

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.06.023

地震功率谱参数的误差源及其敏感性分析

柳国环^{1,2}, 练继建^{1,2}, 刘卓^{1,2}, 国巍³, 田利⁴

(1.天津大学 建筑工程学院,300072 天津;2.水利工程仿真与安全国家重点实验室(天津大学), 300072 天津;
3.中南大学 土木工程学院,410075 长沙;4.山东大学 土建与水利学院,250061 济南)

摘要:为分析功率谱模型参数的误差来源及其对多点地震动和大跨桥梁结构反应的敏感性,简要回顾了规范反应谱求解地震动目标频谱参数的两种方法,开发了求解频谱参数的可视化程序 TJU.SPSP,并计算出具体参数,指出求解方法不同而导致参数间误差的根本来源;更新了多点地震动模拟程序 MEMS_b 至新版本,总结了地震动能量与场地类型、功率谱模型之间的关系.研究结果验证了直接法和积分法对幅值及主频带宽影响的不容忽视性,强调了功率谱模型中描述低频分量参数的重要性且不应忽略,澄清了功率谱模型中阻尼比及二层过滤阻尼比的物理和数学意义,并以实际桥梁工程为例从结构地震反应角度验证了理论分析的正确性.

关键词:大跨结构;多点地震动;反应谱;功率谱;低频分量;桥梁

中图分类号: P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2015)06-0124-05

Error source of seismic parameters of PSD model and its sensitivity

LIU Guohuan^{1,2}, LIAN Jijian^{1,2}, LIU Zhuo^{1,2}, GUO Wei³, TIAN Li⁴

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, 300072 Tianjin, China; 2.State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety (Tianjin University), 300072 Tianjin, China; 3. School of Civil Engineering, Central South University, 410075 Changsha, China; 4.School of Civil and Hydraulic Engineering, Shandong University, 250061 Jinan, China)

Abstract: In order to analyze the error source of seismic parameters of PSD model and its sensitivity influence on ground varying motions and seismic response of long-span Bridge, two methods (direct and integral method) that usually used to solve the parameters in target PSD model according to CRS are briefly reviewed. Then, a visualization program named TJU.SPSP was developed and the main parameter values of PSD were listed in fixed format. Base on the results, the fundamental error source that caused by different methods were analyzed obviously. Moreover, the program for multi-point earthquake motions simulation (MEMS_b) was updated and the relationship between earthquake-induced ground motion energy and site soil type were summarized. The results indicate that the two methods have significant influence on the amplitude and band width of dominant frequency. The parameters describing the low-frequency component in PSD models are important and can't be ignored. Furthermore, the physical and mathematical significance of damping ratio in PSD models were clarified. Finally the validity of the theoretical analysis was verified by analyzing the seismic responses of a real long-span bridge.

Keywords: long-spanstructure; multi-point ground motions; response spectrum; power spectrum density; low-frequency component; bridge

收稿日期: 2014-10-30.
基金项目: 国家创新研究群体科学基金(51021004); 国家自然科学基金青年基金(51408409)
作者简介: 柳国环(1980—),男,博士,副教授;
练继建(1965—),男,博士生导师,长江学者特聘教授.
通信作者: 柳国环, liugh@tju.edu.cn.

在地震动随机模型中金井清功率谱模型、胡聿贤-周锡元改进模型和 Clough-Penzien 功率谱模型应用较为广泛,上述 3 种模型之间的区别主要体现在低频部分的能量分布上,而对于工程结构尤其长周期结构而言,功率谱模型的选择尤为重要.3 种功率谱模型均涉及物理意义为阻尼比

的拟合参数,根据文献[1]的计算结果,该参数的拟合结果均在 0.5 以上,这显然远大于实际结构中的阻尼比,而这一点易被忽略;因此,以上 3 种功率谱模型的物理意义值得进一步商榷。

1 规范反应谱计算地震动功率谱的方法

1.1 直接转化法

假设地面运动为平稳高斯过程,在有限持续时间 T 内,结构绝对加速度 $\ddot{x}_a$ 的最大值为有限值,以 $y_m(\omega)$ 表示,由于 $y_m(\omega)$ 是一个随机变量,反应谱 $R(\omega)$ 就可近似定义为 $y_m(\omega)$ 的平均值,因此,存在一定的概率,使得 $y_m(\omega)$ 高于 $R(\omega)$, 设此概率为 r 并称之为超越概率.根据文献[2],在结构阻尼比较小情况下,可假定 T 为 15 s, r 为 0.15,应用随机理论来推导直接转化法的公式:

$$f(\omega)=\frac{\xi}{\pi\omega}R^2(\omega)/\left\{-\ln\left[\frac{-\pi}{\omega T}\ln(1-r)\right]\right\}.$$

此公式将地震动输入的加速度功率谱密度函数 $f(\omega)$ 与反应谱 $R(\omega)$ 直接联系起来.根据规范得到 $R(\omega)$ 之后,再确定参数 r 、 T 、 ξ 的值,即可直接计算得到地震动输入的加速度功率谱函数。

1.2 逐步积分法

在平稳激励作用下,对于阻尼比为 ξ 、自振频率为 ω 的单自由度体系而言,其输出加速度功率谱密度函数的均方值为

$$\sigma^2(\xi,\omega)=\int_0^\infty S(p,\omega)dp=\\ \int_0^\infty \frac{\omega^4+4\omega^2\xi^2p^2}{(p^2-\omega^2)^2+4\omega^2\xi^2p^2}f(p)dp.$$

根据随机振动理论,由文献[3]可知,该体系的最大绝对加速度为 $A_{\max}(\xi,\omega)=P\sigma$, P 为绝对加速度过程的峰值因子,求解公式参见文献[4].逐步积分法由反应谱求功率谱时,需要先对平稳地

震动输入的功率谱密度赋予初值 $f(p)$,其次求得对应的峰值因子 P 和均方根 σ ,然后计算加速度峰值 $A_m(\omega)$,并与对应规范的反应谱 $R(\omega)$ 相比较,计算其相对误差 $E(\omega)$.如果对于所有的固有频率 ω ,其相对误差都满足 $E(\omega)\leq 2\%$,则精度达到要求;否则,需根据式 $f(p)_{k+1}=f(p)_k\times R^2(\omega)/A_m^2(\omega)$ 进行迭代计算修正 $f(p)$,直至满足精度要求,此时的 $f(p)$ 即为地震动输入的功率谱密度函数。

2 目标功谱参数可视化程序开发 TJU.SPSP 与计算

2.1 TJU.SPSP 开发说明

应用 MATLAB 软件 2012b 版本开发了地震动功率谱计算程序,其功能包括:

1) 依据所选规范,应用直接转化法和逐步积分法,计算出地震动的加速度功率谱密度函数.与之对应的规范依次为 JTG/T B02—01—2008《公路桥梁抗震设计细则》^[5]、GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[6] 和 GB 50260—96《电力设施抗震设计规范》^[7]。

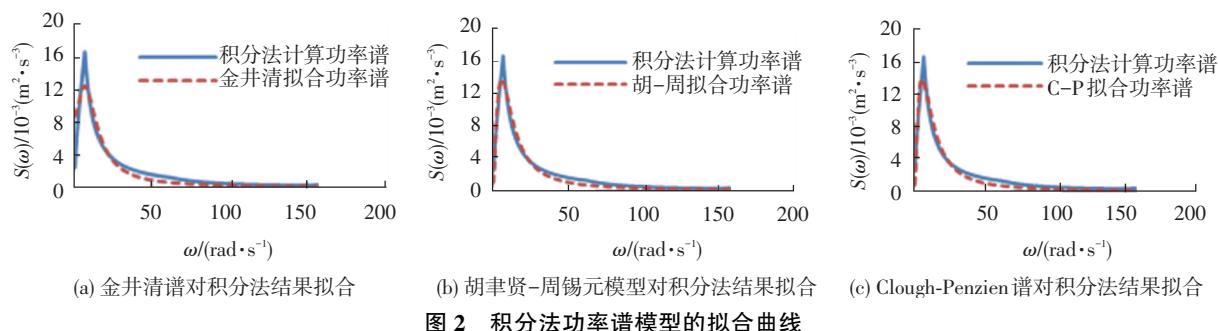
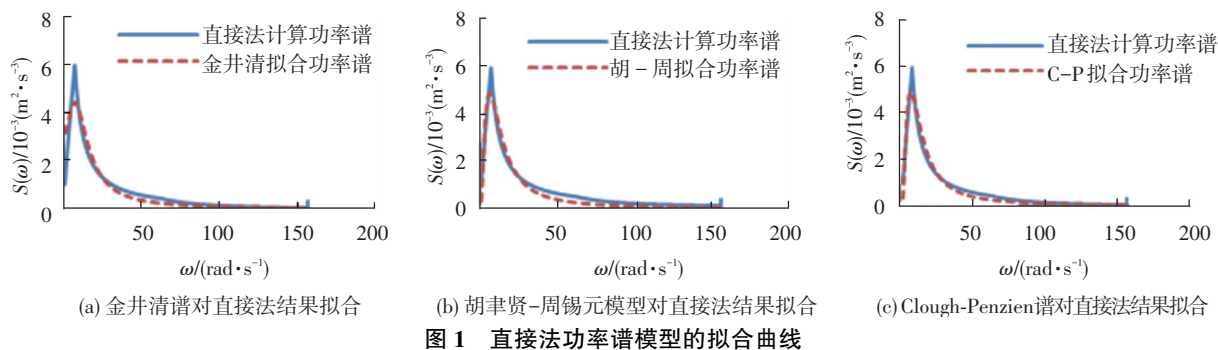
2) 将计算出的地震动加速度功率谱密度函数,分别用金井清功率谱模型、胡聿贤-周锡元改进模型及 Clough-Penzien 功率谱模型进行拟合,得出拟合功率谱图像和相应参数,保存在 Excel 文件。

以桥梁为研究对象,桥梁分类为 A 类,区划图特征周期为 0.45 s,阻尼比 0.02,分别应用直接转化法和逐步积分法进行计算,得出各个模型的拟合参数,表 1 给出了 IV 类场地条件下各参数的取值.由于篇幅有限,表中只给出七度条件下的结果.当场地类型为 IV 类、地震烈度为 7.2 时,应用两种方法计算的功率谱密度以及各个功率谱模型的拟合情况,见图 1、2。

表 1 应用直接法及积分法求得的各功率谱模型参数值(IV 类场地)

设防烈度	模型类型	$\omega_g/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$		ξ_g		$\omega_f/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$		ξ_f		$S_0/(10^{-4}\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-3})$	
		直接	积分	直接	积分	直接	积分	直接	积分	直接	积分
7.1	金井清谱	9.55	9.25	0.89	0.87	—	—	—	—	16.16	45.44
	胡-周谱	6.64	6.71	1.12	1.08	2.29	2.17	—	—	23.27	63.82
	C-P 谱	6.81	6.86	1.11	1.06	0.88	0.84	1.42	1.42	22.70	62.38
7.2	金井清谱	9.55	9.34	0.89	0.87	—	—	—	—	31.34	87.82
	胡-周谱	6.64	6.70	1.12	1.08	2.29	2.17	—	—	45.15	124.06
	C-P 谱	6.82	6.85	1.11	1.07	0.88	0.84	1.42	1.42	44.02	121.26

注:胡-周谱表示胡聿贤-周锡元改进模型,C-P 谱表示 Clough-Penzien 功率谱模型。



2.2 功率谱参数误差与敏感性分析

表 1 列出了分别应用直接转化法和逐步积分法而求得各模型参数。

1) 在功率谱方面,金井清谱放大了地震动中低频部分的能量,在长周期结构的地震动分析中会产生较大误差。对于抗震要求较高的长周期结构,应用 Clough-Penzien 功率谱进行低频部分的分析更为精确。在场地类型和功率谱模型相同的情况下,拟合参数 ω_g 、 ξ_g 、 ω_f 及 ξ_f 基本不随地震烈度而变化,而参数 S_0 则随着地震烈度的增加而升高。

2) 由图 1、2 可知,直接转化法和逐步积分法计算结果峰值点位置也大体相同,但功率谱密度的幅度却相差较大。根据积分法得到的模型参数 S_0 约为直接法的 3 倍,其他参数则极为接近。与文献[1]计算结果对比可知,逐步积分法的计算结果正确,而直接转化法存在较大误差。

3) 由表 1 可知,功率谱中参数 ξ_g 的拟合结果均大于 0.7,胡聿贤-周锡元改进谱和 Clough-Penzien 功率谱的 ξ_g 甚至会出现大于 1 的情况,而实际中的结构阻尼比通常均小于 0.2。显然,尽管模型的拟合结果满足数学意义上的拟合要求,但 ξ_g 的数值与其物理意义并不十分吻合。

4) 在 Clough-Penzien 谱中,文献[8]称 ξ_f 为第二过滤层的阻尼比,因此其值应介于 0、1 之间。但在计算过程中发现,当场地类型为 IV 类时, ξ_f 的值必须不小于 1.42 才能保证拟合结果有效性。可见,Clough-Penzien 谱中参数 ξ_f 的物理意义尚不明确,但其较好的拟合结果体现出重要的数学意义。

3 多点地震动模拟与敏感性分析

3.1 多点地震动模拟的程序可视化

应用 MATLAB 软件 2012b 版本开发了多点地震动功率谱计算程序 MEMS_b,需要设置的参数包括:目标功率谱模型及相应参数、结构的支座点坐标、视波速、强度包络函数的参数、相干函数模型及规范反应谱的选取。程序中涉及的相干函数模型包括 Hao Hong 模型、QWW 模型及 Harichandran 模型,涉及的目标功率谱模型及规范反应谱与程序 TJU.SPSP 相同。

3.2 多点地震动敏感性分析

设定如下参数以运行程序:以桥梁为研究对象,对 3 种功率谱模型分别进行计算,模型参数选用表 1 中地震烈度为 7.2 且应用逐步积分法的对应结果作为输入数据;结构的支座点坐标依次为 (0,0)、(60.5,0)、(345.5,0)、(630.5,0)、(691,0);视波速为 250 m/s;选取 Hao Hong 模型作为相干函数模型。根据计算结果,绘制各模型在 4 种类型场地中功率谱 $S(\omega)$ 的对比图以及各支座点加速度均方根 σ_x 的对比图,见图 3~5。对多点地震动敏感性分析如下:

1) 由图 3、4 可知,低频部分的功率谱密度较高,而当频率高于 5 Hz 时,功率谱密度迅速减小;因此,能量主要分布于低频带范围内,这与场地类型及功率谱模型的选择无关。

2) 场地类型越高,多点地震动的能量越大,见图 3。当场地类型较高时,其土质更为松软,地震

波在传播过程中的放大效应会更加明显,从而导致地震动的能量变高。

3) 金井清功率谱放大了低频部分的能量,在实际应用中会产生较大误差;而胡聿贤-周锡元改进谱及 Clough-Penzien 功率谱是在金井清功率谱的基础之上,对低频部分加以修正,从而提高了模型的合理性及计算的精度。修正的本质从物理意义上来说,就是对金井清功率谱的结果在低频

段进行二次过滤。

4) 同类场地情况下,结构各支座点的加速度均方根基本一致;而场地类型越高,支座点处的加速度均方根越大,见图 5。地震动过程中加速度的均方根可以表征地震动能量的大小,由图 5 可知,场地类型较高时,加速度的均方根值较大,故其能量也更高,这与图 3 所反应的规律相一致。

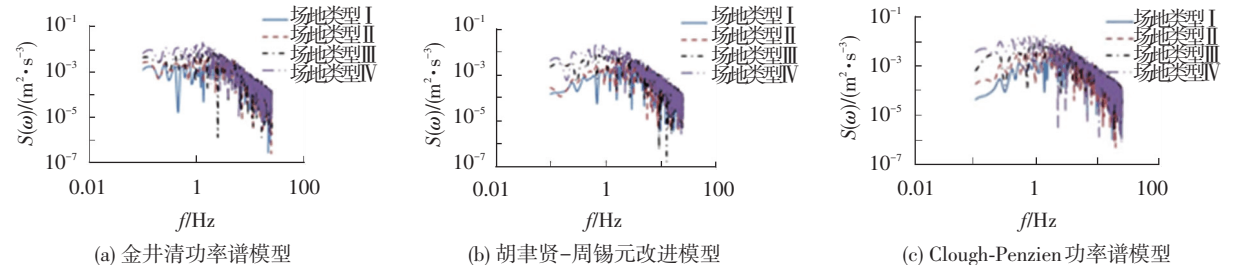


图 3 不同模型各类场地的计算功率谱对比

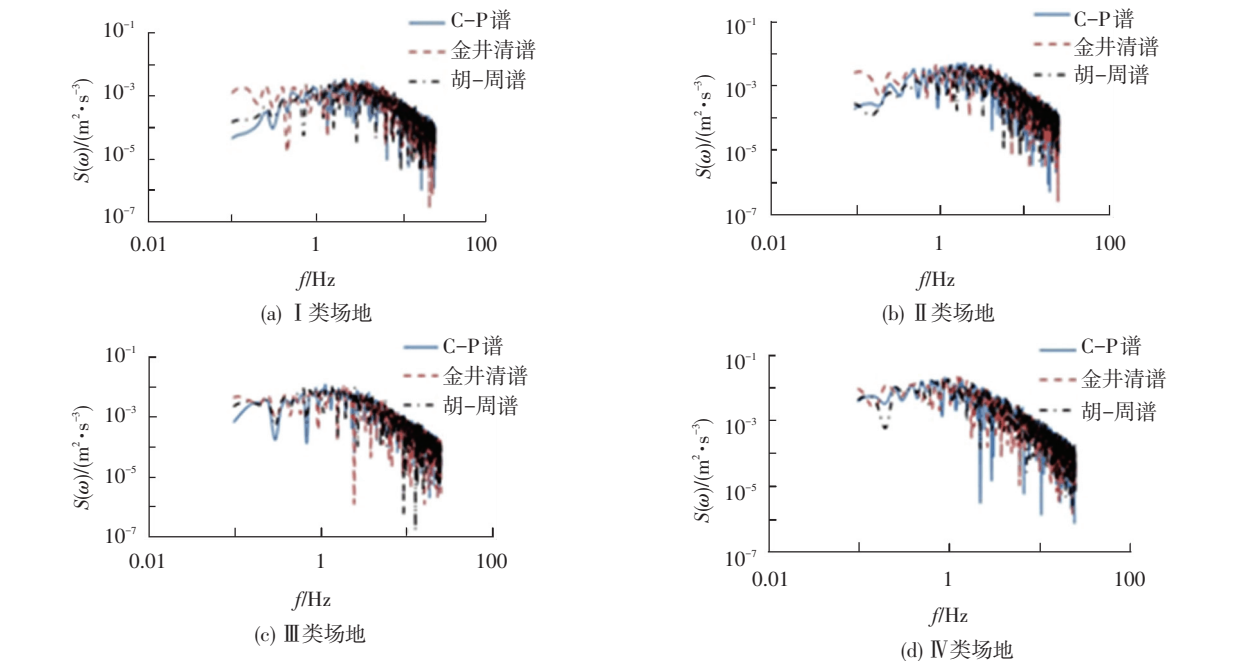


图 4 各类场地不同模型的计算功率谱对比

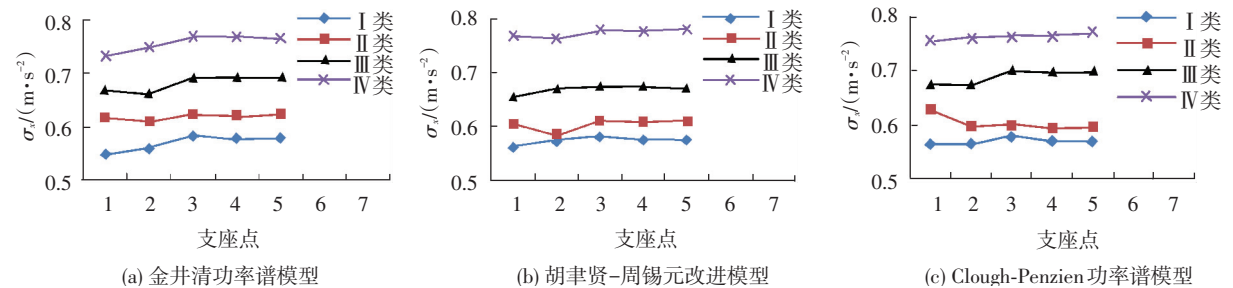


图 5 不同模型各类场地的加速度均方根值对比

4 算例验证与说明

对低频结构作地震动响应分析时,应用金井清功率谱所得响应最大,胡聿贤-周锡元改进谱

次之, Clough-Penzien 功率谱最小.为进一步验证这一结论,用软件 SAP2000 建立桥梁模型,并通过接口程序将此模型导入至 ABAQUS6.10 中进行分析计算,模型见图 6。

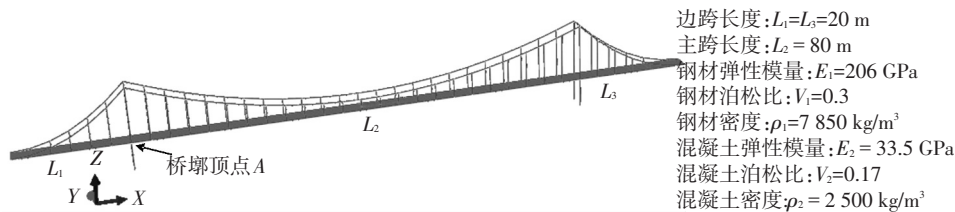


图 6 桥梁 ABAQUS 有限元模型

选用 Lanczos 法提取模态,模型前 4 阶顺桥向固有频率分别为 $f_1 = 0.603$ Hz, $f_2 = 2.479$ Hz, $f_3 = 3.154$ Hz, $f_4 = 4.831$ Hz, 均小于 5 Hz, 当桥梁在地震作用下发生振动时, 这些低阶振型对桥梁的顺桥向振动起到主要作用。

以 IV 类场地及 7.2 度的设防烈度作为研究工况, 应用多点地震动功率谱可视化程序 MEMS_b, 分别计算 3 种功率谱模型的加速度, 并将结果作为水平地震波依次加入到 ABAQUS 桥梁模型中。在后处理过程中, 选择桥墩顶点 A 点为研究对象, 作出不同功率谱模型下水平位移 D_x 的时程图及水平位移均方根 σ_x 对比图, 见图 7、8。

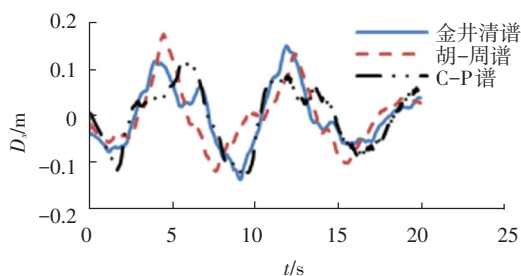


图 7 桥墩 A 点 x 向位移时程对比

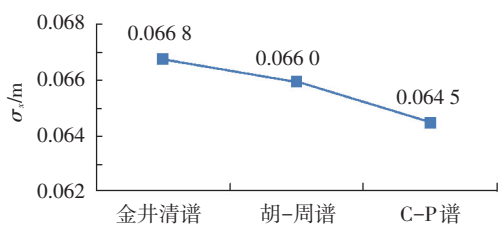


图 8 水平位移均方根对比

由图 7 可知, 虽然 3 种功率谱模型计算出的地震波并不相同, 但桥梁的水平位移的趋势基本一致。由于地震动过程中的加速度为随机荷载, 故通过位移的均方根来比较 3 种响应之间的差异, 由图 8 可知, 金井清功率谱模型所产生的水平位移均方根最大, 胡聿贤-周锡元改进模型次之, 而 Clough-Penzien 功率模型最小, 这与 3.2 节中地震动敏感性分析一致。胡聿贤-周锡元改进模型对金井清功率谱模型进行了修正, 降低了低频部分的能量; 而 Clough-Penzien 功率模型更是进行了二次过滤, 使低频能量进一步削减, 因此出现了上述结果。

5 结 论

1) 详细分析了直接转化法和逐步积分法计算结果的差异, 并明确分析了造成误差的根本原因, 进一步验证积分法的有效性。

2) 开发了可视化程序 TJU.SPSP, 程序 TJU.SPSP 操作方便、简单实用, 可直接应用于桥梁、建筑和电力设施的实际工程。进一步更新了多点地震动模拟程序 MEMS_b 至新版本, 其特点是引入上述 3 种谱参数, 相对于以往版本更直接、更方便。同时, 应用本程序所得的计算结果验证了直接法和积分法对幅值和主频带宽影响的不容忽视性, 进而强调了功率谱模型中描述低频分量参数的重要性且不应忽略, 总结了多点地震动的能量与 4 类场地、3 种功率谱模型之间在性质和量化上的关系, 从能量角度说明了上述理论分析的合理性。

3) 澄清了功率谱模型中阻尼比 ξ_g 及二层过滤阻尼比 ξ_f 的物理和数学意义, 这一点区别于以往的普遍认识。

参考文献

- [1] 田利, 李宏男. 基于《电力设施抗震设计规范》的地震动随机模型参数研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(1): 17-22.
- [2] MAHARAJ K. Stochastic characterization of earthquakes through their response spectrum [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1978(6): 497-509.
- [3] 李桂青, 曹宏, 李秋胜. 结构动力可靠性理论及其应用[M]. 北京: 地震出版社, 1993.
- [4] DAVENPORT A G. Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineering, 1994, 28: 187-196.
- [5] JTG/T B02—01—2008 公路桥梁抗震设计细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [6] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国工业出版社, 2010.
- [7] GB 50260—96 电力设施抗震设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1997.
- [8] 周艺, 韦小浩, 张陶. 地震动功率谱模型综述[J]. 中国科技信息, 2010, 24: 54-56. (编辑 赵丽莹)