

基于震源机制且考虑场地土分层差异效应的 多点地震动:理论与程序开发

柳国环^{*1,2}, 陆新征^{1,2}, 国巍^{3,4}

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084; 2. 清华大学 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084;
3. 中南大学 土木工程学院, 长沙 410075; 4. 中南大学 高速铁路建造技术国家工程实验室, 长沙 410075)

摘要:结合前人工作,首先形成了适用于我国目标场地的基于震源机制,且考虑局部场地效应的地表多点地震动具体生成途径,包括:(1)依据随机振动理论建立能够反映包含多个土层在内的局部场地整体过滤效应的传递函数,(2)基于本文改进的过滤函数而得到的适用于我国目标场地的基岩谱,进而通过分区建立局部场地的整体传递函数以反映不同场地土之间的差异性,(3)在前人工作基础上考虑了场地的非平坦性因素,(4)为了程序编制方便,给出了多土层过滤后相位角变化的显示表达式;然后,依据上述理论框架成功实现了程序 MEMS V2011.6(Multi-support Earthquake Motions Simulation Version 2011.6)的编制和可视化运行,该程序可直接生成界面图形并输出数据文件,具体功能包括:设置震源参数、分区输入土层参数、计算并显示土层传递函数、设定非平稳参数、调控频率、生成多点地震动时程、验证多点地震动间的相干性以及拟合规范(桥梁、建筑和电力设施)反应谱等;最后,以一桥梁土层为算例,利用该程序生成了目标场地基于震源机制的地表多点地震动,并分析了地表地震动对场地土和震中距因素的敏感性。本文内容具有坚实理论基础和实用性,可直接为工程提供参考。

关键词:多点地震动;基岩谱;局部场地;非平稳;规范反应谱

中图分类号:P315.9;U442 **文献标志码:**A

1 引言

土木工程领域中,事先对结构在地震作用下的反应进行分析是评估结构安全性的一种有效途径,而结构动力反应的计算结果直接依赖于地震动本身的输入。地震作为一种自然现象因其具有非确定性,从而在量化上难以被准确估计和预测。当前一种普遍采用的方法是:首先,通过统计得到地表地震动的频域内功率谱(如 Clough-Penzien 模型等);然后,通过数学方法(如谐波叠加法等)生成目标点时域内的地震动信号(如加速度时程);进而,通过拟合规范反应谱对生成的加速度信号进行调整;最后,通过积分、纠偏等方法可得到地震动的低阶信号(如位移时程)。这种方法具有简单、直接且便于实现的优点。但是由于在该流程中由频域向

时域转化首先需要的是地表功率谱,未直接涉及到震源、震源深度、震中距及基岩等更为周全的因素,因此这种方法尚不能兼顾和体现震源深度、震中距以及目标点与震源之间传递路径等因素的影响,然而这些因素是客观存在的。

为此,一个基本思路是:首先需要得到震源谱,然后再通过反映传播路径的函数过滤后(地震动由近及远传递过程中,部分高频分量会被过滤)得到基岩谱,进而由基岩谱并通过基岩上部的土层过滤而得到地表功率谱,最后可通过上述方法和步骤进一步得到时域内的信号。在这里,有必要提及的是:通过地表地震动反演到基岩位置地震动的方法,依然不能涉及到震源深度、震中距等震源参数客观因素的影响。目前,国外已有考虑震源谱和路径效应相应方面的研究:典型震源谱有 Brune 谱^[1,2]、Atkinson 双拐点谱^[3,4]、Masuda 谱^[5]以及改进的 Masuda 谱^[6];文献[7,8]描述了地震动传播过程中高频成分衰减的过滤函数。然而,这些记载都是基于国外资料而得到的。因此,为了能够适用于我国目标场地,文献[9]借鉴了上述基岩地震谱表达式,基于我国基岩地震动资料修正了并给出了高频段

收稿日期:2011-09-26;修改稿收到日期:2012-01-03.

基金项目:国家自然科学基金重点基金(90815025);国家自然科学基金(51178249,50938008,51108466);中国博士后科学基金(2011M500332)资助项目.

作者简介:柳国环*(1980-),男,博士,助理研究员(E-mail: carecivil@sina.com);
陆新征(1978-),男,博士,副教授;
国巍(1982-),男,博士,讲师.

过滤函数,进而得到了适用于我国目标场地的基岩地震谱。进一步,由震源功率谱和改进的适用于我国的高频过滤函数,可以得到适用于我国的基岩功率谱;但是,在得到基岩功率谱的前提下,还需要由基岩功率谱通过上部土层向地表过滤得到地表功率谱,而场地土具有多层分层现象而且地表往往不是平坦的,这时充分考虑多种影响因素的多土层过滤效应以及给出明确的相应表达公式来反映和描述这些客观现象是十分必要的。

基于这一出发点,并为了给工程实际提供参考,本文的进一步研究涉及到如下几项具体内容:(1)依据随机振动理论导出了能够反映包含多个土层过滤效应的传递函数,然后基于本文作者改进的过滤函数,得到适用于我国目标场地的基岩地震谱,进而通过分区建立局部场地的整体传递函数反映了不同场地土之间的差异性。同时在前人工作基础上考虑了场地的非平坦性因素,此外还给出多土层过滤后相位角变化的显示表达式,由此形成了如图2所示的适用于我国目标场地基于震源机制且考虑局部场地效应的多点地震动的具体生成途径;(2)基于这一理论框架,进一步开发实现了可视化程序,并成功运行;(3)以某大跨桥梁为算例,采用该程序生成目标场地的地表多点地震动,研究了震源参数和场地过滤效应这两种因素对多点地震动的影响。

2 基于震源机制的多点地震动生成框架及其理论表达式

2.1 适用于我国的基于震源机制的多点地震动生成框架

图1为坐落在基岩上的局部场地具有非等高差的多土层示意图,图1以三个不同局部场地区

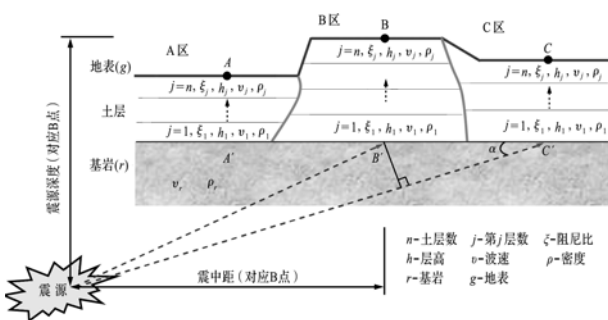


图1 坐落在基岩的非等高差多土层示意图
Fig.1 Sketch of non-flat with multi-layered soil located on rock

为例,相应参数的物理意义如图1所示。基于震源机制,且考虑局部场地效应的生成多点地震动框架如图2所示。从图2可以看出,本文在文献[9]中借鉴了已有基岩地震功率谱表达形式,基于我国基岩地震动记录修正了高频段过滤函数,从而得到了适用于我国目标场地的基岩地震谱,该项工作为本文围绕如图2所示“土层过滤”中进一步研究的相关内容奠定了必要性基础。同时,在前人工作基础之上兼顾了局部场地之间高差因素的影响。随文回顾了生成地震动所需要的理论表达式,该部分内容在后文程序编制中将被采用。

2.2 分区建立多土层过滤效应的传递函数

如图1所示,考虑地震动由基岩向地表逐层传递,各土层参数是不相同的。设基岩处地震动功率谱为 $S_r(\omega)$, 经过第1~第n层过滤后的功率谱为 $S_n(\omega)$, 整体土层的传递函数为 $H_g^B(i\omega)$ (以B区为例), 每一分层土的传递函数为 $H_j^B(i\omega)$ 。这时,波由基岩经过各土层逐层向上传递,依据随机振动理论,地表功率谱 $S_g^B(\omega)$ 可表示如下。

当 $n=1$ 时:

$$S_g^B(\omega) = |H_n^B(i\omega)|^2 \times S_{n-1}(\omega) = |H_g^B(i\omega)|^2 \times S_r(\omega) \quad (1a)$$

$$|H_g^B(i\omega)|^2 = |H_1^B(i\omega)|^2, S_{n-1}(\omega) = S_r(\omega) \quad (1b)$$

当 $n \geq 2$ 时:

$$S_g^B(\omega) = |H_n^B(i\omega)|^2 \times S_{n-1}(\omega) = |H_n^B(i\omega)|^2 \times |H_{n-1}^B(i\omega)|^2 \times S_{n-2}(\omega) = \dots = |H_g^B(i\omega)|^2 \times S_r(\omega) \quad (2a)$$

$$|H_g^B(i\omega)|^2 = |H_n^B(i\omega)|^2 \times \dots \times |H_j^B(i\omega)|^2 \times \dots \times |H_1^B(i\omega)|^2 = \prod_{j=1}^n |H_j^B(i\omega)|^2 \quad (2b)$$

式中,当以A或C区为例时,式(1,2)中的上标B相应地表示为A或C,以下同。

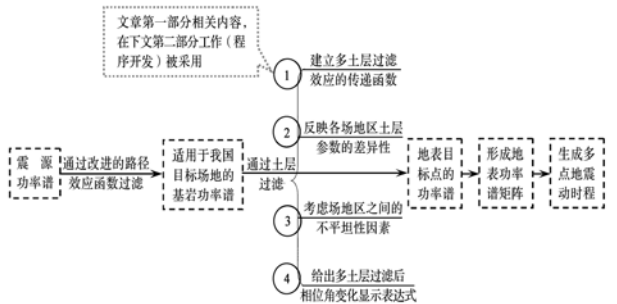


图2 震源机制且考虑局部场地效应的多点地震动生成框架
Fig.2 Framework for generating multi-point earthquake motions based on focal mechanism and considering local site effect

2.3 场地土不平整因素的考虑

基于文献[10,11],每一层土的传递函数(以 $H_j^B(i\omega)$ 为例)可由下式计算。

$$H_j^B(i\omega) = \frac{(1 + \gamma_j^B - i\xi_j^B)e^{-i\omega\tau_j^B(1-2\xi_j^B)}}{1 + (\gamma_j^B - i\xi_j^B)e^{-i\omega\tau_j^B(1-2\xi_j^B)}} \quad (3)$$

式中 ξ_j^B 表示 B 区第 j 土层的由于波传递能量耗散的阻尼比,且

$$\gamma_j^B = \begin{cases} (\rho_r v_r - \rho_j^B v_j^B) / (\rho_r v_r + \rho_j^B v_j^B), j = 1 \\ (\rho_{j-1}^B v_{j-1}^B - \rho_j^B v_j^B) / (\rho_{j-1}^B v_{j-1}^B + \rho_j^B v_j^B) \\ j = 2, \dots, n \end{cases} \quad (4a)$$

$$\tau_j^B = h_j^B / v_j^B \quad (4b)$$

式中 ρ_r 和 ρ_j 分别表示基岩和第 j 土层的密度, τ_j 和 v_j 分别为地震波在第 j 土层的厚度传播时间和传播波速, h_j 为以及第 j 土层的厚度,相应上标同样表示 B 区。

应该说明:式(4)反映了各区的土层厚度因素 h_j^B , 分别代入式(1)或式(2)中,则可以考虑场地的不平整因素。因此,只要涉及到式(3)的传递函数,就可引入土层厚度对场地不平整因素的影响,本文 2.4 节以及最后的地震动生成中会有相应体现。

2.4 多土层过滤后相位变化显示表达式的给出

不失一般性:根据文献[11],当考虑地震动入射角 α 时,基岩处任意 B' 和 C' 两点的相干函数为

$$\gamma_{B'C'}(i\omega) = |\gamma_{B'C'}| \cdot e^{-i\omega d_{B'C'} \cos \alpha / v_r} \quad (5)$$

式中 $d_{B'C'}$ 表示 B' 和 C' 两点的水平距离,而且有

$$|\gamma_{B'C'}| = e^{-\beta \omega d_{B'C'}^2 / v_r}, \beta = 0.02 \quad (6)$$

根据文献[11]并由随机振动理论可知,地表 B 和 C 两点(以 B、C 两点为例)的相干函数可表示为

$$\begin{aligned} \gamma_{BC}(i\omega) &= \frac{S_{BC}(i\omega)}{\sqrt{S_B(\omega) \times S_C(\omega)}} \\ &= \frac{\gamma_{B'C'}(i\omega) [H_g^B(i\omega) H_g^{C*}(i\omega) S_r(\omega)]}{\sqrt{[|H_g^B(i\omega)|^2 S_r(\omega)] [|H_g^C(i\omega)|^2 S_r(\omega)]}} \\ &= \frac{H_g^B(i\omega) \times H_g^{C*}(i\omega) \gamma_{B'C'}(i\omega)}{|H_g^B(i\omega)| \times |H_g^C(i\omega)|} \\ &= \left[\frac{H_g^B(i\omega)}{|H_g^B(i\omega)|} \right] \times \left[\frac{H_g^{C*}(i\omega)}{|H_g^C(i\omega)|} \right] \times \gamma_{B'C'}(i\omega) \end{aligned} \quad (7)$$

式中

$$\frac{H_g^B(i\omega)}{|H_g^B(i\omega)|} = \cos[\theta_B(\omega)] + i \sin[\theta_B(\omega)] = e^{i\theta_B(\omega)} \quad (8a)$$

$$\frac{H_g^{C*}(i\omega)}{|H_g^C(i\omega)|} = \cos[\theta_C(\omega)] - i \sin[\theta_C(\omega)] = e^{-i\theta_C(\omega)} \quad (8b)$$

式中 $\theta_B(\omega)$ 与 $\theta_C(\omega)$ 表示地震波分别由基岩通过 B 区和 C 区整体土层过滤到地表后的相位改变,不同频份 ω 对应的改变量不同,其表现为 ω 的函数,并与各区具体分层土的参数有关。经过各分层过滤后到达地表的 $\theta_B(\omega)$ 与 $\theta_C(\omega)$ 显式表达式为

$$\theta_B(\omega) = \text{The} \left[\prod_{j=1}^n H_j^B(i\omega) \right] = \sum_{j=1}^n \theta_j^B(\omega) \quad (9a)$$

$$\theta_C(\omega) = \text{The} \left[\prod_{j=1}^n H_j^C(i\omega) \right] = \sum_{j=1}^n \theta_j^C(\omega) \quad (9b)$$

式中,符号 The 表示 λ 的相位角, $\theta_j^B(\omega)$ 与 $\theta_j^C(\omega)$ 分别表示 B 区和 C 区第 j 土层的相位角。由式(3,9)并根据复数知识,有

$$\theta_j^B(\omega) = \tan^{-1} \left[\frac{-\xi_j^B}{1 + \gamma_j^B} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{e^{2\omega\tau_j^B} \xi_j^B \sin(\omega\tau_j^B) - \xi_j^B}{e^{2\omega\tau_j^B} \xi_j^B \cos(\omega\tau_j^B) + \gamma_j^B} \right] \quad (10a)$$

$$\theta_j^C(\omega) = \tan^{-1} \left[\frac{-\xi_j^C}{1 + \gamma_j^C} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{e^{2\omega\tau_j^C} \xi_j^C \sin(\omega\tau_j^C) - \xi_j^C}{e^{2\omega\tau_j^C} \xi_j^C \cos(\omega\tau_j^C) + \gamma_j^C} \right] \quad (10b)$$

式(10)即为经过第 j 土层过滤后相位角的变化量值表达式。分别代入式(9)后即可直接得到由基岩经过整个土层后相位角的总变化,这点在编制程序时将用到。

2.5 由频域生成时域信号

联合式(1~4)可以得到地表功率谱(自谱),联合式(5~10)可以得到地表两点间的相干函数,从而得到地表互功率谱,进而可形成地表目标点的功率谱矩阵 $S_g(i\omega)$,即

$$S_g(i\omega) = \begin{bmatrix} S_g^A(\omega) & S_g^{AB}(i\omega) & S_g^{AC}(i\omega) \\ & S_g^B(\omega) & S_g^{BC}(i\omega) \\ \text{sym}^{T*} & & S_g^C(\omega) \end{bmatrix} = H(i\omega) H^{T*}(i\omega) \quad (11)$$

式中 $H(i\omega)$ 和 $H^{T*}(i\omega)$ 表示下三角矩阵及其转置的共轭。具体相关内容与计算模型问题可参考文献[12-16]。

3 可视化程序实现及其功能

3.1 程序实现与操作界面简述

基于上述基于震源机制多点地震动生成理论和思路,完成了程序编制与可视化运行,本节对此作简要介绍。程序主要流程与操作步骤如图 3 所示,相应操作界面如图 4 所示。

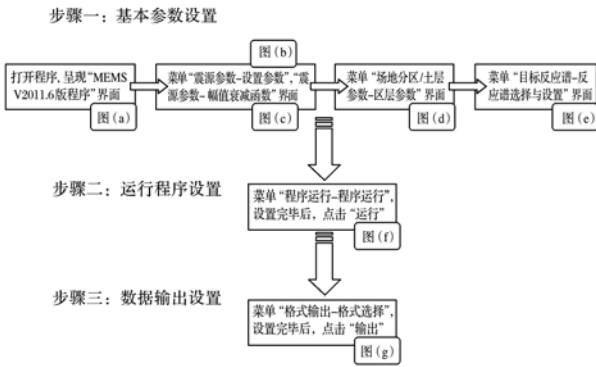


图3 程序 MEMS V2011.6 操作流程
Fig. 3 Operation flowchart of program MEMS V2011.6

程序 MEMS V2011.6 功能,可通过点击菜单中“功能介绍”显示,界面如图 4(h)所示。功能主要包括(1)模拟基于震源机制的地表多点地震动;(2)考虑场局局部场地间差异性、行波效应和相干效应;(3)考虑场地目标点之间的非等高差效应,即

不平坦性;(4)考虑场地土各区域内各土层材料间的差异性;(5)拟合规范反应谱^[17-20]、目标功率谱和相干函数;(6)输出结果的 Excel 和 Txt 格式文件,并以图形显示。

3.2 结果图形显示与说明

点击图 4(c,d,f)中的设置的不同显示按钮,可以得到相应结果的图形曲线如图 5 所示,以查阅和判断结果的合理性与可靠性。图 4(c)中“基岩谱显示”按钮显示图 5(a,b),图 4(d)中“出图显示”按钮显示图 5(c,d),图 4(f)中“加速度时程”、“功率谱验证”、“相干性”以及“反应谱拟合”4 个按钮对应图 5(e,f,g,h)。

应该说明,图 5(f)的目标谱是由基岩功率谱经由整体土层传递而得到的地表功率谱,而不同于传统方法中事先选定的地表功率谱。

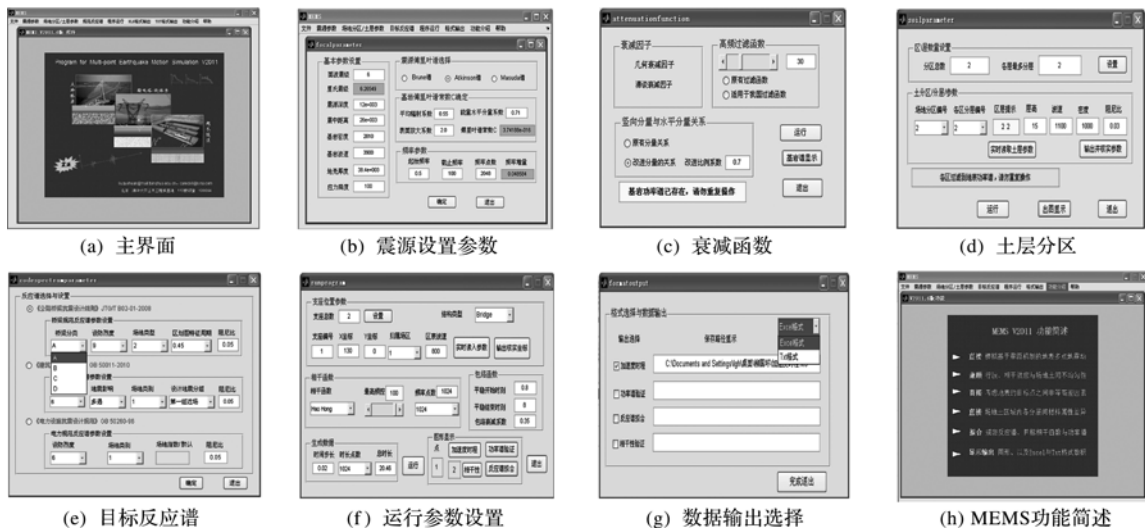


图4 MEMS V2011.6 功能及其用户界面
Fig. 4 Functions and its user interface of MEMS V2011.6

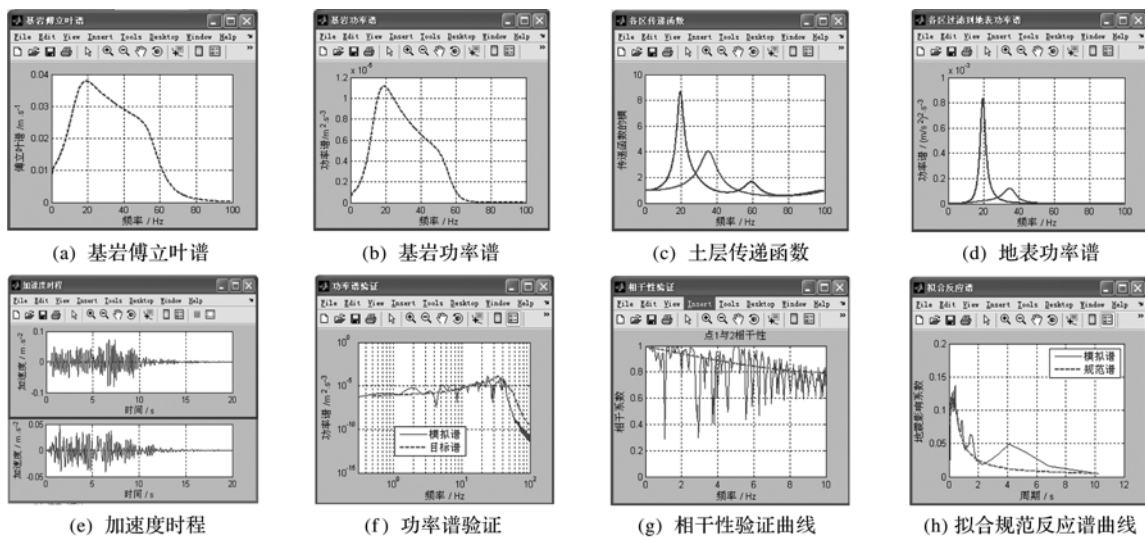


图5 MEMS V2011.6 结果图形显示
Fig. 5 Graphic display of results using MEMS V2011.6

4 算例分析

本节以某桥梁地址条件的算例为研究对象,如图6所示,场地参数见表1。地壳厚度根据文献[21]取为38400 m,基岩密度和波速分别为2810 kg/m³和3900 m/s。考察了各区之间整体土层传递函数与地表功率谱的差异,如图7所示。此外,还对8级地震作用下地表支座处的地震动,对震源深度(9 km)及其相应的两种震中距(11 km和12 km)

表1 各区土层和风化岩几何与材料参数

Tab.1 Geometric and material parameters of soil or weathered rock layers of each zone

编号	I (共4层)				II (共2层)		III (共3层)		
	1	2	3	4	1	2	1	2	3
<i>h</i>	28	16	10	5	16	6	25	18	8
ρ	2.1	2.0	1.8	2.0	2.0	2.0	2.2	2.0	2.0
<i>v</i>	1.70	1.30	0.77	0.55	0.90	0.35	1.60	0.80	0.35
ξ	3.00	3.00	5.00	5.00	5.00	5.00	3.00	0.05	0.05

注:*h*为层高/m, ρ 为密度($10^3 \times \text{kg/m}^3$),*v*为波速($10^3 \times \text{m/s}$), ξ 为阻尼比(10^{-2})。

的敏感性进行比较,如图8所示。

从图7(a)可以看出,各区土层的传递函数区别比较明显,体现了传递路径中土层之间差别;从图7(b)可以看出,地表功率谱之间的差异性,由此可以说明传统模拟地表多点地震动方法中采用同一地表功率谱(目标谱)的欠全面性。由图8可知,容易发现震中距相差为1 km,峰值发生时间相差为4.9 s。

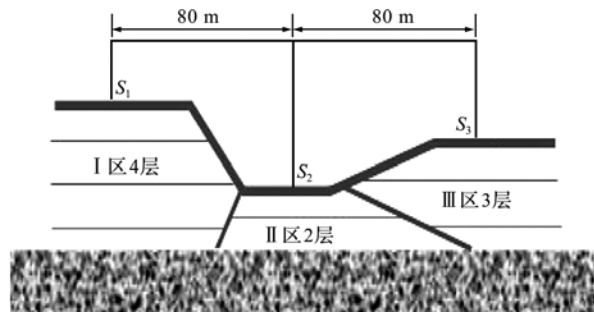
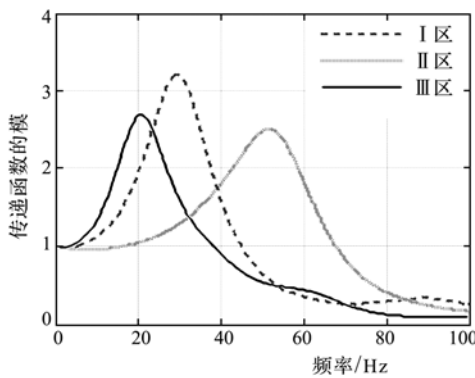
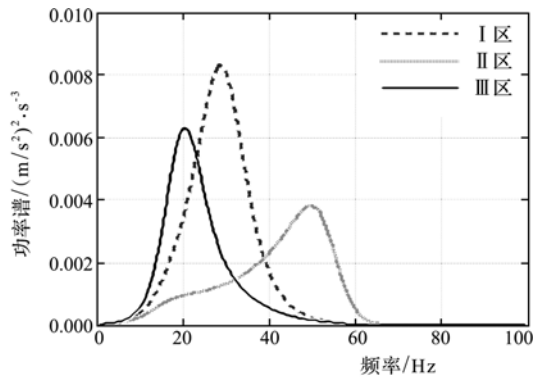


图6 算例图示与参数

Fig.6 Graphical display of model and relevant parameters



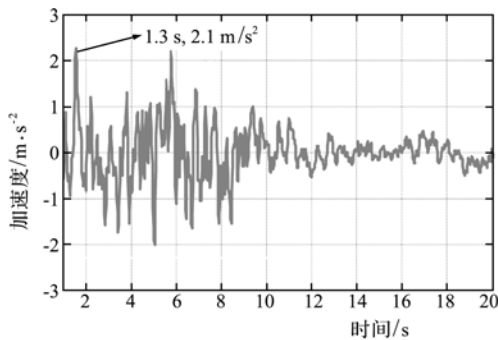
(a) 传递函数



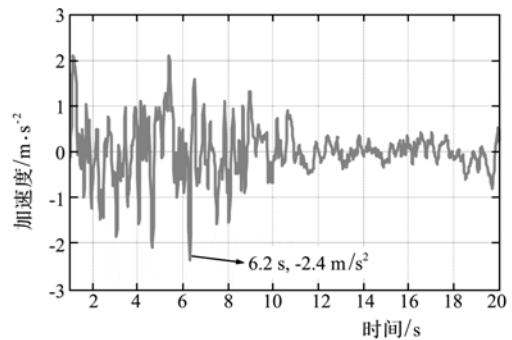
(b) 地表功率谱

图7 传递函数与功率谱

Fig.7 Transfer function and power spectrum density



(a) 震中距11.0 km



(b) 震中距12.0 km

图8 不同震中距对地表加速度对比曲线

Fig.8 Comparison of ground acceleration under different epicentral distance

5 结 语

鉴于结构地震反应的计算结果直接依赖于地震动输入,本文围绕基于震源机制且考虑场地土差异效应的多点地震动具体生成途径、可视化程序开发以及地表地震动对相关参数的敏感性三方面进行了研究,本文具体工作如下。

(1) 推导并给出了能够反映包含多个土层过滤效应的传递函数。基于本文改进的过滤函数而得到适用于我国目标场地的基岩地震谱,进而通过分区建立的局部场地整体传递函数反映了不同场地土之间的差异性。由此,结合前人工作并在其基础之上形成了适用于我国目标场地的基于震源机制,且考虑场地土差异效应的多点地震动的具体生成途径。

(2) 实现开发了可视化的基于震源机制多点地震动程序 MEMS V2011.6,并给出了操作流程图和具体功能显示。

(3) 通过数值算例分析,进一步强调了地表地震动受震源参数和场地土条件影响的敏感性及不容忽视性。

本文内容涉及到理论原理和实用软件工具的开发,可为工程提供参考。

参考文献(References):

- [1] Brune J N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from Earthquakes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, **75**(26):4997-5009.
- [2] Brune J N. Correction[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, **76**(20):5002.
- [3] Atkinson G M. Earthquake source spectra in eastern North America[J]. *Bulletin of Seismological Society of America*, 1993, **83**(6):1778-1798.
- [4] Atkinson G M, BOORE D M. Ground-motion relations for eastern North America[J]. *Bulletin of Seismological Society of America*, 1995, **85**(1):17-30.
- [5] Masuda T. Scaling Relations for Source Parameters of Microearthquakes in the Northeastern Part of Japan [D]. Tohoku University, Senda City, Japan, 1982.
- [6] 王国新. 强震地震动衰减研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所, 2001. (WANG Guo-xin, A Study on Strong Ground Motion Attenuation[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics of China Seismological Bureau, 2001. (in Chinese))
- [7] Hao H, Gaull B A. Prediction of seismic ground motion in Perth Western Australia for engineering application[A]. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering[C]. Vancouver, Canada, August 2004, 1892.
- [8] Atkinson G M. Earthquake source spectra in eastern North America[J]. *Bulletin of Seismological Society of America*, 1993, **83**(6):1778-1798.
- [9] 柳国环, 陆新征. 基岩地震谱与地震动位移输入的土-结构相互作用(SSI)计算模型改进[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, **30**(5):884-892. (LIU Guo-huan, LU Xin-zheng. Spectra of bedrock earthquake motion and improvement of soil-structure interaction(SSI) calculation model for seismic displacement inputting[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, **30**(5):884-892. (in Chinese))
- [10] Safak E. Discrete-time analysis of seismic site amplification[J]. *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 1995, **121**(7):801-809.
- [11] Hao H, Chou N. Modelling of earthquake ground motion spatial variation on uneven sites with varying soil conditions[A]. The Ninth International Symposium on Structural Engineering for Young Experts[C]. August:18-21, 2006, Fuzhou, Xiamen, China.
- [12] 柳国环, 李宏男, 田利. 九江长江大桥在多点多维地震激励下的反应分析[J]. *振动与冲击*, 2009, **28**(9):204-209. (LIU Guo-huan, LI Hong-nan, TIAN Li. Response analysis of JIUJING Yangtze River highway bridge under spatially variable earthquake ground motions[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, **28**(9):204-209. (in Chinese))
- [13] 田玉基, 杨庆山. 地震地面运动作用下结构反应的分析模型[J]. *工程力学*, 2005, **22**(6):170-174. (TIAN Yu-ji, YANG Qing-shan. Analysis models and methods for structural seismic responses[J]. *Engineering Mechanics*, 2005, **22**(6):170-174. (in Chinese))
- [14] 柳国环, 李宏男, 林海. 结构地震响应计算模型的比较与分析[J]. *工程力学*, 2009, **26**(2):10-15. (LIU Guo-huan, LI Hong-nan, LIN Hai. Model comparison and analysis for structural seismic responses[J]. *Engineering Mechanics*, 2009, **26**(2):10-15. (in Chinese))
- [15] 柳国环, 李宏男, 国巍. 求解结构地震响应位移输入模型存在的问题及其 AMCE 实效对策[J]. *计算力学学报*, 2009, **26**(6):862-869. (LIU Guo-huan, LI Hong-nan, GUO Wei. Existing problem of displacement input model for calculating structural responses under earthquake ground motion and its an actual effective solution method called AMCE [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2009, **26**(6):862-869. (in Chinese))
- [16] 柳国环, 李宏男, 国巍, 等. 求解结构地震响应位移输入模型中存在问题的一种新解决方法[J]. *工程力*

- 学,2010,**27**(9):55-62. (LIU Guo-huan, LI Hong-nan, GUO Wei, et al. A new method for solving existing problem of current displacement input model for calculating structural seismic responses [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, **27**(9):55-62. (in Chinese))
- [17] 重庆交通科研设计院.《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/T B02-01-2008)[S]. 人民交通出版社,2008. (Chongqing Communications Research and Design Institute, Guidelines for Seismic Design of Highway Bridges (JTG/T B02-01-2008) [S]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese))
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部.《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)[S]. 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 Buildings (GB 50011-2010) [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010. (in Chinese))
- [19] 中华人民共和国电力工业部.《电力设施抗震设计规范》(GB 50260-96)[S]. 中国计划出版社,1996. (Ministry of Power Industry of the People's Republic of China. Code for Design of Seismic of Electrical Installations (GB 50260-96) [S]. Beijing: China Planning Press, 1996. (in Chinese))
- [20] 田利,李宏男.基于《电力设施抗震设计规范》的震动随机模型参数研究[J]. 防灾减灾工程学报,2010,**30**(1):18-22. (TIAN Li, LI Hong-nan. Parameter study on seismic random model based on code for design of seismic of electrical installation[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2010, **30**(1):18-22. (in Chinese))
- [21] 黄少鹏.我国大陆地区大地热流与地壳厚度的变化[J]. 地球物理学报,1992,**35**(4):441-450. (HUANG Shao-peng. Variations of heat flow and crustal thickness in the continental area of China[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1992, **35**(4):441-450. (in Chinese))

Multi-point seismic motions based on focal mechanism and considering local site multi-layer soil effect: theory and program implementation

LIU Guo-huan^{*1,2}, LU Xin-zheng^{1,2}, GUO Wei^{3,4}

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Department of Civil Engineering, Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

4. National Engineering Laboratory for High Speed Railway Construction, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: In this paper, a framework for generating multi-point earthquake motion of target filed in China, basing on focal mechanism and taking account of the spatial variability of soil properties, is given and proposed. The main contents include: (1) the transfer function of site including multiple soil layers is established based on random vibration theory, (2) based on the improved bedrock spectrum applicable to the target site in China, the variability among different site condition is reflected by establishing the transfer function of local site, (3) non-flat factor of site surface is considered on the basis of previous literature, (4) explicit expression phase-angle change by the filtration of multiple soil layers is also given for the convenience of the subsequent program code. Then, according to the theory framework, the visual program MEMS V2011.6 (Multi-support Earthquake Motions Simulation Version 2011.6) is developed and run successfully. The specific functions of the program involves the focal parameters assignment, inputting soil parameters, calculating and displaying transfer function of site soil with multi-layer, adjusting non-stationary parameters and frequency, generating multi-point earthquake motion histories, verifying the coherence of spatial seismic motions, fitting code-specified spectrum for bridge, building and electronic facility. In addition, based on a bridge example, the multi-point seismic motions of the target field are generated using the program MEMS V2011.6, and the sensibility analysis of the generated ground motions to local site effect and epicentral distance is analyzed as well. The content in this paper involve theory and practicability, and can provide directly reference for engineering.

Key words: multi-point earthquake motion; beck-rock spectrum; local soil site; non-stationary; code-specified response spectrum