

云南永胜地震记录速度反应谱特性研究

孙 凯¹, 肖梅玲¹, 张菊辉², 刘守顺¹, 罗 贤¹

(1. 云南大学 建筑与规划学院, 昆明 650504; 2. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 利用云南省永胜县 Ms 6.0 级地震记录, 根据单自由度体系的运动方程用 Matlab 编程求解得到速度反应谱, 计算 V/PGV 并对该放大系数反应谱进行研究。随机挑选了 100 条周期为 6 s 的反应谱来研究, 并以反应谱峰值所处区间的不同分成两类。先根据传统方法大概判断反应谱的几个拐点并统计其坐标, 用三参数 Weibull 分布对所选取的每个拐点群进行 K-S 检验, 检验得到所选反应谱拐点是可接受的, 并求得反应谱各个拐点期望值。以几个拐点期望值为设计反应谱的分段点, 结合实测地震动反应谱曲线, 运用最小二乘法拟合得到四段式设计反应谱, 最后对设计反应谱与实际反应谱进行误差分析验证。

关键词: 速度反应谱; 设计反应谱; Weibull 分布; 特征拐点

中图分类号: P 315.9 **文献标志码:** A

Velocity Response Spectrum Characteristics of Yunnan Yongsheng Seismic Records

SUN Kai¹, XIAO Meiling¹, ZHANG Juhui², LIU Shoushun¹, LUO Xian¹

(1. School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming 650504, China; 2. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Used the seismic records collected in the magnitude 6.0 earthquake occurring in Yongsheng County, Yunnan Province, its velocity response spectrum was obtained by solving the motion equation of the single degree of freedom system with Matlab programming. The V/PGV was calculated and the coefficient response spectrum was analyzed. A series of 100 response spectrums, each 6 s period apart, were randomly selected for studying and divided into two categories according to the location peak of the response spectrums. By using the traditional method, several inflection points of the response spectrum were roughly judged and their coordinates were statistically calculated. K-S tests were performed on each selected inflection point group based on the method of three-parameter Weibull distribution. The test results for the selected reaction spectrum inflection point were acceptable, and the expected value of each inflection point was further obtained. Taking the expected value of several inflection points as the piecewise points of the design response spectrum, a four-step design response

收稿日期: 2018-06-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11461078)

第一作者: 孙 凯(1993-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 防灾减灾工程. E-mail: sunflyheart@163.com

通信作者: 肖梅玲(1968-), 女, 副教授. 研究方向: 地震工程及地震防护. E-mail: 515355100@qq.com

spectrum was proposed by using the least square fitting with the measured seismic response spectrum curve. The error analysis of the design response spectrum and the actual response spectrum verifies the correctness of the design response spectrum.

Keywords: *velocity response spectrum; design response spectrum; Weibull distribution; characteristic inflection point*

1959 年, Housner^[1]给出了第一条设计反应谱, 关于反应谱理论的研究逐渐发展, 目前世界上很多国家用反应谱理论来进行结构设计。我国抗震设计规范^[2]中用反应谱理论来确定地震作用, 但不同地区收集到的地震记录有很大区别, 这说明不同地区的工程地质环境有很大差异^[3-4]。因此, 如果按照目前抗震规范提出的反应谱进行设计会对工程结构物的抗震设计造成影响。Mohraz^[5]研究发现场地对反应谱的形状有较明显的影响, 且反应谱的中长周期段在软弱场地上会出现显著的放大效应。有学者提出^[6-7]目前设计谱中出现的这些问题要通过研究不同地震动反应谱的统一性才能有望取得较好的结果。肖梅玲等^[8]通过对澜沧—耿马地震记录分析发现, 该地区反应谱的拐点周期与抗震规范使用的拐点周期有很大的差别。周云等^[9]提出了考虑地震动三要素和结构阻尼的三段式简化能量谱, 但所涉及的参数确定较复杂, 不便于工程应用。赵培培等^[10-11]通过提出的差分进化算法对川滇甘陕地区的强震记录进行设计反应谱特性研究, 但该算法对于标定的参数取值存在局限性。陈清军等^[12]采用美国场地的地震记录对线弹性单自由度系统进行分析得到了三段式的简化能量谱。但这些研究所用的地震记录没有针对云南的场地, 且反应谱形式及参数确定较复杂, 不便使用。

本文根据永胜地震动记录, 利用三参数 Weibull 分布对反应谱的拐点进行统计分析, 根据得到的拐点期望值进行设计反应谱的研究, 提出了四段式的设计反应谱公式, 即第一段为直线上升段, 第二段为极大平稳段, 第三段为指数衰减段, 第四段为极小平稳段, 最后与实际地震动反应谱进行误差分析以验证模型。

2001 年 10 月 27 日云南永胜县 (100°34'E, 26°14'N) 发生震级为 Ms 6.0, 震源深度为 15 km 的地震。本文收集 100 条该次地震的余震记录, 主要余震深度范围为 5~9 km, 地震记录收集地区上部覆盖层平均厚度大于 40 m。

1 实际速度反应谱分析

1.1 速度反应谱

通过求解线弹性单自由度体系运动方程可得到其相对速度反应^[4]:

$$\dot{x}(t) = - \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \cos \omega_d(t-\tau) d\tau + \frac{\xi\omega}{\omega_d} \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega_d(t-\tau) d\tau$$

(1)

式中: t 为持时; τ 为延时; ω 为体系自振角频率; ω_d 为有阻尼的体系自振角频率; ξ 为体系阻尼, 取 0.05; $\ddot{x}_g$ 是地面加速度; $\dot{x}(t)$ 是结构的相对速度。

速度反应谱为

$$V = |\dot{x}(t)|_{\max}$$

(2)

PGV 为地面运动的加速度峰值, 因此计算 V/PGV 可得设计反应谱, 本文选取的反应谱曲线周期为 6 s。

1.2 V/PGV 的特征点选取

本文把收集到的地震动记录分为两类, 分类标准是综合 V/PGV 谱值范围及 V/PGV 峰值对应周期范围两个指标, 分类情况如表 1 所示。

表 1 地震动反应谱分类情况
Tab.1 Classification of seismic response spectrums

类别	V/PGV 谱值	V/PGV 峰值对应周期/s	记录条数
第 I 类	(2.0, 3.6)	(1.0, 1.5)	50
第 II 类	(1.5, 2.5)	(0.5, 1.0)	50

本文取第 I 类、第 II 类地震动记录的反应谱各 50 条, 分别对统计到的第 I、第 II 类反应谱进行拐点选取^[2], 第一、第二、第三及第四拐点选取如图 1 所示, 此处从两类反应谱中随机各挑选一条反应谱进行拐点选取示意。

第一拐点为直线上升段与极大平稳段交接处, 第二拐点为极大平稳段与指数衰减段的交接处, 第三拐点为指数衰减段与极小平稳段交接处, 第四拐点为极小平稳段至 6 s 周期处。对两类反应谱曲线上的 4 个拐点群分别进行统计得到特征拐点分布图。

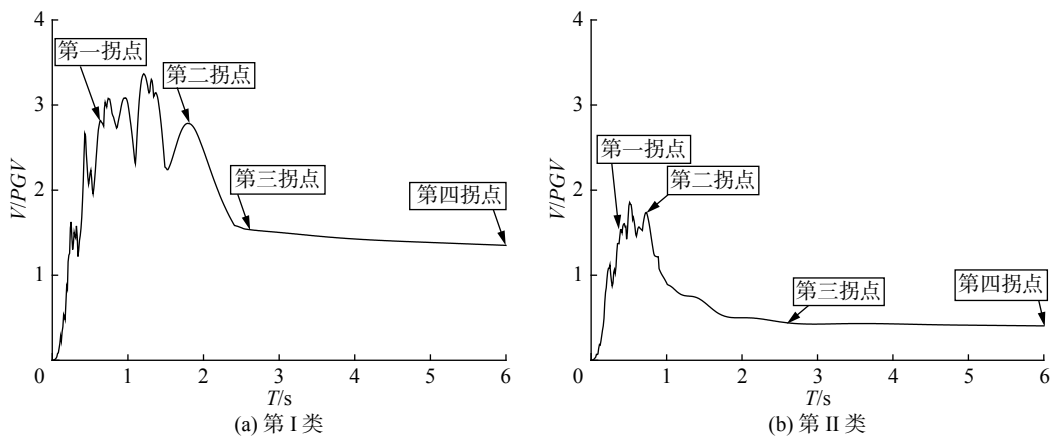


图 1 拐点选取示意图
Fig.1 Selection of inflection points

1.3 VIPGV 拐点统计

根据文献[13]建议的三参数 Weibull 分布，其函数表达式为

$$F(\theta) = 1 - e^{-(\frac{\theta - \mu}{\eta})^\beta} \tag{3}$$

式中： μ 为位置参数； η 为尺度参数； β 为形状参数； θ 表示任意特征拐点的横坐标(周期 T)或纵坐标(速度 V)。

式(3)中 3 个参数用概率权重矩估计法可得

$$\mu = \frac{4(M_{1,0,0}M_{1,0,3} - M_{1,0,1}^2)}{4M_{1,0,3} + M_{1,0,0} - 4M_{1,0,1}} \tag{4}$$

$$\eta = \frac{M_{1,0,0} - \mu}{\Gamma\left[\ln\left(\frac{M_{1,0,0} - 2M_{1,0,1}}{M_{1,0,1} - 2M_{1,0,3}}\right)/\ln 2\right]} \tag{5}$$

$$\beta = \frac{\ln 2}{\ln\left[\frac{M_{1,0,0} - 2M_{1,0,1}}{2(M_{1,0,1} - 2M_{1,0,3})}\right]} \tag{6}$$

式中， $M_{1,0,0}$ ， $M_{1,0,1}$ 及 $M_{1,0,3}$ 为每个拐点群的概率权重矩，这 3 个概率权重矩可由以下公式求得：

$$M_{1,0,0} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i \tag{7}$$

$$M_{1,0,1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i \left(1 - \frac{i - 0.35}{n}\right) \tag{8}$$

$$M_{1,0,3} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i \left(1 - \frac{i - 0.35}{n}\right)^3 \tag{9}$$

由 K-S 检验可以查出显著水平 α 上的临界值 D_n^α ，其中 D_n 是统计参数的检验统计量，若 $D_n < D_n^\alpha$ ，则所拟合的 Weibull 分布函数可接受。

2 VIPGV 谱拐点特征

2.1 第 I 类反应谱拐点

把 50 条第 I 类反应谱的第一、第二、第三及

第四拐点分别取出，可以得到 4 个特征拐点群的分布图，如图 2 所示。

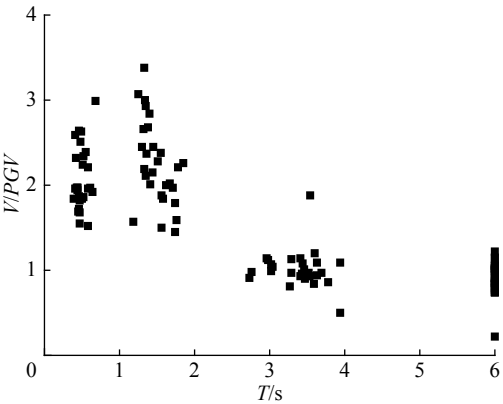


图 2 第 I 类反应谱特征拐点群的分布
Fig.2 Distribution of characteristic inflection point groups in the first kind of response spectrums

根据图 2 可以得到第 I 类反应谱各拐点的分布情况如表 2 所示，可以看出第一、第二及第四拐点的周期值较集中，分别集中于 0.5，1.5，6 s，而三者 V/PGV 谱值较分散。第三拐点的周期值较分散而其 V/PGV 谱值集中于 1.0。

可知当结构周期小于 T_1 时，在地震作用下结构产生的放大反应随结构周期的增加而增大；地震作用对自振周期处于 (T_1, T_2) 的结构影响稳定，该区间段的结构放大效应相同；地震对自振周期处于 (T_2, T_3) 结构影响较大；由 $(T_3, 6\text{ s})$ 段的分布情况可知，自振周期处于该区间的长周期结构在震动的作用下放大反应较弱。

用三参数 Weibull 分布来分析所选取拐点的横坐标、纵坐标是否可接受，并求其期望。由表 3 可得反应谱拐点符合三参数 Weibull 分布，则第 I 类设计反应谱的 4 个拐点坐标分别为 $[0.477\text{ s}, 1.81]$ ， $[1.495\text{ s}, 2.02]$ ， $[3.388\text{ s}, 0.99]$ ， $[6\text{ s}, 0.91]$ 。

表 2 第 I 类实际反应谱拐点分布情况

Tab.2 Distribution of inflection points of the first kind of actual response spectrums

第一拐点		第二拐点		第三拐点		第四拐点	
T_1/s	V/PGV	T_2/s	V/PGV	T_3/s	V/PGV	T_4/s	V/PGV
(0.35, 0.65)	(1.5, 2.8)	(1.25, 2.05)	(1.5, 3.5)	(2.6, 4.1)	(0.5, 1.25)	6	(0.75, 1.25)

表 3 第 I 类设计反应谱拐点坐标分析

Tab.3 Inflection point coordinate analysis of the first kind of design response spectrums

拐点	拐点坐标	μ	η	β	$E(\theta)$	D_n	$D_n^{0.05}$	K-S 检验
第一拐点	T	0.315	1.312	1.863	0.477	0.153	0.189	接受
	V/PGV	2.410	1.115	2.778	1.810	0.032		接受
第二拐点	T	1.206	1.062	0.912	1.495	0.132		接受
	V/PGV	1.350	0.848	0.621	2.020	0.045		接受
第三拐点	T	2.093	2.681	0.978	3.388	0.163		接受
	V/PGV	0.560	1.043	1.641	0.990	0.067		接受
第四拐点	T	—	—	—	6	—		—
	V/PGV	0.440	1.041	0.665	0.910	0.175		接受

2.2 第 II 类 V/PGV 反应谱拐点

把 50 条第 II 类反应谱的各个拐点群分别取出，得到 4 个特征拐点群分布图，如图 3 所示。

根据图 3 可得第 II 类反应谱各拐点的分布情况如表 4 所示，也可以看出第一、第二及第四拐点的周期值较集中，分别集中于 0.4, 1.1, 6 s，而三者 V/PGV 谱值较分散。第三拐点的周期值较分散，而其 V/PGV 谱值集中于 0.6。

同样可得第 II 类反应谱的特征趋势与第 I 类反应谱的趋势相同，下面用三参数 Weibull 分布来分析所选取拐点的横坐标、纵坐标是否可接受，并求其期望。由表 5 可得第 II 类设计反应谱的 4 个拐点坐标为[0.407 s, 1.49], [1.073 s, 1.48], [2.406 s, 0.68], [6 s, 0.62]。

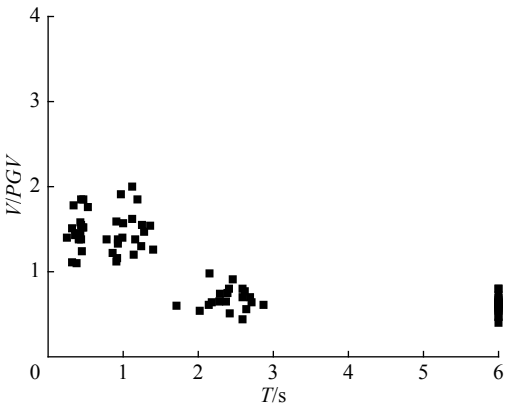


图 3 第 II 类反应谱各个拐点的分布

Fig. 3 Distribution of inflection points of the second kind of response spectrums

表 4 第 II 类实际反应谱拐点分布情况

Tab.4 Distribution of inflection points of the second kind of actual response spectrums

第一拐点		第二拐点		第三拐点		第四拐点	
T_1/s	V/PGV	T_2/s	V/PGV	T_3/s	V/PGV	T_4/s	V/PGV
(0.25, 0.51)	(1.1, 2.1)	(0.7, 1.4)	(1.2, 2.1)	(1.7, 2.8)	(0.4, 0.8)	6	(0.4, 0.7)

表 5 第 II 类设计反应谱拐点坐标分析

Tab.5 Inflection point coordinate analysis of the second kind of design response spectrums

拐点群	拐点坐标	μ	η	β	$E(\theta)$	D_n	$D_n^{0.05}$	K-S 检验
第一拐点	T	0.165	1.382	3.421	0.407	0.161	0.189	接受
	V/PGV	1.260	0.569	2.915	1.490	0.022		接受
第二拐点	T	0.983	1.651	3.786	1.073	0.113		接受
	V/PGV	1.210	0.506	3.516	1.480	0.021		接受
第三拐点	T	1.724	1.223	4.356	2.406	0.184		接受
	V/PGV	0.250	0.702	3.065	0.680	0.024		接受
第四拐点	T	—	—	—	6	—		—
	V/PGV	0.250	1.207	3.425	0.620	0.163		接受

3 设计反应谱研究

3.1 设计反应谱拟合分析

根据第 I、第 II 类反应谱的拐点, 把反应谱分为

4 段(见图 4)。T₁ 为直线上升段拐点, T₂ 是平稳段拐点, T₃ 是曲线衰减段拐点。运用最小二乘法对第一、第二、第四区间段进行线性拟合, 对第三区间段进行指数衰减拟合, 得到本文建议的设计反应谱。

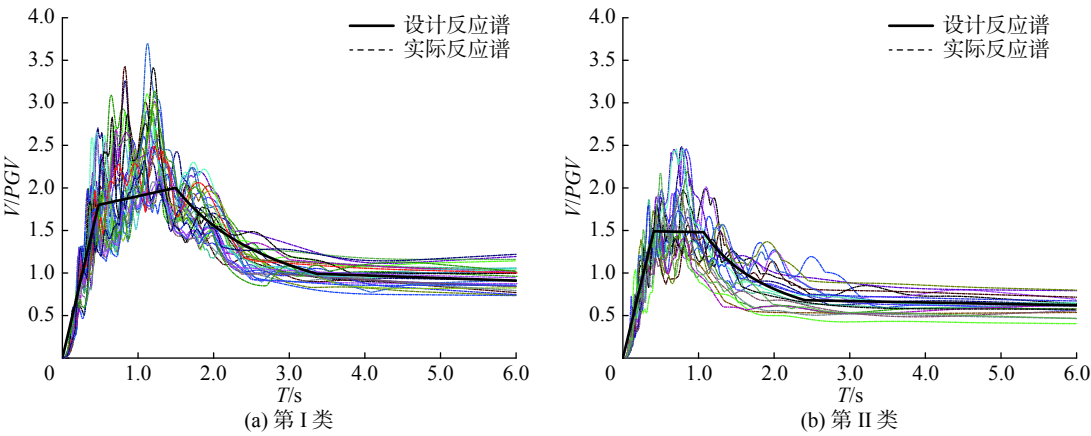


图 4 设计反应谱与实测地震动反应谱
Fig.4 Design and measured ground motion response spectrum

图 4 可以看出, 通过设计反应谱能较直观地得到不同周期结构对应的放大效应。图 4(a)中的极大平稳段是一条斜率不为 0 的线段, 即第二个特征拐点周期对应的反应较第一特征拐点周期对应的 V/PGV 值较大, 说明在地震记录样本获取地区, 结构自振频率与场地卓越周期相近时结构反

应最大。图 4(b)中极大平稳段的直线段通过分析还是一条水平段。本文建议的设计谱研究方法, 不同于以往反应谱研究方法的是反应谱中最大的平台段不一定为水平直线段, 可以根据各地区实际地震动记录来确定最大平台段的斜率。

本文提出的速度设计反应谱为

$$V/PGV = \begin{cases} \frac{T}{T_1} \left(\frac{V}{PGV} \right)_{\max,1}, & 0 < T \leq T_1 \\ \frac{T-T_1}{T_2-T_1} \left(\frac{V}{PGV} \right)_{\max,2} - \frac{T-T_2}{T_2-T_1} \left(\frac{V}{PGV} \right)_{\max,1}, & T_1 < T \leq T_2 \\ \left(\frac{T_2}{T} \right)^\alpha \left(\frac{V}{PGV} \right)_{\max,2}, & T_2 < T \leq T_3 \\ \frac{T-T_3}{5-T_3} \left(\frac{V}{PGV} \right)_{\min,4} - \frac{T-5}{5-T_3} \left(\frac{V}{PGV} \right)_{\min,3}, & T_3 < T \leq 5 \end{cases} \quad (10)$$

式中: V/PGV 为任意周期下由设计反应谱得到的放大系数值; $\left(\frac{V}{PGV}\right)_{\max,1}$ 是直线上升段拐点值; $\left(\frac{V}{PGV}\right)_{\max,2}$ 是极大平稳段拐点值; $\left(\frac{V}{PGV}\right)_{\min,3}$ 是曲线衰减段拐点值; $\left(\frac{V}{PGV}\right)_{\min,4}$ 是极小平稳段结束点

(即周期为 6 s 处的点)的反应谱值; α 是衰减段的衰减指数。

设计反应谱表达式中的相关参数取值见表 6。

3.2 设计反应谱的误差分析

本文对两类设计反应谱与实际地震动反应谱

表 6 设计反应谱相关参数
Tab.6 Parameters of design response spectrums

类别	第一拐点		第二拐点		第三拐点		第四拐点		衰减系数 α
	T ₁	(V/PGV) _{max,1}	T ₂	(V/PGV) _{max,2}	T ₃	(V/PGV) _{min,3}	T ₄	(V/PGV) _{min,4}	
第 I 类	0.477	1.81	1.495	2.02	3.388	0.99	6	0.91	0.87
第 II 类	0.407	1.49	1.073	1.48	2.406	0.68	6	0.62	0.96

进行误差分析,采用拟合优度(R^2)及均方根误差(RMSE)来比较。

从图5可得:在第一区间段 $[0, T_1)$ 之间,两类场地的设计反应谱拟合优度呈上升趋势,均方根误差呈下降趋势,波动较小;在第二区间段 $[T_1, T_2)$ 及在第三区间段 $[T_2, T_3)$ 之间,拟合优度呈上升趋势,均方根误差呈下降趋势,波动较大;在第四区间段 $[T_3, 6\text{ s})$ 之间,拟合优度基本呈平稳趋势,两者均方根误差基本也呈平稳趋势。

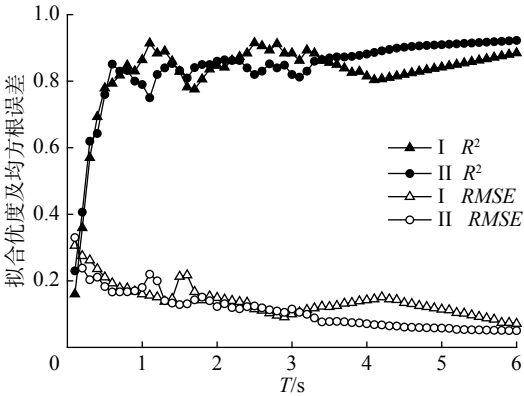


图5 第 I, II 类设计反应谱误差分析

Fig.5 Error analysis of the first and second kind of design response spectra

第 I 类设计反应谱在 1.5 s,即在特征周期 T_2 处,拟合优度为 0.78,均方根误差为 0.25;第 II 类设计反应谱在 1.0 s,即在特征周期 T_2 处,拟合优度为 0.75,均方根误差为 0.28。由上可知,第 I 类、第 II 类设计反应谱在 1.5, 1.0 s 处的拟合优度均较小而均方根误差较大,说明两类反应谱在对应周期段上的反应谱随机性较强。

通过本文提供的研究方法对云南永胜地区的地震动记录进行分析,得到了适用于该地区且较为可靠的设计反应谱。

4 结 论

地震动存在随机性,本文建议的设计反应谱模型通过统计的方法,找到反应谱特征拐点来研究速度设计反应谱。通过对反应谱拐点分布的研究得到该类地震动的特点,并运用最小二乘法对设计反应谱分段进行拟合得到建议的设计反应

谱。本文研究得到以下结论:

- a. 实际地震动反应谱曲线中的几个特征拐点符合三参数 Weibull 分布;
- b. 该地区地震动对长周期结构的影响较小,且当结构周期大于一定值以后地震动对结构的影响变化不大;
- c. 本文提出的设计反应谱曲线分为 4 段,分别是直线上升段、极大平稳段、曲线衰减段和极小平稳段,且极大平稳段与极小平稳段不再受限于必须是水平段,根据各地区实际地震记录利用本文方法可以得到更合理的设计反应谱。

参考文献:

[1] HOUSNER G W. Behavior of structures during earthquakes[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1959, 85(4): 109-130.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011-2010 建筑抗震设计规范 (2016 年版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

[3] 徐龙军, 谢礼立, 胡进军. 抗震设计谱的发展及相关问题综述[J]. 世界地震工程, 2007, 23(2): 46-57.

[4] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 2 版. 北京: 地震出版社, 2006.

[5] MOHRRAZ B. A study of earthquake response spectra for different geological conditions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1976, 66(3): 915-935.

[6] 杜永峰, 徐天妮, 王亚楠, 等. 近断层地震动作用下设计速度反应谱研究[J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 997-1002, 1013.

[7] 王亚楠, 李慧, 杜永峰, 等. 近场脉冲型地震动作用下设计位移反应谱[J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2015, 46(4): 1511-1517.

[8] 肖梅玲, 潘文, 叶燎原. 云南地震动反应谱特性 $V_{\max}/a_{\max}$ 值的研究[J]. 地震研究, 1999, 22(1): 89-95.

[9] 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.

[10] 赵培培. 设计反应谱拟合方法研究及特征参数统计[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2017.

[11] 赵培培, 王振宇, 薄景山. 利用差分进化算法标定设计反应谱[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(5): 45-50.

[12] 陈清军, 袁伟泽. 基于长周期地震动记录的 SDOF 体系能量谱探讨[J]. 振动与冲击, 2013, 32(10): 36-42, 54.

[13] 郑锐. 三参数威布尔分布参数估计及在可靠性分析中的应用[J]. 振动与冲击, 2015, 34(5): 78-81.

(编辑: 丁红艺)