

文章编号: 1000-4750(2015)Suppl-0196-06

基于地震动模拟的一致危险谱和条件均值谱生成及应用

朱瑞广, 于晓辉, 吕大刚

(哈尔滨工业大学结构工程灾变与控制教育部重点实验室, 黑龙江, 哈尔滨 150090)

摘 要: 提出了一种基于地震动模拟的一致危险谱和条件均值谱的生成方法。该方法采用 AB95_BC 点源模型和基于有限断层的混合震源模型来生成人工模拟地震动, 进一步对模拟地震动的反应谱进行统计分析, 生成研究地区的一致危险谱及条件均值谱。为说明该文方法, 选择缺乏历史地震资料的美国 Memphis TN 地区作为研究区域, 模拟了该地区未来 1000 年可能发生的地震, 并生成该地区 50 年超越概率为 2% 一致危险谱及相应的条件均值谱。最后考虑不同调幅方法、匹配均值和标准差等因素的影响, 结合贪心优化算法, 利用条件均值谱挑选地震动记录。

关键词: 点源模型; 混合震源模型; 一致危险谱; 条件均值谱; 地震动模拟

中图分类号: P315.9 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.05.S016

GENERATION AND APPLICATION OF THE UNIFORM HAZARD SPECTRUM AND THE CONDITIONAL MEAN SPECTRUM BASED ON GROUND MOTION SIMULATION

ZHU Rui-guang, YU Xiao-hui, LÜ Da-gang

(Harbin Institute of Technology, Key Laboratory of Structures Dynamic Behavior and Control of the Ministry of Education, Harbin, Heilongjiang 150090, China)

Abstract: A method is proposed to generate the uniform hazard spectrum (UHS) and the conditional mean spectrum (CMS) based on ground motion simulation. This method adopts the hybrid source model including the AB95_BC point source model and the stochastic finite fault model to generate artificial ground motions. Then the response spectra of the artificial ground motions are used for statistics and the UHS and the CMS are developed for the concerned region. To illustrate the presented method, the region in terms of Memphis TN in US is selected as the concerned region, and the possible ground motions occurring in 1000 years are simulated. Then the UHS with the exceedance probability of 2% in 50 years and the corresponding CMS were generated. Finally, some ground motion records are selected based on the generated CMS in combination with the greedy optimization algorithm with the consideration of different scaling methods and different matching targets: the mean and the standard deviation.

Key words: point source model; hybrid source model; uniform hazard spectrum; conditional mean spectrum; ground motion simulation

选择合适的地震动记录是结构抗震性能评估中的一项重要内容。目标谱相容方法作为一种地震

动挑选的重要方法, 近年来得到了广泛关注^[1-4]。一致危险谱(Uniform Hazard Spectrum, UHS)是地震

收稿日期: 2014-05-08; 修改日期: 2014-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378162, 51408155); 国家科技支撑计划课题项目(2013BAJ08B01); 土木工程防灾国家重点实验室开放基金项目(SLDRCE12-MB-04); 中国高校基本科研业务费专项资金项目(HIT. NSRIF. 2015099); 中国博士后科学基金面上项目(2014M551251)

通讯作者: 吕大刚(1970—), 男, 黑龙江铁力人, 教授, 博士, 博导, 副院长, 从事抗震可靠性、易损性和鲁棒性研究(E-mail: ludagang@hit.edu.cn).

作者简介: 朱瑞广(1987—), 男, 河北唐山人, 博士生, 从事地震动选择和结构抗震研究(E-mail: zrg179@163.com);

于晓辉(1982—), 男, 辽宁丹东人, 助理研究员, 博士, 从事地震易损性和概率风险分析研究(E-mail: yxhhit@126.com).

危险性分析的重要结果,它上面每一点均具有相同的超越概率。作为一种较为常用的目标谱,抗震设计规范中提供的设计谱其本质也是一致危险性谱。而挑选实际地震动以与设计谱相匹配已经成为一种得到广泛认可的地震动挑选方法。该方法要求将地震动调幅,以满足在特定周期范围内匹配设计谱的要求。这种谱相容的方法看似方便却忽略了一点事实:一致危险谱反映的是场地内所有地震的综合信息,不能具体体现某个单独地震的信息,并且挑选的地震动往往只是在某一特定周期处与一致危险谱匹配,在其他周期处未必能够匹配。曲哲等^[5-7]指出,地震动的各个频率分量不是同时达到最大幅值的,但是设计谱主要体现的是地震动反应谱的均值特性,因此利用设计谱挑选地震动时无法考虑结构周期的改变以及地震动反应谱的谱形特性。

为克服上述传统的谱相容方法的不足, Baker 和 Cornell^[8]通过引入谱形参数,提出了利用条件均值谱(CMS, Conditional Mean Spectrum)挑选地震动的方法。条件均值谱和地震动记录反应谱的形状更加接近,更加能够反映实际地震动的特性。

但是如果仅匹配条件均值谱的均值,挑选出的地震动样本的统计信息与目标谱仍有较大差异。为此,2011年 Baker^[9]又提出同时匹配目标谱的均值和方差的最优地震动挑选方法,该方法目前已被 ATC-58 所采用^[10]。我国学者近年来也开始关注地震动谱型参数及条件均值谱对结构地震反应的影响。例如:陈亮等^[11]研究了地震动谱型参数对 RC 梁桥结构地震反应的影响;陈波^[12]在对地震动记录的选择和调整方法研究中指出,对不同的结构周期和地震强度,地震动应该考虑不同的调幅方法,同时他也指出利用条件均值谱挑选地震动记录,可以克服一致危险谱的保守问题,可以有效地估计结构的地震反应。韩建平^[13]对考虑谱形影响的地震动强度指标进行了研究,为我国合理的地震动记录选择与调整提供了一定的参考。也有学者指出利用条件均值谱挑选地震动时,当设定地震为特大地震时,大震记录数据库就变得愈发重要^[14]。

上述研究均针对地震动数据较丰富地区,一般都具有较完备的地震危险性资料。但是对于缺乏地震危险性资料的地区,一致危险谱通常很难获得。一般对于地震资料较少的地区,可以利用近似相同场地的危险性来代替,但是单纯从场地条件来选择地震动并进行危险性分析,差异性太大。为此,本

文利用人工模拟地震动方法来建立场地的一致危险谱以及相对应的条件均值谱,并利用条件均值谱来挑选地震动记录。

1 基于地震动模拟的一致危险谱和条件均值谱生成方法

1.1 地震动的模拟

确定研究场地之后,首先要得到该地区地震发生的频率、震中位置、震源深度等统计信息,利用蒙特卡洛模拟得到未来一段时间该地区周边可能发生的地震的震级、震源深度等信息。地震发生模型采用平稳泊松模型,同时依据不同的发震机制,采用点源模型和基于有限断层模型的混合震源模型对场地附近可能发生的地震进行模拟。其中点源模型采用 Atkinson 和 Boore^[15]于 1995 年提出的双拐角频率模型,混合震源模型采用增加标准化因子的模型^[16]。上述两种震源模型,体现了地震的发震机理,包括地震波的传播以及场地土层对地震波的放大作用等。其中混合震源模型体现了破裂带的破裂过程,其破裂点在模拟过程中完全随机选择。

1.2 一致危险谱的生成

要得到一致危险谱,首先要得到研究场地各周期对应的地震危险性曲线,然后将各周期中对应某一特定超越概率的反应谱值集合成一条曲线,就得到了一条对应某一超越概率的一致危险谱。将研究场地一定范围内的地震引起的地震动在某一周期处加速度反应谱进行统计分析,通过假设检验发现其服从对数正太分布,利用其分布信息即可得到各谱值对应的超越概率。当模拟地震对应年限为 t 年,需要将超越概率转化为年平均超越概率:

$$PE_{\text{ann}} = 1 - (1 - PE_t)^{1/t} \quad (1)$$

式中: PE_{ann} 为年平均超越概率; PE_t 为 t 年得超越概率。

1.3 条件均值谱的生成

依据文献[9],条件均值谱的表达式为:

$$CMS_{\bar{S}_a(T_1)}(T_2) = \theta(M, r, T_2) \cdot \exp[\beta(M, r, T_2) \cdot \rho_{\varepsilon(T_1), \varepsilon(T_2)} \cdot \varepsilon_{T_1}] \quad (3)$$

式中: $CMS_{\bar{S}_a(T_1)}(T_2)$ 是在给定 T_1 时刻的谱值 $\bar{S}_a(T_1)$ 的条件下, T_2 时刻条件均值谱的坐标; $\theta(M, r, T_2)$ 和 $\beta(M, r, T_2)$ 是在给定 $[M, r]$ 条件下,利用地震动预测方程计算得到的 T_2 时刻 S_a 的中位值和对数标准差; ε_{T_1} 是和 $\bar{S}_a(T_1)$ 关联的 ε 的值; $\rho_{\varepsilon(T_1), \varepsilon(T_2)}$ 是 T_1

和 T_2 时刻两者相对应的 ε 值的相关系数。

2 应用研究

2.1 潜在震源区与地震动模拟

本文选择美国中部的 Memphis TN 地区作为研究场地，该地区属于地震记录缺乏地区，历史地震记录较少，适合应用本文提出方法。利用该地的地震统计信息，模拟该地区未来 1000 年可能发生的地震。

图 1 描述了研究地区的基本信息，断层视为一个 $140\text{km}\times 33\text{km}$ 的走滑断层，其发生 $M_w = 8$ 地震的重现期为 1000 年。该地区地震数据较少，除了处在断层位置的大震外其他地震震级都较小。图 2 以 $0.5^\circ\times 0.5^\circ$ 为基准，给出了每个区域内地震的年平均超越概率，研究场地的震级上限取为 7.5。根据每个小区域的边界，震中位置认为服从均匀分布^[17]，其他场地信息详见文献[18]。

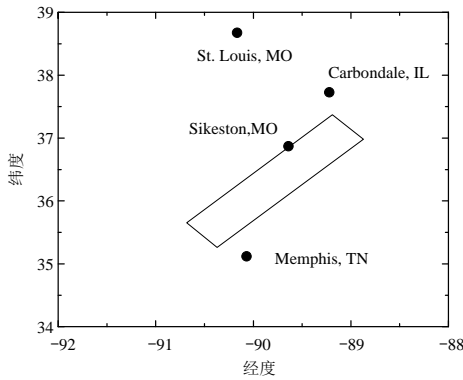


图 1 研究场地
Fig.1 Study site

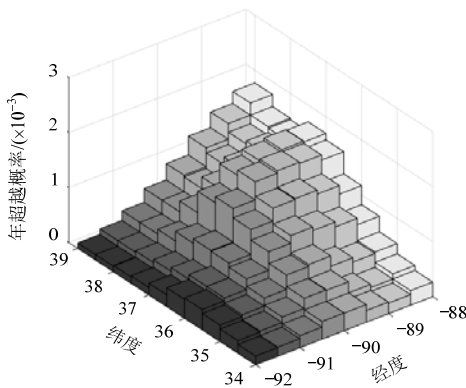


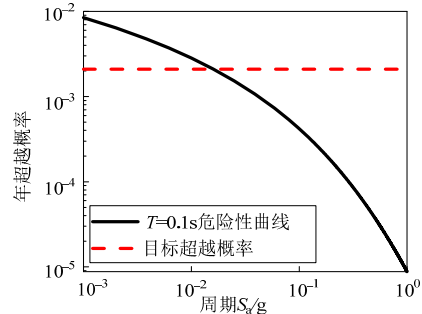
图 2 研究场地地震年超越概率

Fig.2 Seismic exceedance probability of the interesting site

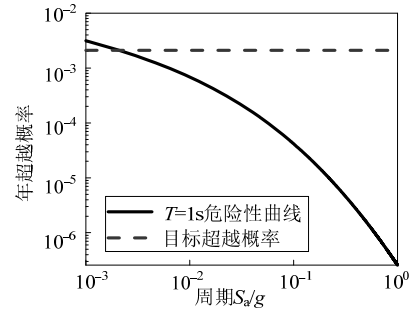
2.2 一致危险谱与条件均值谱

利用模拟地震动反应谱，可以计算各个周期对应的危险性曲线，将所有周期超越概率相同的点集成为一条曲线，得到一致危险谱，如图 3 所示。图

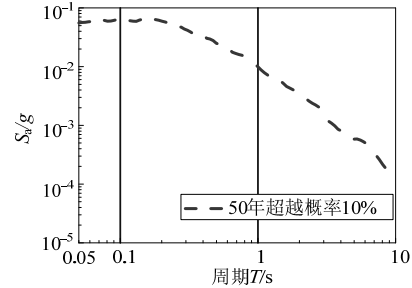
4 分别给出了 50 年超越概率为 10% 和 2% 的一致危险谱。其他细线为震源距为 200km 范围内对 Memphis TN 地区可能产生破坏性结果的全部地震动，其中三条数值较大且波动较为明显的就是混合震源模型模拟的结果，其余为点源模型模拟结果。



(a)



(b)



(c)

图 3 由各时刻的危险性曲线联合产生一致危险性曲线
Fig.3 Combining hazard curves from individual periods to generate a uniform hazard spectrum

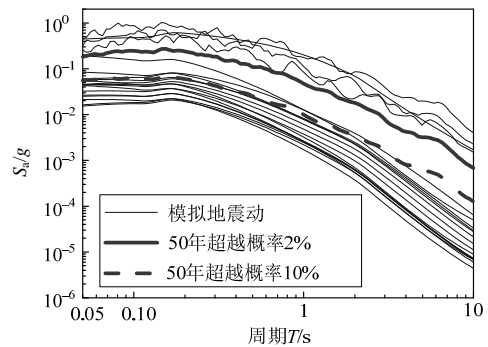


图 4 Memphis TN 地区一致危险性谱曲线
Fig.4 The UHS of Memphis TN

结合基于模拟得到的Memphis TN地区50年超越概率为2%的一致危险谱，设定地震为 $[M, R, \varepsilon]=[8.0, 40, 0.06]$ ，根据条件均值谱的概念和NGA提出的CB08模型^[9]得到其相应的条件均值谱，如图5所示。

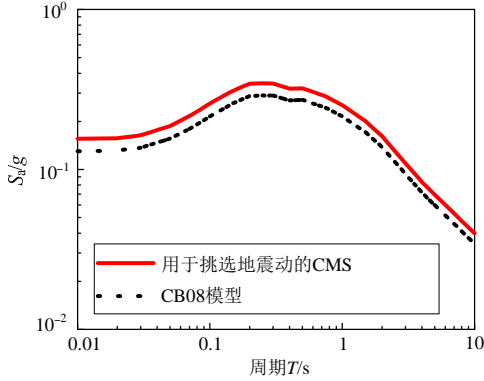


图5 $[M, r]=[8.0, 40]$ 对应的条件均值谱

Fig5 CMS with $[M, r]=[8.0, 40]$

2.3 基于条件均值谱的地震动挑选

在地震动挑选时，通常需要将地震动进行调幅，调幅的基本思想主要有两种：1) 在某一特定周期，把地震动的谱加速度调幅到目标谱值；2) 在某一特定周期段或者几个不同周期，把地震动反应谱和目标谱均值调幅到同一水平。图6和图7分别为单点调幅和多点调幅，通过匹配条件均值谱的均值挑选出的地震动样本。通过图8和图9可以发现，两种方法挑选出的样本均值与条件均值谱匹配良好，但是两组样本的方差与条件均值谱相差甚远，尤其是单点调幅样本。

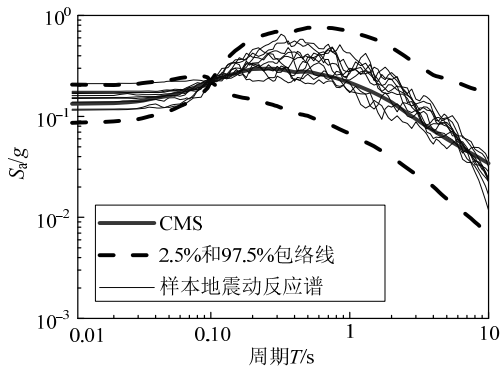


图6 调幅系数1匹配均值选出的样本

Fig.6 Samples with 1st scaling factor matching mean

利用条件均值谱匹配地震动时，匹配原则分为两种：1) 仅匹配待选地震动反应谱和目标谱的均值；2) 同时匹配两者的均值和方差。仅匹配均值挑选的地震动，虽然挑选出的样本均值与目标谱较为接近，但是却没有利用到目标谱的方差信息，样本

地震动的分布信息与目标谱仍有差别。图10和图11分别为同时匹配均值和方差得到的地震动样本，其中图11是在图10的基础上利用贪心技术优化的结果。通过图12~图15可以发现，贪心优化技术选出的地震动样本的均值和标准差与目标谱更为接近。通过图12、图15与图8、图9可以发现，与仅匹配均值相比，即使未使用贪心优化技术同时匹配均值和方差挑选的地震动样本的统计信息与目标谱更为一致，尤其是方差信息。

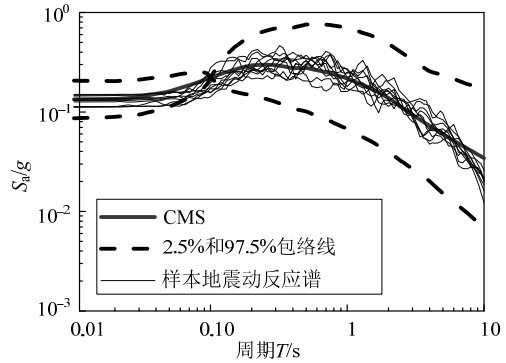


图7 调幅系数2匹配均值选出的样本

Fig.7 Samples with 2nd scaling factor matching mean

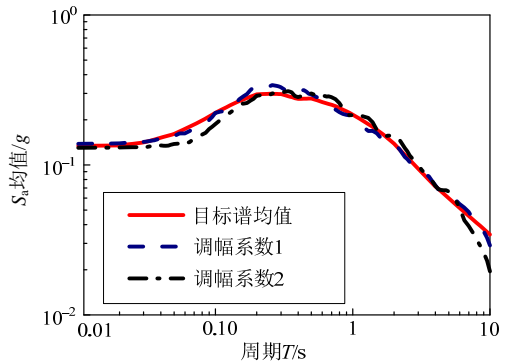


图8 不同调幅系数匹配均值挑选的地震动样本均值

Fig.8 The mean of samples with difference scaling factors matching mean only

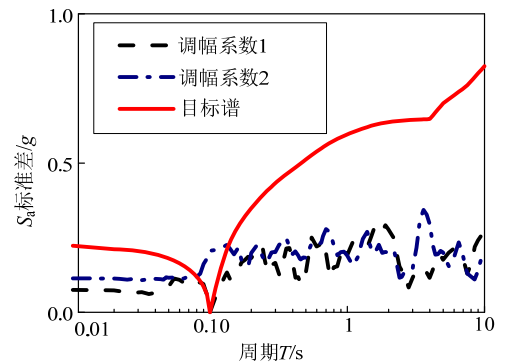


图9 不同调幅系数匹配均值挑选的地震动样本标准差

Fig.9 The standard deviation of samples with difference scaling factors matching mean only

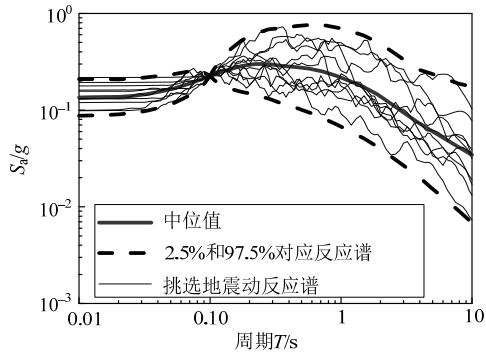


图 10 未使用贪心优化技术挑选的样本
Fig.10 The samples without a greed optimization technique

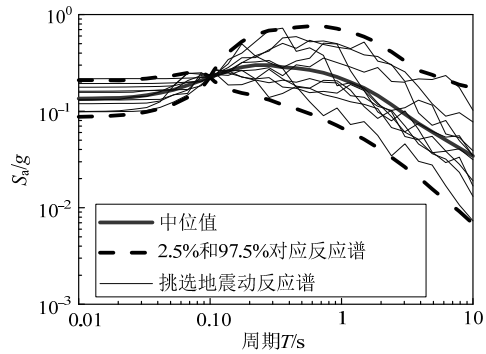


图 11 使用贪心优化技术得到的样本
Fig.11 The samples with a greed optimization technique

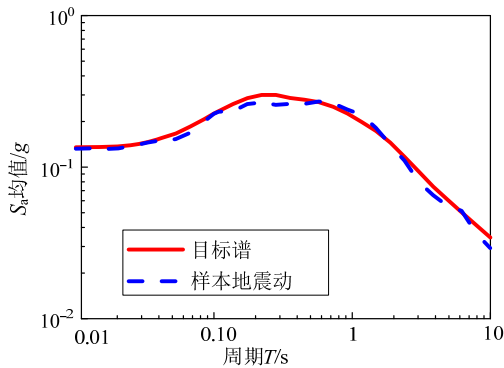


图 12 未使用贪心优化技术挑选的地震动样本的均值
Fig.12 The samples' mean without a greed optimization technique

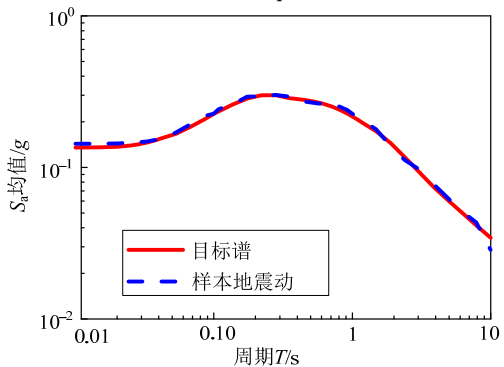


图 13 使用贪心优化技术选择的地震动样本均值
Fig.13 The samples' mean with a greed optimization technique

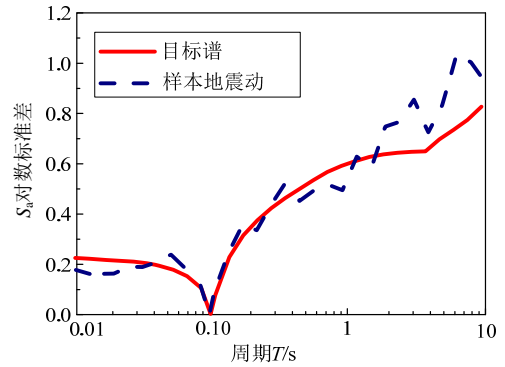


图 14 未使用贪心优化技术挑选出的地震动样本标准差
Fig.14 The samples' standard deviation without a greed optimization technique

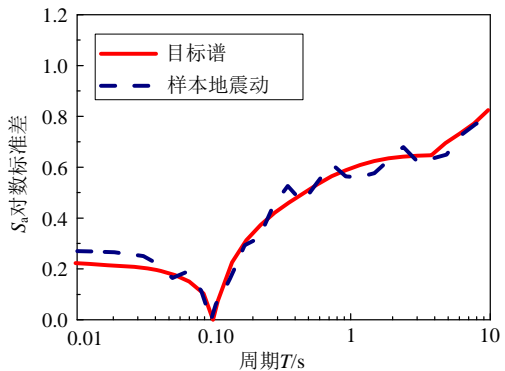


图 15 使用贪心优化技术选择的地震动样本标准差
Fig.15 The samples' standard deviation with a greed optimization technique

3 结论

本文采用 AB95_BC 点源模型和基于有限断层的混合震源模型,借助蒙特卡洛方法,对 Memphis TN 地区将来 1000 年可能发生的地震动进行模拟。利用数值模拟产生的地震动记录,对当地进行地震危险性分析,给出了当地 50 年超越概率为 2% 和 10% 的一致危险谱。利用 50 年超越概率 2% 的一致危险谱对应的条件均值谱,通过不同的调幅方法和匹配原则,挑选出不同的地震动样本。本文为地震历史数据缺乏地区的地震动挑选提供了一种可行的方法,该方法可以克服单纯利用相似场地挑选地震动的局限性。

参考文献:

[1] Barenberg M E. Inelastic response of a spectrum-compatible artificial accelerogram [J]. Earthquake Spectra, 1989, 5(3): 477-493.
[2] Naiem F. Lew M. On the use of design-spectrum compatible time histories [J]. Earthquake Spectra, 1995, 11(1): 111-127.

- [3] Naumoski N, Saatcioglu M, Amiri-Hormozake K. Effects of scaling of earthquake excitations on the dynamic response of reinforced concrete frame building [C]. 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, Canada, 2004, Paper No. 2917.
- [4] Bommer J J, Acevedo A B. The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2004, 8(1): 43–91.
- [5] 曲哲, 叶列平, 潘鹏. 建筑结构弹塑性时程分析中地震动记录选取方法的比较研究[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(7): 10–21.
Qu Zhe, Ye Lieping, Pan Peng. Comparative study on methods of selecting earthquake ground motions for nonlinear time history analyses of building structures [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(7): 10–21. (in Chinese)
- [6] 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 responses [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(12): 30–35. (in Chinese)
- [7] 吴巧云, 朱宏平, 樊剑. 基于性能的钢筋混凝土框架结构地震易损性分析[J]. *工程力学*, 2012, 29(9): 117–124.
Wu Qiaoyun, Zhu Hongping, Fan Jian. Performance-based seismic fragility analysis of RC frame structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(9): 117–124. (in Chinese)
- [8] Baker J W, Cornell C A. Spectral Shape, Epsilon and Record Selection [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2006, 35(9): 1077–1095.
- [9] Baker J W. Conditional Mean Spectrum: Tool for ground motion selection [J]. *ASCE*, 2011, 137(3): 322–331.
- [10] ATC-58, Guidelines for seismic performance assessment of buildings [S]. Applied Technology Council, 2012.
- [11] 陈亮, 李建中. 地震波的反应谱谱形对 RC 梁桥结构非线性地震反应的影响[J]. *工程力学*, 2011, 28(10): 86–92.
Chen Liang, Li Jianzhong. The influence of response spectral shape of earthquake ground motions on nonlinear seismic responses of reinforced concrete girder bridge structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(10): 86–92. (in Chinese)
- [12] 陈波. 结构非线性动力分析中地震动记录的选择和调整方法研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2013.
Chen Bo. Ground motion selection and modification methods for performing nonlinear dynamic analysis of buildings [D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2013. (in Chinese)
- [13] 韩建平, 陈继强, 闫青, 罗熠. 考虑谱形影响的地震动强度指标研究进展 [C]. 甘肃, 兰州: 第23届全国结构工程学术会议, 2014: 36–45.
Han Jianping, Chen Jiqiang, Yan Qing, Luo Yi. State of the art of ground motion intensity measures accounting for the influence of spectral shape [C]. Gansu, Lanzhou: The 23th Structure Engineering Conference, 2014: 36–45. (in Chinese)
- [14] 李琳, 温瑞智, 周宝峰, 史大成. 基于条件均值反应谱的特大地震强震记录的选择及调整方法[J]. *地震学报*, 2013, 35(3): 380–389.
Li Lin, Wen Ruizhi, Zhou Baofeng, Shi Dacheng. Selection and scaling of ground motion records for great scenario earthquakes based on the conditional mean spectrum [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2013, 35(3): 380–389. (in Chinese)
- [15] Atkinson G M, Boore D M. Ground motion relations for eastern North America [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1995, 85(1): 17–30.
- [16] 陈富. 地震地面运动加速度记录与强度参数选择的统计方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
Chen Fu. An improvement on source spectrum model for random synthesis of strong ground motion [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [17] Wu Chunlin. Earthquake motion simulation and reliability implication [D]. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2000. (in Chinese)
- [18] 朱瑞广. 基于地震动模拟的一致危险性谱与条件均值谱研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
Zhu Ruiguang. Research on uniform hazard spectrum and mean conditional spectrum of strong earthquake motion [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)