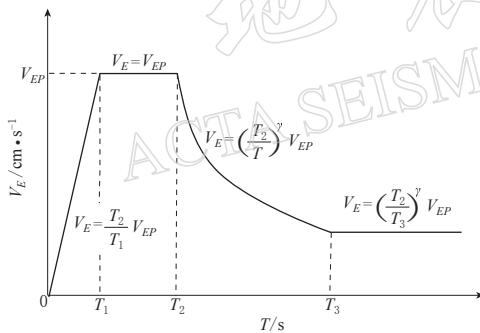


图 8 等效速度设计谱模式和各段表达式

Fig. 8 Shape of equivalent velocity spectrum and expressions

的参数只是设计等效速度谱峰值, 只需将谱峰值乘以设计地面运动加速度峰值与 $0.2g$ 的比值, 即可得到对应的谱峰值 V_{EP} 。

6 讨论与结论

选取了 694 条地面运动记录, 并按我国的场地类别对记录进行了分类。分析了输入能量谱各周期点的谱值与 12 个不同地震动参数之间的相关性, 讨论了不同场地类型和不同设计地震分组对输入能量谱的影响, 并提出了设计输入能量等效速度谱, 得到了以下结论:

1) 通过相关性分析得到的与输入能量谱各周期点谱值相关性较好的强度指标 I_e , 不但反映了地面运动的能量特性, 同时也反映了频谱特性对地面运动强度的影响, 可以作为

采用图 8 分段形式的各段表达式, 通过拟合建立了不同场地类别和地震分组的设计等效速度谱, 如图 7 所示。从图中可以看出, 分段式设计等效速度谱与各组均值加一倍标准差反应谱吻合良好。不同场地类别和地震分组所对应的分段式设计等效速度谱各参数建议值见表 4。由于在 0—6 s 周期范围内, 只有 I 类场地第 1 组出现了设计谱的 $T > T_3$ 段, 因此表中未给出 T_3 值大小。I 类场地第一组设计谱 T_3 大约为 $8T_2$ 。

对于其它的设防烈度和设防水准, 改变

基于能量设计方法选择地面运动记录的依据。

2) 随着场地土逐渐变软, 输入能量等效速度谱的分界点特征周期和平台段长度都不断变长。相同场地下不同的设计地震分组也呈现出相似的特点。输入能量等效速度谱能够更全面地反映地面运动的特点。

3) 提出了建立设计输入能量等效速度谱的地震分组参数 T_e 。该参数体现了场地类型、震级及断层距等对地面运动的影响, 因此反映了震级和震中距等地震环境对输入能量等效速度谱的影响。此参数虽与场地特征周期有较强的相关性, 但它与等效速度谱的相关性更强, 因此建议应用于等效速度谱的建立。

4) 根据提出的分组参数对选择的地面运动进行分组后, 建立了多段式设计输入能量等效速度谱, 给出了设计谱参数的建议值, 可以为采用能量设计方法进行工程设计提供参考。由于本文提出的总输入能量是基于当前抗震规范的进一步发展, 是与其相统一的, 可以作为结构设计的补充设计依据及地面运动输入选择时的筛选方法。作者建议, 结构设计按照两步设计: 首先依据现行抗震设计方法设计, 及传统的基于力的结构设计和基于位移的设计校核; 其次依据输入能量谱, 验证结构的耗能能力并予以必要设计修正。在地面运动输入选择方面, 采用二次筛选地震动记录方法: 首先基于加速度设计反应谱, 选择相应场地条件和相应设计地震分组下, 按照加速度峰值或加速度反应谱值选择地震动记录; 其次, 根据结构场地及地震分组下相应的输入能量谱值, 从第一步选择的地震动记录范围内筛选满足能量谱值要求的地震动记录, 作为结构校核使用。

参 考 文 献

- 程光煜, 叶列平. 2008. 弹塑性 SDOF 系统的地震输入能量谱[J]. 工程力学, 25(2): 28-39.
- 耿淑伟. 2005. 抗震规范中地震作用的规定[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所: 16-20.
- 胡聿贤(主编). 2001. GB18306-2001《中国地震动参数区划图》宣贯教材[M]. 北京: 中国标准出版社: 93-97.
- 吕红山, 赵凤新. 2007. 适用于中国场地分类的地震动反应谱放大系数[J]. 地震学报, 29(1): 67-76.
- 时振梁, 陈汉尧. 1995. 基岩地震反应谱随震级、距离的变化特征[J]. 地震工程与工程振动, 15(1): 14-17.
- 叶献国. 1998. 地震强度指标定义的客观评价[J]. 合肥工业大学学报, 21(6): 7-11.
- 翟长海, 谢礼立. 2006. 考虑设计地震分组的强度折减系数的研究[J]. 地震学报, 28(3): 284-294.
- 国家质量监督检验检疫总局, 中华人民共和国建设部. 2001. GB50011-2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社: 26-40.
- 周云, 乐登, 邓雪松. 2008. 设计用地震动总输入能量谱研究[J]. 工程抗震与加固改造, 30(5): 1-7.
- Akiyama H. 1985. *Earthquake Resistant Limit-state Design for Buildings*[M]. Tokyo: University of Tokyo Press, Japan: 11-32.
- Ambraseys N N, Douglas J, Sigbjornsson R, Berge-Thierry C, Suhadolc P, Costa G, Smit P M. 2004. Dissemination of European Strong-Motion Data, vol. 2, using Strong-Motion Datascape Navigator, CD ROM collection[M/CD]. Engineering and Physical Sciences Research Council, United Kingdom.
- Araya R, Saragoni S R. 1985. Earthquake accelerogram destructiveness potential factor[C]// Proceedings of the 8th World Conference on Earthquake Engineering. EERI, San Francisco: 835-842.
- Benavent C A, Pujades L G, Almansa F L. 2002. Design energy input spectra for moderate seismicity regions[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(5): 1151-1172.
- Chai Y H, Fajfar P. 2000. A procedure for estimation input energy spectra for seismic design[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 4(4): 539-561
- Decanini L D, Mollaioli F. 1998. Formulation of elastic earthquake input energy spectra[J]. *Earthquake Engineering*

- and Structural Dynamics, **27**(12): 1503–1522.
- Fajfar P, Vidic T. 1994. Consistent inelastic design spectra: hysteretic and input energy[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **23**(5): 523–537.
- Fajfar P, Vidic T, Fishinger M. 1989. Seismic demand in medium and long-period structures[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **18**(8): 1133–1144.
- Housner G W. 1956. Limit design of structures to resist earthquakes[C]//*Proceedings of the 1st World Conference on Earthquake Engineering*. Berkeley, California: 5.1–5.13.
- Kuwamura H, Galambos T V. 1989. Earthquake load for structural reliability[J]. *Journal of Structural Engineering*, **115**(6): 1446–1462.
- Manfredi G. 2001. Evaluation of seismic energy demand [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **30**(4): 485–499.
- Park Y J, Ang A S, Wen Y K. 1985. Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings[J]. *Journal of Structural Engineering*, **111**(4): 740–757.
- Riddell R, Garcia J E. 2001. Hysteretic energy spectrum and damage control[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **30**(12): 1791–1816.
- Surahman A. 2007. Earthquake-resistant structural design through energy demand and capacity[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **36**(14): 2099–2117.
- Trifunac, M D, Brady, A G. 1975. A study on the duration of earthquake strong motion[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **65**(3): 581–626.
- Tso W K, Zhu T J, Heidebrecht A C. 1992. Engineering implication of ground motion A/V ratio [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **11**(3): 133–144.
- Uang C M, Bertero V V. 1990. Evaluation of seismic energy in structures [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **19**(1): 77–90.