

基于能量分布的地震动聚类与 反应谱特征周期的确定

丁艳琼¹, 李 杰^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 收集了 7 778 条水平地震动加速度记录, 分析了其频谱特性. 提出了一类基于能量分布的地震动聚类方法. 按照该方法将同一类场地条件下的地震动记录分为 3 组. 按照我国建筑抗震设计规范关于设计地震动的分类方式, 确立了不同分组特征周期的建议值, 分析了建议值与我国抗震设计规范规定的不同设计地震动分组特征周期的差异. 研究表明, 与文中建议值相比, 现行规范规定的设计地震动特征周期第 1 组、第 2 组取值偏大, 第 3 组取值偏小.

关键词: 特征周期; 地震动分组; 能量集中频段; 聚类分析
中图分类号: P315.9 **文献标志码:** A

Ground Motion Clustering Method Based on Energy Distribution and Determination of Characteristic Periods

DING Yanqiong¹, LI Jie^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Seven thousand seven hundred and seventy eight ground motion records were collected. For each group of seismic ground motion, the spectral characteristics were analyzed. A type of ground motion clustering method based on energy distribution was introduced. According to this method, the records belonging to the same site type can be divided into three parts. For each group of seismic ground motion, the characteristic periods were proposed based on the Chinese seismic resistance code. Besides, the differences between the proposed value and the code value were analyzed. The research shows that, compared with the proposed values, the code characteristic periods of group 1 and group 2 are bigger, while the values of group 3 are smaller.

Key words: characteristic period; ground motion; energy concentration; cluster analysis

输入地震动的频谱特性是影响结构动力响应的重要因素. 当地震动主要频率成分与结构频率接近时, 结构的动力响应加强, 受力增大^[1-2]. 因此, 合理描述地震动的频谱特性至关重要. 反应谱是描述地震动频谱特性的重要工具, 在各国规范中被广泛采用, 相关研究较多^[3-4]. 规范反应谱, 是基于对大量地震动的综合认识所做出的对结构地震力的一种规定^[5]. 一般认为, 规范反应谱的特征周期是反应谱平台段的终止周期, 其确定方法有多种. 在美国加州结构工程师协会应用技术委员会发布的成果报告 ATC3-06 中, 基于有效峰值速度与有效峰值加速度的比值给出了计算特征周期的方法^[6]. 基于日本阪神地震记录, Fukushima 等^[7]也建议了特征周期的计算方法. 我国 2002 年出版的《建筑抗震设计手册》指出, 特征周期可以取为加速度反应谱中动力放大系数峰值对应的周期值^[8]. 我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)(以下简称《抗规》)则取反应谱平台段的终点定义特征周期, 并按照场地类别和设计地震分组的不同, 给出了不同的特征周期值. 在这一规定中, 除了考虑场地条件对特征周期的影响外, 还综合考虑了震级、传播途径、传播距离等因素的影响, 其实质是考虑地震动频谱特性的差异^[9], 其依据是《中国地震动参数区划图 2001》给出的反应谱特征周期区划图和场地地震动反应谱特征周期调整表. 这一反应谱特征周期区划图和调整表的数据基础主要来自美国 NGA (Next Generation Attenuation Relationships) 数据库的 268 条强震记

收稿日期: 2017-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(51538010)

第一作者: 丁艳琼(1989—), 女, 博士生, 主要研究方向为工程地震动荷载建模. E-mail: 89dingyq@tongji.edu.cn

通讯作者: 李 杰(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为混凝土结构, 工程抗震, 随机动力系统, 生命线工程.
E-mail: lijie@tongji.edu.cn

录^[10]. 对于Ⅳ类场地、3 个抗震设计分组来说, 268 条地震动数据显然偏少.

求取各设计地震分组的特征周期值, 必然涉及到地震动记录分类的问题. 现有的地震动分类方法, 基本上是根据地震动的影响因素(如场地条件、震级、距离、特征周期等)进行分类. 例如: Seed 等^[11]提出了地震动的规范反应谱形状分类法, Nakamura^[12]依据地震动在水平向与竖直向傅里叶幅值谱的比值, 提出了傅里叶谱比分类法(HVSR). 仔细研究不难发现, 这些分类所依据地震动记录有限, 场地信息往往不清晰, 由此导致分类之后, 不同类别的地震动仍然会表现出明显的频谱差异.

本文收集整理了 7 778 条水平地震动加速度记录, 依据地震动的幅值谱特性和聚类分析理论, 提出了一类基于能量分布的地震动聚类方法. 按照该方法将每类场地上的地震动记录聚为 3 组, 将每组地震动记录的加速度反应谱均值与规范反应谱对比, 给出了反应谱特征周期的建议值.

1 基于幅值谱的地震动聚类方法

1.1 聚类依据

地震动的频谱特性综合反映了震源机制、传播途径和场地条件等多种因素的影响. 以地震动频谱作为地震动分类标准, 可以更本质地反映地震动特性. 从地震动的频谱特性出发, 本文提出了一类地震动聚类方法.

地震动的 Fourier 幅值谱可表达为

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

式中: $f(t)$ 的能量谱密度为

$$\Phi(f) = \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i2\pi ft} dt \right|^2 = \frac{F(f)F^*(f)}{2\pi} \quad (2)$$

式中: $F^*(f)$ 是 $F(f)$ 的共轭函数.

对应式(2)的离散能量谱密度为

$$\Phi(f_k) = \frac{F^2(f_k)}{2\pi} \quad (3)$$

式中: $F(f_k)$ 是 $f(t)$ 的离散 Fourier 变换.

虽然地震动所含频率成分丰富, 但是能量却主要集中在某一频段. 能量的集中频段是地震动频谱特性的主要标识因素(图 1).

本文将能量集中频段定义为 85% 能量的集中区段. 即, 设地震动的频率范围是 $[0, f_{\max}]$, 取频率区间 $[f_m, f_n] \in [0, f_{\max}]$, 地震动在区间 $[f_m, f_n]$ 的能量

占总能量的比值为 η , 则有

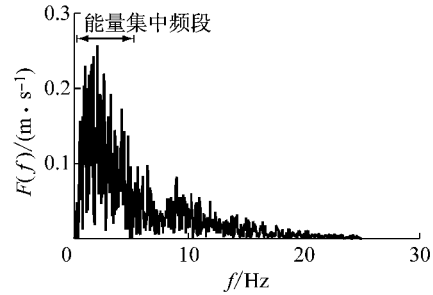


图 1 Fourier 幅值谱表示的能量集中情况

Fig. 1 Energy concentration due to the Fourier amplitude spectrum

$$\sum_{i=m}^n \Phi(f_i) \cdot \Delta f = \eta \sum_{i=1}^N \Phi(f_i) \cdot \Delta f \quad (4)$$

按照式(4), 对于给定的 η 值, 并不能唯一确定 f_n 与 f_m . 为此, 加入补充条件

$$f_n - f_m \rightarrow \min \quad (5)$$

研究发现, 当 η 取值过高时, 能量集中频段均较宽, 难以区分; η 取值过低时, 能量集中频段过窄, 对地震动的频谱特性描述不充分. 经过多次试验, 本文中 η 取值为 0.85.

1.2 K 均值聚类方法

聚类(clustering)是按照某个特定标准(一般为距离准则)把一个数据集分割成不同的类或簇(cluster), 使得类内相似性尽可能大, 同时类间的差异性也尽可能大^[13]. K 均值聚类法又称快速聚类法, 是由 MacQueen^[14]于 1967 年提出并命名的一种聚类方法. 这类方法采用距离作为相似性度量, 依据不同的数据性质, 可以选用欧氏距离、平方欧式距离、绝对值距离等. 对于量纲相同、数值变化范围不大的二维参数, 一般采用平方欧式距离.

本文将地震动能量集中频段的起始频率(f_m)和终止频率(f_n)作为地震动聚类的依据. 设 $(f_{m1}, f_{n1}), (f_{m2}, f_{n2}), \dots, (f_{mN}, f_{nN})$ 为 N 条地震动记录样本的起始频率和截止频率, 则样本间的平方欧式距离为

$$d_{ij} = (f_{mi} - f_{mj})^2 + (f_{ni} - f_{nj})^2 \quad (6)$$

K 均值聚类的算法流程如图 2 所示, 详细步骤介绍如下^[13,15]:

(1) 随机选择 3 个初始凝聚点 $(f_{mi}, f_{ni}), (f_{mj}, f_{nj}), (f_{mk}, f_{nk})$, 这 3 个凝聚点分别属于 3 个初始类.

(2) 对除凝聚点之外的所有样本逐个归类. 将每个样本归入与它平方欧式距离最小的凝聚点所在的类, 直至所有样本都归类, 初始分类完成.

(3) 以 3 个初始分类样本点的均值作为新的样

本凝聚点,将每个样本重新归类.当有新样本归入某一类时,将该类的凝聚点更新为这一类当前样本的均值.

(4) 重复步骤(3),直至每个样本的类别都不再发生变化,得到最终分类.

本文直接调用 Matlab 软件的 kmeans 命令实现地震动 K 均值聚类分组.

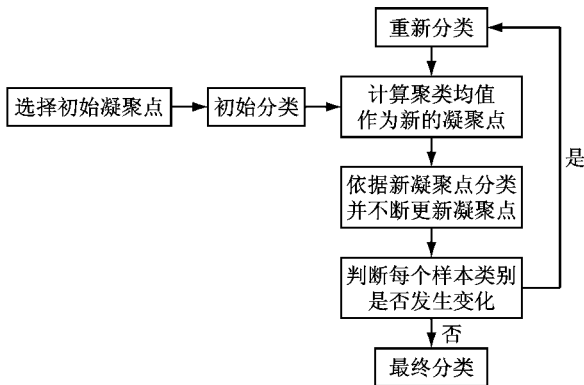


图 2 K 均值聚类法流程图
Fig. 2 Flowchart of K-means cluster

2 聚类方法的应用

2.1 地震动数据

本文收集了 156 次地震的共计 7 778 条地震动水平加速度记录,这些数据均来自太平洋地震工程研究中心 (Pacific Earthquake Engineering Center, Peer) 的 NGAWest2 强震数据库.震级范围为 4.2~7.7(图 3a),震中距范围为 0.44~675.91 km(图 3b),地下 30 m 剪切波速 v_{s30} 范围为 89.3~2 100.0 $m \cdot s^{-1}$ (图 3c).可见,所选数据的震级、震中距和剪切波速跨度范围很广,能充分体现各因素对地震动频谱特性的影响.

参考郭锋等^[16]的工作,首先按照我国建筑抗震设计规范的标准对各记录地震动进行场地划分.经过仔细甄别,划分给出 I 类场地 1 340 条、II 类场地 5 156 条、III 类场地 1 074 条、IV 类场地 208 条地震动记录.计算各记录地震动的反应谱,并将各类场地条件下地震动记录反应谱的均值与《抗规》中的设计反应谱进行对比,如图 4 所示.计算中,阻尼比均取为 5%.因为《抗规》中第 2 抗震设计分组所对应的特征周期值介于第 1 组和第 2 组之间,所以认为第 2 组特征周期值更接近该类场地条件下地震动特征周期的平均值.故设计反应谱的特征周期取为《抗规》中各类场地条件下第 2 组所对应的特征周期值,设计

反应谱的峰值取为《抗规》所采用的动力放大系数值 2.25.为了将地震动记录的加速度反应谱均值与设计反应谱对比,在计算地震动记录反应谱之前将地震动加速度时程进行了量纲一化^[17].

由图 4 可见,本文所选用地震动数据库的反应谱特性与我国规范反应谱吻合良好,图中 $S_a(\omega)$ 为加速度反应谱.图 5 中对各类场地地震动加速度反应谱均值进行了对比,显示的结果与规范中各类场地反应谱均值在周期为 6 s 左右交于一点的规律相吻合.因此可以认为,本文选用的地震动数据库充分考虑了地震动数据的场地条件、震级、距离和频谱特性,与《抗规》采用的设计反应谱吻合度较高.

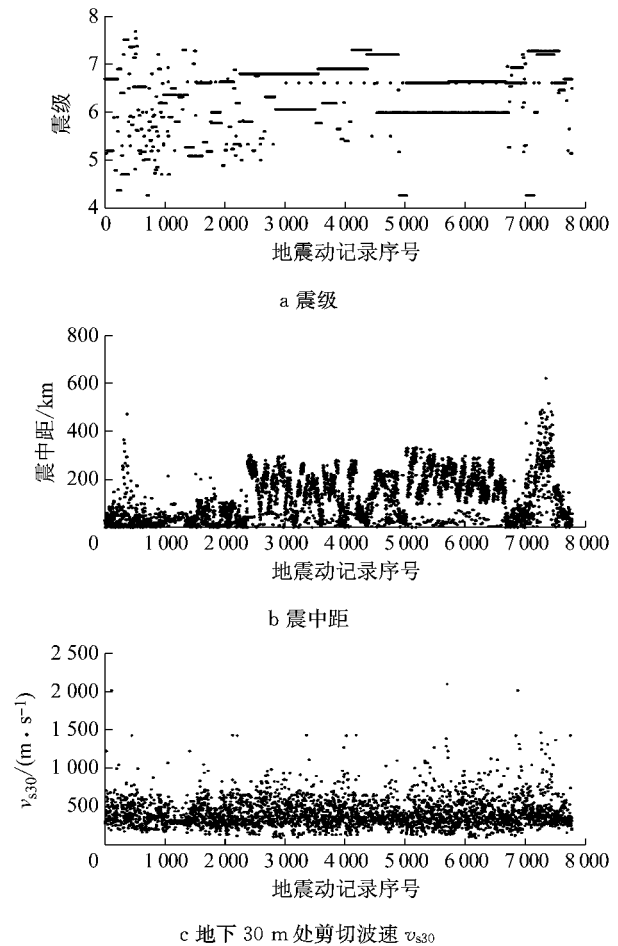


图 3 地震动基本信息
Fig. 3 Basic information of ground motions

2.2 聚类方法分组结果

按照场地条件对地震动进行分类具有一定的合理性.但是,该分类方法却完全忽略了震级和距离对地震动频谱特性的影响.为了改进这一点,我国规范中提出了抗震设计分组的概念.但是,分组的依据却相对模糊.

按照式(4)和式(5)计算所有地震动记录的能量

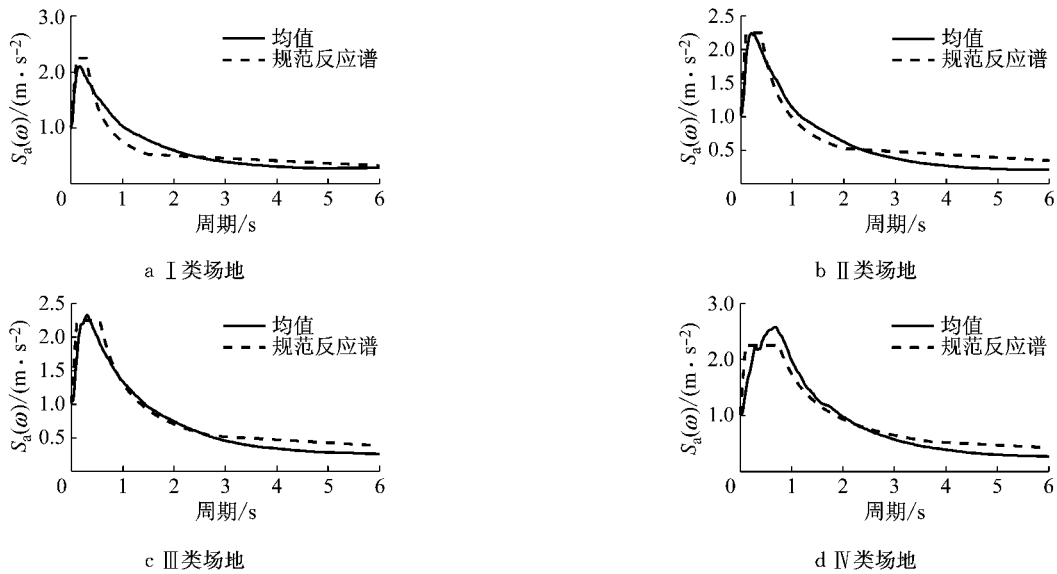


图 4 地震动记录加速度反应谱均值与规范反应谱对比

Fig. 4 Comparison of acceleration response spectra mean value of records and the code spectrum

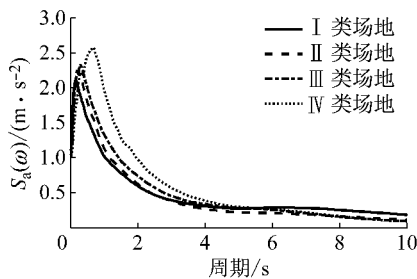


图 5 各场地地震动记录加速度反应谱均值

Fig. 5 Acceleration response spectra mean value for different sites

集中频段,取其起始频率和终止频率值作为聚类变量,将上述 4 类场地上的地震动记录分别聚类为 3 组.各地震动分组的情况如表 1 所示,参数分布情况如图 6 所示.从图 6 可见,对于相同场地,聚类分组不同、能量集中频段差异明显:从第 1 组到第 3 组,频段越来越宽,地震动的高频成分逐渐增多,长周期成分减少;对相同分组,从 I 类场地到 IV 类场地,能量集中频段越来越窄,高频成分逐渐减少,长周期成分增多.因此,通过聚类分组得到的结果符合地震动频谱的一般特性,即随着场地变软,地震动的高频成

表 1 聚类方法分组结果

Tab. 1 Grouping result based on clustering method

聚类分组	地震动水平加速度记录/条			
	I 类场地	II 类场地	III 类场地	IV 类场地
1	250	449	144	27
2	467	2 132	434	72
3	623	2 575	496	109
合计	1 340	5 156	1 074	208

分减少,长周期成分增多.

3 设计地震动特征周期的确定

在对地震动进行聚类分组后,可以通过统计各类场地条件下每一组地震动记录加速度反应谱的均值,以规范设计地震动反应谱表达式为基础,拟合确定特征周期 T_g 的建议值.结果如表 2 和图 7 所示.分析表 2 可知,本文方法给出的不同分组的特征周期值满足如下基本规律:从 I 类场地到 IV 类场地,特征周期值逐渐增大;从第 1 组到第 3 组,特征周期值逐渐增大.

表 2 聚类方法特征周期建议值

Tab. 2 Suggested value of characteristic periods obtained from clustering method

聚类分组	特征周期/s			
	I 类场地	II 类场地	III 类场地	IV 类场地
1	0.15	0.20	0.25	0.45
2	0.25	0.30	0.40	0.75
3	0.65	0.75	0.85	1.10

作为对比,表 3 给出了我国建筑结构抗震设计规范给出的不同抗震设计分组的反应谱特征周期值.可见,与规范结果相比,本文结果分类特征更为显著,各分组地震动的特征周期差异更加明显.与本文建议值相比较,规范第 1 组、第 2 组特征周期偏大,而第 3 组特征周期值偏小.事实上,由于本文分析依据的地震动记录广泛,表 2 的结果可作为现行抗震设计规范进一步修订时的参考.

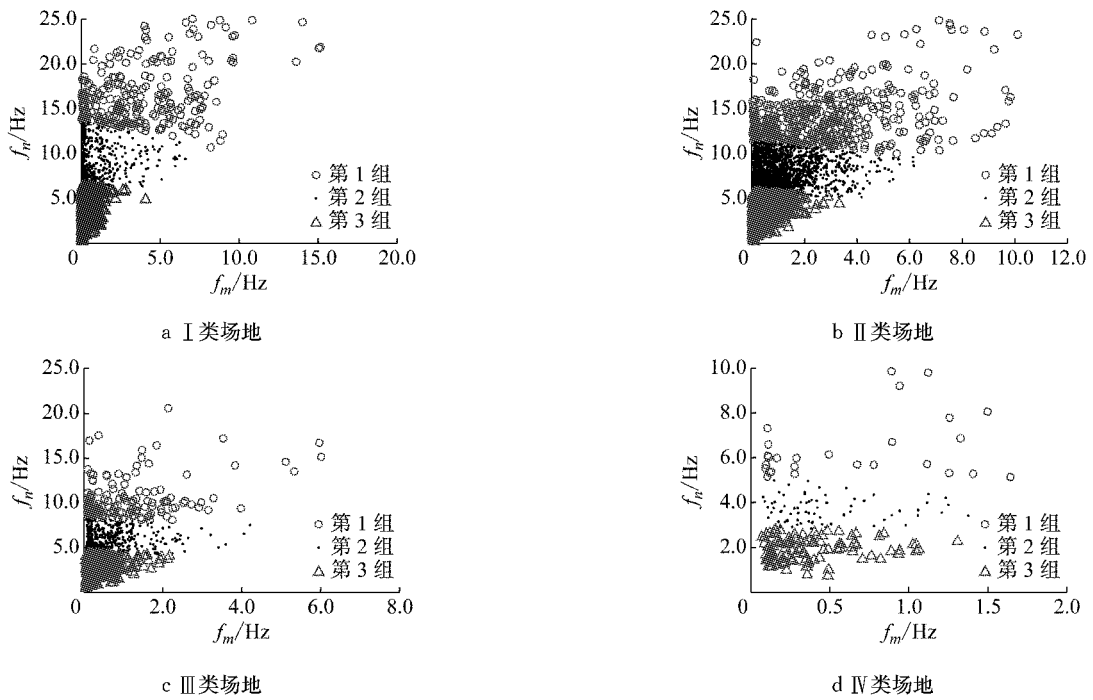


图 6 聚类方法分组结果

Fig. 6 Grouping result based on clustering method

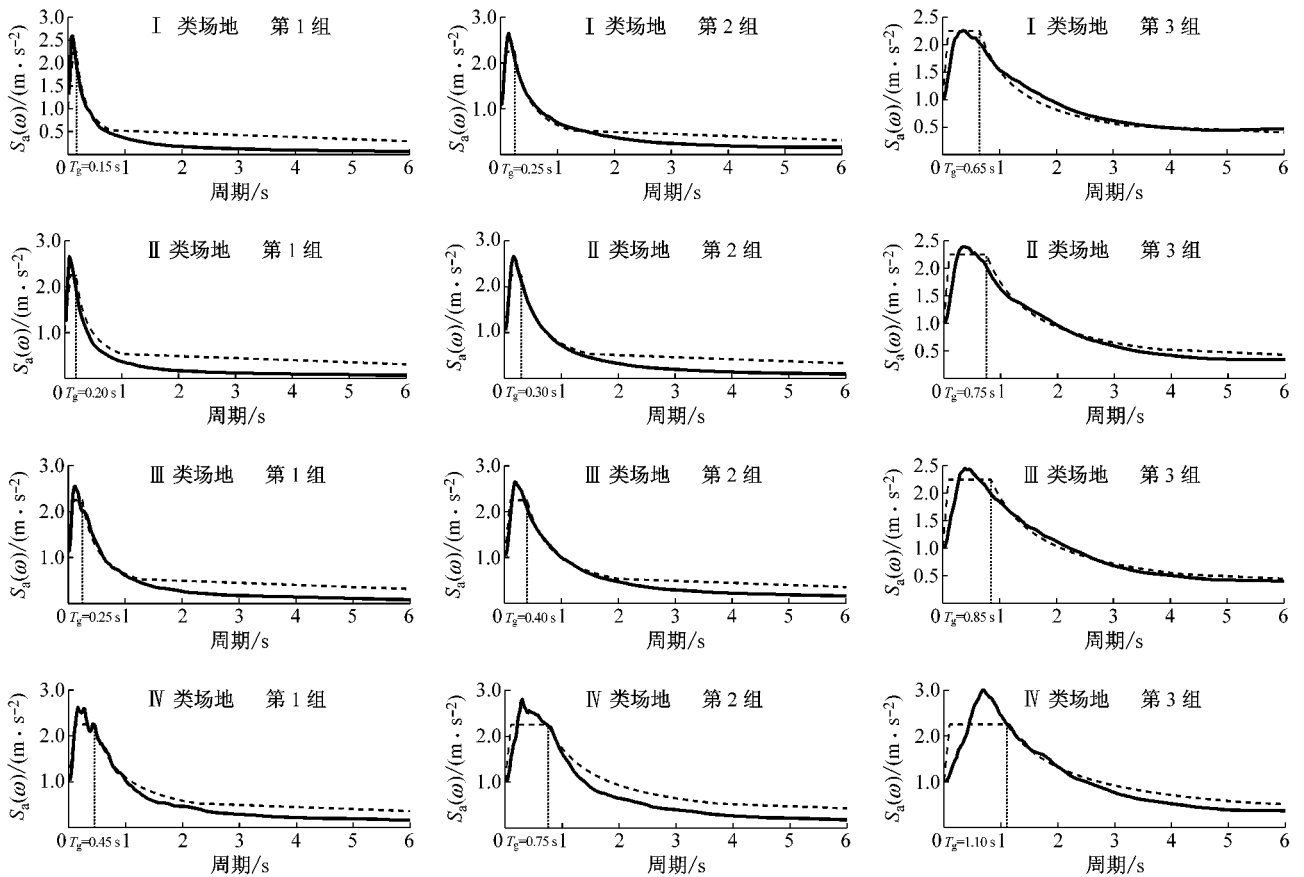


图 7 特征周期值的确定

Fig. 7 Determination of characteristic periods

表 3 《抗规》(GB 50011—2010)特征周期值

Tab. 3 Value of characteristic periods in the code

抗震设计 分组	特征周期/s				
	I ₀ 类场地	I ₁ 类场地	II类场地	III类场地	IV类场地
1	0.20	0.25	0.35	0.45	0.65
2	0.25	0.30	0.40	0.55	0.75
3	0.30	0.35	0.45	0.65	0.90

4 结论

(1) 设计反应谱特征周期值对设计反应谱取值有重要影响. 本文提出了基于能量的地震动 Fourier 谱聚类方法. 与基于单一周期参数的地震动分类方法相比, 本文方法能更全面地反映地震动的频谱特性.

(2) 设计反应谱是大量地震动记录反应谱的统计平均. 本文对于大量地震动数据进行了聚类分组, 以此为基础给出的特征周期建议值可供进一步修订我国抗震设计规范的参考.

参考文献:

- [1] KRAMER S L. Geotechnical earthquake engineering[M]. New York: Pearson Education, 1996.
- [2] CHOPRA A K. Dynamics of structures: theory and application to earthquake engineering [M]. 4th ed. Englewood Cliffs : Prentice Hall Inc , 2001.
- [3] 符圣聪, 江静贝, 黄世敏. 设计加速度谱的标定[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(5): 43.
FU Shengcong, JIANG Jingbei, HUANG Shimin. Calibration of design acceleration spectra[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 34(5): 43.
- [4] 徐龙军, 刘秀明, 于鹏, 等. 地震动谱分析中的统计概率问题研究[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(4): 1.
XU Longjun, LIU Xiuming, YU Peng, *et al.* On the statistical probability issues of ground motion spectral analysis[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 35(4): 1.
- [5] 李杰, 李国强. 地震工程学导论[M]. 北京: 地震出版社, 1992.
LI Jie, LI Guoqiang. Introduction to earthquake engineering [M]. Beijing : Seismological Press, 1992.
- [6] Applied Technology Council (ATC). Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings : ATC 3-06 [S]. Washington D C: US Government Printing Office, 1978.
- [7] FUKUSHIMA Y, IRIKURA K, UETAKE T, *et al.* Characteristics of observed peak amplitude for strong ground motion from the 1995 Hyogoken Nanbu (Kobe) earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2000, 90(3): 545.
- [8] 龚思礼. 建筑抗震设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
GONG Sili. Building aseismic design manual [M]. Beijing : China Architecture & Building Press, 2002.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of building: GB50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [10] 高孟潭. 《中国地震动参数区划图》(GB18306—2015)宣贯教材[M]. 北京: 中国质检出版社, 中国标准出版社, 2015.
GAO Mengtan. Explanation on 《The Ground Motion Parameter Zoning Map of China Press》(GB18306—2015)[M]. Beijing: China Quality Press, China Standards Press, 2015.
- [11] SEED H B, UGAS C, LYSMER J. Site-dependent spectra for earthquake-resistant design[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1976, 66(1): 221.
- [12] NAKAMURA Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface[J]. Railway Technical Research Institute Quarterly Reports, 1989, 30(1): 25.
- [13] 朱明. 数据挖掘[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2002.
ZHU Ming. Data mining press [M]. Hefei : University of Science and Technology of China Press, 2002.
- [14] MACQUEEN J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations [C] // Proceedings of the fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability. Berkeley : Statistical Laboratory University of California, 1967, 1(14): 281-297.
- [15] 向东进. 实用多元统计分析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2005.
XIANG Dongjin. Applied multivariate statistical analysis [M]. Wuhan : China University of Geosciences Press, 2005.
- [16] 郭锋, 吴东明, 许国富, 等. 中外抗震设计规范场地分类对应关系[J]. 土木工程与管理学报, 2011, 28(2): 63.
GUO Feng, WU Dongming, XU Guofu, *et al.* Site classification corresponding relationship between Chinese and the overseas seismic design codes [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2011, 28(2): 63.
- [17] 袁一凡, 田启文. 工程地震学[M]. 北京: 地震出版社, 2012.
YUAN Yifan, TIAN Qiwen. Engineering seismology [M]. Beijing : Seismological Press, 2012.