

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220822005

基于修正随机有限断层法的沉积盆地地震动模拟*

刘中宪^{1,2}, 周健², 李程程^{1,2}, 孟思博^{2,3}

(1. 天津城建大学天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384; 2. 天津城建大学 天津 300384; 3. 天津市土木建筑结构防护与加固重点实验室, 天津 300384)

摘要: 基于随机有限断层法理论框架, 采用间接边界元方法求解沉积盆地地震动放大效应, 以此修正场地放大因子, 发展了一种可考虑盆地效应的修正随机有限断层法。基于该方法, 模拟了2021年2月13日日本 $M_w7.1$ 海域地震中日本关东盆地地震反应, 并与常规随机有限断层法及实测地震记录进行了对比。结果表明: 与常规随机有限断层法相比, 采用修正随机有限断层法模拟盆地地震动表现出更显著的空间变异性, 盆地边缘地震动峰值加速度较常规方法放大了6.24倍, 与实测地震记录吻合度更高; 区域地震动峰值加速度空间分布整体特征与实测地震记录基本一致; 相较于不考虑场地影响下的结果盆地内部分台站长周期下的谱加速度值扩大了近5倍, 表明深厚沉积盆地在长周期范围内的场地放大更加明显。

关键词: 间接边界元法; 修正随机有限断层法; 盆地效应; 关东盆地

中图分类号: P642.2; TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)05-0999-10

Seismic Simulation of Sedimentary Basin Based on Modified Stochastic Finite Fault Method

LIU Zhongxian^{1,2}, ZHOU Jian², LI Chengcheng^{1,2}, MENG Sibob^{2,3}

(1. Tianjin ChengJian University, Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Properties and Engineering Environment, Tianjin 300384, China; 2. Tianjin Urban Construction University, Tianjin 300384, China; 3. Tianjin Key Laboratory of Civil Building Structure Protection and Reinforcement, Tianjin 300384, China)

Abstract: Through the indirect boundary element method, the amplitude amplification factor spectrum of each observation point on different sedimentary basins is obtained, and based on this, a random finite fault method ground motion simulation considering the influence of basin topography is proposed. Using this method, this research simulates and studies the seismic response of internal and external stations in Japan's Kanto basin to the $M_w7.1$ sea area earthquake in Japan on February 13, 2021. It is found that the two simulation results will be quite different with and without topographic amplification. If only the amplification effect of soil layer is considered, the simulated peak acceleration of each station only decreases with the increase of epicentral distance. However, generally speaking, the difference between them is not obvious. After considering the influence of basin, such as edge effect and

* 收稿日期: 2022-08-22; 修回日期: 2022-10-25

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目(U2139208)、中国地震局地震工程与工程振动重点实验室重点专项(2020EEVL0302)、国家自然科学基金项目(52008287, 51968015)资助

作者简介: 刘中宪(1982—), 男, 教授, 博士后。主要从事地震工程、工程防护等方面的研究。E-mail: zhongxian1212@163.com

通讯作者: 李程程(1987—), 女, 讲师, 博士。主要从事岩土工程抗震方面的研究。E-mail: lichengcheng113@126.com

focusing effect, the difference in simulated peak acceleration of each station will be very different, in which CHB001 station is amplified by about 6.24 times. When comparing the measured records of the station with the simulated data, the results show good agreement. It indicates that when using the random finite fault method to simulate ground motion, the amplification effect of the site soil layer and the terrain of the observation point on the peak ground motion acceleration should be comprehensively considered, and the results obtained are more authentic.

Keywords: indirect boundary element method; stochastic finite fault method; basin effect; Kanto basin

0 引言

1985年墨西哥地震、2008年汶川地震等多次地震震害调查表明:沉积盆地对地震动具有显著影响,主要表现为盆地边缘效应和聚焦效应,导致盆地之上的许多大中城市在地震中震害十分严重^[1-2]。因此,发展高烈度区域沉积盆地全过程地震动模拟预测方法对于盆地地区防震减灾工作意义重大。

地震动模拟总体上分为两类,即确定性模拟方法和随机性模拟方法。确定性方法包括经验格林函数法^[3-4]、波函数展开法^[5-8]、有限元法^[9-10]、有限差分法^[11]、边界元法^[12-13]和谱元法^[14-17]等。确定性方法得出的解更加精确,可以更好地展现不同场地对地震动的反应;随机性方法包括随机点源法和随机有限断层法^[18-25],其中随机点源法适用于小震远场地震动的构建;随机有限断层法又可以分为基于静力学拐角频率的有限断层法(FINSIM)和基于动力学拐角频率的有限断层法(EXSIM),前者的模拟结果强烈依赖于子断层尺寸,为了保证地震矩守恒,有些子断层通常需要触发多次,并且在模拟过程中,需要对子断层的尺寸进行严格控制;后者则是以变化的拐角频率为基础,通过添加高频标定因子来保证整个地震远场辐射能守恒。

相较于其他确定性地震动模拟方法,随机性方法更符合地震动的特性,且由于随机有限断层法具有模拟精度高、计算成本低的优点,被广泛应用于大尺度地震动模拟中^[20-23]。然而,随机有限断层法中采用场地土层放大因子和高频衰减项考虑近地表场地效应,是一种基于统计数据和一维波动理论的半经验半理论模型,可考虑近地表土层在深度方向上的不均匀性,但是对于具有水平方向非均匀介质的局部复杂场地(如盆地)对地震波的散射及其引起的地震动空间差异性无法准确刻画。

鉴于此,本文以2021年2月13日的日本7.1级海域地震为例,采用间接边界元法求解目标盆地地震动放大系数,对随机有限断层法中的场地放大因子进行修正。通过与常规随机有限断层法、实测数据对比,验证了本文方法的适用性和准确性。本文为沉积盆地全过程地震动模拟提供了新的思路。

1 计算模型

1.1 关东盆地地形及计算模型

关东盆地位于日本本州岛中南部,其北、西为山地,东边太平洋沿岸有一些丘陵,从山地发育形成的利根川和荒川等河流水系,往东、南流向太平洋和东京湾,如图1所示。长期的水流冲刷携带大量泥砂流向东京湾,在山地和东京湾之间形成关东平原,由图1可知,关东盆地主要存在两个凹陷沉积域^[26],以此为依据建立的关东盆地边界元模型如图2所示,将外部区域(D_1)和沉积盆地(D_2)均假设为各向同性弹性半空间,区域 D_1 和 D_2 交界面设为 K 。半空间介质 D_1 的剪切模量、泊松比和密度分别为 μ_1 、 ν_1 和 ρ_1 ,沉积盆地 D_2 材料特性相应为 μ_2 、 ν_2 和 ρ_2 。 α_1 、 β_1 为半空间中纵波和横波波速, α_2 、 β_2 为沉积河谷介质纵波和横波波速。设基岩凹陷总宽为 W ,沉积盆地的最深深度为 H ,为考察盆地的边缘效应和聚焦效应,在地表设置了A、B、C、D、E、F、G共7个观测点。

1.2 随机有限断层模型

据日本气象厅正式测定,2月13日22时8分在日本海域发生7.1级地震,震源深度60 km,震中位于北纬 37.7° ,东经 141.8° ,根据美国地质勘探局(USGS)给出的有限断层的长宽和子断层滑移数据,建立随机有限断层模型,位置与滑移分布如图1及图3所示。

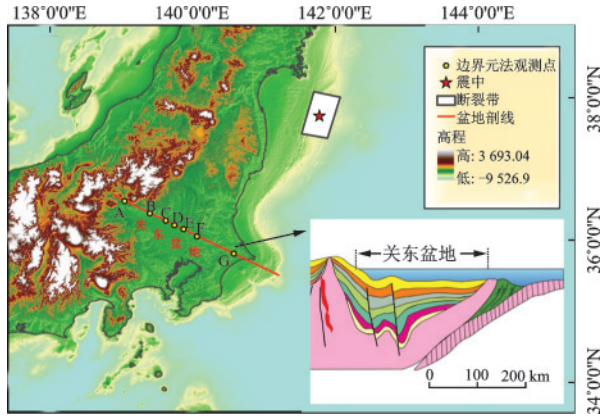


图1 关东盆地地形及剖面图(茆书巍等,2017)

Fig.1 Elevation and profile map of the Kanto basin(Mao, et al.,2017)

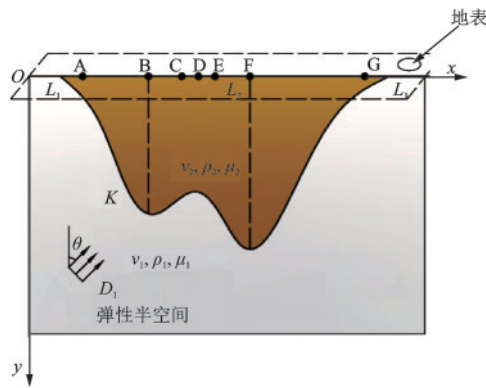


图2 边界元模型

Fig.2 Boundary element model

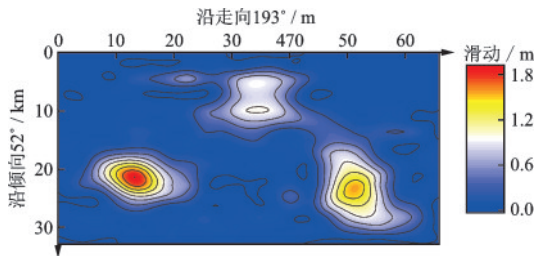


图3 断层滑移分布图

Fig.3 Slip distribution map of fault

由图3可知,有限断层尺寸为 $66\text{ km}\times 33\text{ km}$ 矩形模型,本文对此划分分子断层,子断层尺寸 $3\text{ km}\times 1.83\text{ km}$,共分成 22×18 个子断层。子断层面上主要有3个凹凸体,其中最大的凹凸体滑移量为 1.897 m 。

2 计算方法

2.1 沉积盆地地震动放大系数

沉积盆地计算模型如图2所示。采用间接边界

元法构建基岩半空间和沉积盆地地震波场,利用沉积盆地和半空间交界面 K 上的位移连续性和应力连续以及地表零应力条件建立方程求解虚拟波源密度,进而得到各部分散射场。

2.1.1 基岩半空间波场构建

首先进行波场分离,基岩弹性半空间 D_1 的总位移和应力场表达式为:

$$\begin{aligned} u_i^{(t,1)}(x) &= u_i^{(f,1)}(x) + u_i^{(s,1)}(x), x \in D_1 \\ \sigma_i^{(t,1)}(x) &= \sigma_i^{(f,1)}(x) + \sigma_i^{(s,1)}(x), x \in D_1 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $u_i^{(f,1)}$ 、 $\sigma_i^{(f,1)}$ 分别表示平面波入射下自由场 i 向位移和应力; $u_i^{(s,1)}$ 、 $\sigma_i^{(s,1)}$ 分别表示散射场 i 向位移和应力。

根据单层位势理论, D_1 域内散射场由虚拟波源面 S_1 上分布的虚拟波源构造(图2),且 $S_1 = \{\Gamma_1 \cup \Omega_1\}$ 。相应位移和应力表达式为:

$$\begin{aligned} u_i^{(s,1)}(x) &= \int_{S_1} \phi_j^{(s,1)}(y) G_{ij}^{(s,1)}(x, y) dS_y \\ \sigma_i^{(s,1)}(x) &= -0.5\phi_j^{(s,1)}(x) + \int_{S_1} \phi_j^{(s,1)}(y) T_{ij}^{(s,1)}(x, y) dS_y \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $x \in D_1$, $y \in S_1$; $\phi_j^{(s,1)}(\cdot)$ 为基岩半空间的波源密度; $G_{ij}^{(s,1)}(\cdot)$ 和 $T_{ij}^{(s,1)}(\cdot)$ 分别为基岩半空间的位移和应力格林函数。

2.1.2 沉积盆地波场构建

与基岩半空间类似,沉积盆地散射场可由面 S_2 上分布的虚拟波源产生,且 $S_2 = \{\Gamma_2 \cup \Omega_2\}$,则相应的散射位移和应力表达式为:

$$\begin{aligned} u_i^{(s,2)}(x) &= \int_{S_2} \phi_j^{(s,2)}(y) G_{ij}^{(s,2)}(x, y) dS_y \\ \sigma_i^{(s,2)}(x) &= 0.5\phi_j^{(s,2)}(x) + \int_{S_2} \phi_j^{(s,2)}(y) T_{ij}^{(s,2)}(x, y) dS_y \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $u_i^{(s,2)}$ 和 $\sigma_i^{(s,2)}$ 分别为沉积部分的位移和应力; $\phi_j^{(s,2)}(\cdot)$ 为沉积盆地的波源密度; $G_{ij}^{(s,2)}(\cdot)$ 和 $T_{ij}^{(s,2)}(\cdot)$ 分别为沉积盆地的位移和应力格林函数。沉积盆地 D_2 区域内无自由场部分,散射场即为总波场。

2.1.3 边界条件

沉积盆地和半空间交界面 K 上的位移和应力连续,地表 L (包括半空间地表 L_1 和沉积盆地地表 L_2)应满足零应力条件。求解方法为:基于单层位势理论,通过在边界面施加虚拟均布荷载,构造散射波场。由上述边界条件建立方程求解得到各个单元上虚拟荷载密度,从而得到散射波场,基岩半空间总波场可进一步由散射场和自由场叠加得到,沉积盆地散射场即为总波场。

2.1.4 关东盆地地震动放大系数

SV波入射下沉积盆地7个观测点的地震动放大系数频谱如图4所示。由图4可知,SV波入射下盆地内观测点地震动放大系数频谱振荡比较剧烈,宽频域内有些频段表现为“波峰”,有些频段表现为“波谷”,盆地的沉积层以及地形对不同频段地震动呈现出不同的放大或滤波效应。比如对处在盆地边缘处的A点和G点受盆地边缘效应影响十分明显,A点的盆地放大系数峰值为5.37,大于盆地内部观测点盆地放大系数峰值,表明此种情况下盆地边缘区域的放大效果要强于盆地内部;观测点F为沉积盆地土层最大厚度对应的地表点,表现出聚焦效应,低频段放大系数峰值大于其他观测点,仍小于盆地边缘观测点A。因此下文着重考察了盆地边缘位置台站记录、所建方法模拟结果与常规随机有限断层法模拟结果的对比。

2.2 考虑盆地效应的修正随机有限断层法

随机有限断层法将发震断层划分成一系列子断层,然后将每个子断层视为点源,应用随机点源的方法,得到每个子源对场址的影响。计算每个子源在场址产生的地震动,首先在频域上综合考虑震源、传播路径以及场地效应的影响,求解地震动傅立叶谱,然后将傅里叶谱转换为时程,考虑每个子源破裂传播到场址的延时,合成总地震动时程。

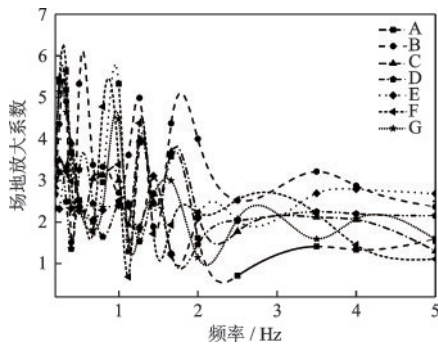


图4 目标场地观测点地震动放大系数

Fig.4 Ground vibration amplification coefficient of the observation point of the target site

设地震矩为 M_0 的点源产生的傅立叶谱为 $F_A(M_0, f, R)$, 可表示为震源谱 $S(M_0, f)$ 、距离衰减项 $P(R, f)$ 、场地效应影响项 $G(f)$ 以及地震动类型因子 $I(f)$ 之间的乘积^[27-28], 表达式为:

$$F_A(M_0, f, R) = S(M_0, f) \cdot P(R, f) \cdot G(f) \cdot I(f) \quad (4)$$

式中, 距离衰减项可表示为 $P(R, f) = Z(R) \cdot D(R, f)$, $Z(R)$ 表示随距离 R 的几何衰减, $D(R, f)$ 表示随距离 R 和频率 f 的滞弹性衰减; 场地效应影响项可表示为 $G(f) = A(f) \cdot K(f)$, $A(f)$ 为近地表土层幅值放大因子, $K(f)$ 为高频截止滤波器。

当考虑盆地效应时, 对原有场地效应影响项 $G(f)$ 进行修正, 即变成 $G(f) = A(f) \cdot B(f) \cdot K(f)$, $B(f)$ 是沉积盆地地震动放大系数频谱, 采用 2.1.1 节所述方法求解。该修正适用于盆地沉积层整体位于基岩上覆盖层中的情况。

震源谱模型可以表示为:

$$S(M_{ij}, f) = \frac{CM_{ij}}{1 + (f/f_{ij})^2} \quad (5)$$

式中, M_{ij} 为子断层的地震矩, 满足 $M_{ij} = M_0/N$, M_0 为整个断层的地震矩; C 是常数。 M_{ij} 与子断层的面积有关, f_{ij} 是子断层的拐角频率, 采用动力学拐角频率, 表达式为:

$$f_{ij}(t) = N_R(t)^{-1/3} 4.9E + 6\beta(\Delta\sigma/M_{0ave}) \quad (6)$$

式中, $M_{0ave} = M_0/N$ 为子断层的平均地震矩; E 为整个断层的辐射能量; $N_R(t)$ 为破裂的子断层数目。当 $t = t_{end}$ 时, 破裂的子断层数目 $N_R(t)^{-1/3} = N^{-1/3}$, 在破裂结束拐角频率为:

$$f_0 = f_{ij}(t_{end}) = N^{-1/3} 4.9E + 6\beta(\Delta\sigma/M_0/N)^{1/3} \quad (7)$$

依据在美国地质勘探局查到的当地地表以下 30 m 深剪切波速 ($V_{s30} = 760$ m/s), 用常规随机有限断层法求解, 采用 Boore 给出的 $V_{s30} = 760$ m/s 对应的放大因子^[29], 具体参数见表 1。

几何衰减模型使用三段式模型, 表达式为:

$$Z(R) = \begin{cases} R^{b_1}, & R \leq R_1 \\ Z(R_1) \left(\frac{R_1}{R}\right)^{b_2}, & R_1 < R \leq R_2 \\ Z(R_2) \left(\frac{R_2}{R}\right)^{b_3}, & R_2 \leq R \end{cases} \quad (8)$$

式中, R_1 和 R_2 的取值参考王希伟^[30]给出的日本东北地区的反演结果, R_1 为 95 m, R_2 为 121 m, 路径持时方面, 目前还没有可供使用的持时信息。因此本文仍采用 Atkinson 和 Boore 的分段持时模型^[31]。其他震源参数见表 2。

表1 土层放大系数

Table 1 Amplification factor of soil layer

频率/Hz	放大系数	频率/Hz	放大系数
0.01	1	0.089 4	1.51
0.015	1.01	1.301	1.64
0.021	1.02	1.892	1.8
0.031	1.02	2.751	1.99
0.045	1.04	4.0	2.18
0.065	1.06	8.459	2.56
0.095	1.09	12.301	2.75
0.138	1.13	17.889	2.95
0.2	1.18	26.014	3.17
0.291	1.25	37.83	3.42
0.423	1.32	55.012	3.68
0.615	1.41	80.0	3.96

表2 日本地震模拟参数

Table 2 213 earthquake simulation parameters in Japan

震源参数	取值
矩震级(M_w)	7.1
断层类型	逆冲断层
断层上边缘坐标和埋深	37.983°N142.060E, 34 km
断层长宽	66 km × 33 km
子断层长宽	3 km × 1.83 km
断层走向/倾角	193°NE/52°
震源深度	50.6 km
近震源介质密度	3.0 g/cm ³
剪切波速(β)	3.6 km/s
破裂速度(V_r)	2.88 km/s
应力降	250bars
品质因子	$Q(f) = 153f^{0.96}$
Kappa 值	0.015

3 模拟与验证

3.1 盆地内外典型台站地震动模拟结果与验证

3.1.1 地震动加速度时程结果与验证

地震动的实测数据从日本防灾科学技术研究所网站获得,为了考察关东盆地对地震波散射效应引起的地震动空间变化特性,选取了位于盆地内的 CHB001、CHB002、CHB008、CHB013、CHB014 台站,盆地边缘的 GNM007 台站,盆地外 NIG024、NIG026 台站,台站位置如图5所示。由图5可知,对位于关东盆地外的两个台站进行随机有限断层法模

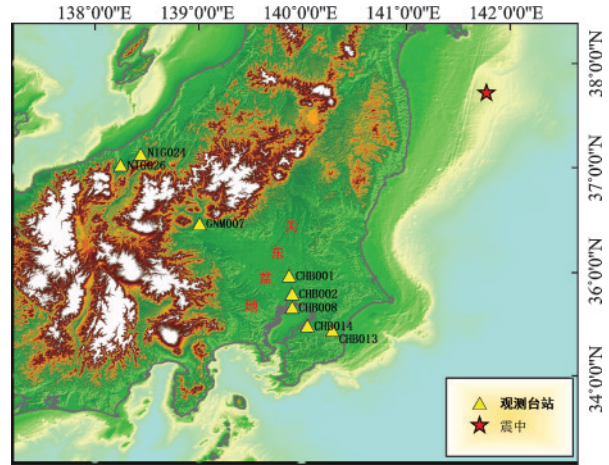


图5 选取的盆地内外典型台站分布图

Fig.5 Distribution map of typical stations inside and outside the selected basin

拟时未考虑盆地效应对其的影响。而其余6个台站位于关东盆地内故考虑盆地效应对这些台站的影响。

图6给出了各台站所在位置地表点地震动加速度时程,其中黑色、红色实线分别为修正随机有限断层法、常规随机有限断层法求解结果。

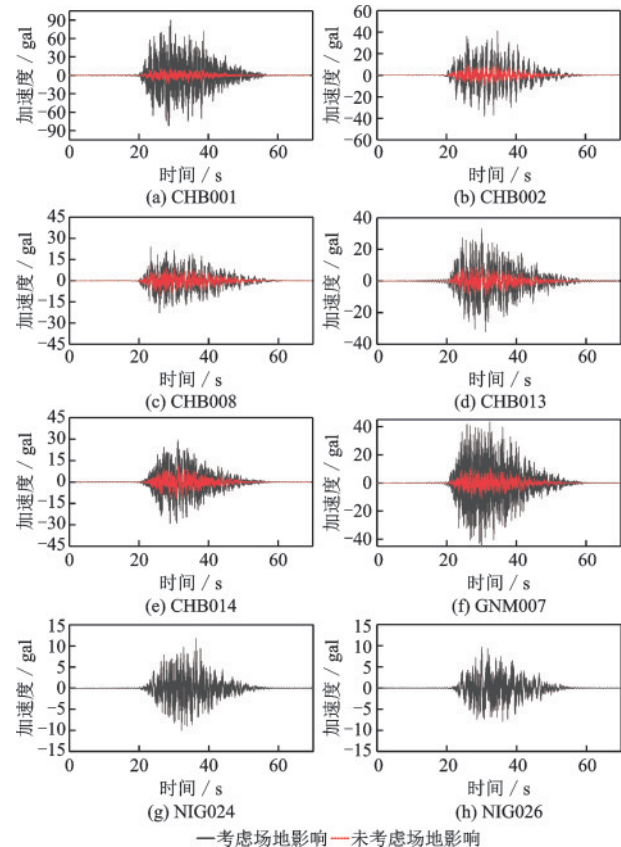


图6 各台站位置地表点地震动加速度时程

Fig.6 Ground motion acceleration of the surface points at each station

通过日本防灾科学技术研究所获取此次地震各台站的实测地震记录,并分别提取了3个方向的地震动峰值加速度(PGA)与模拟结果进行对比(表3)。

表3 部分台站实测和模拟结果

Table 3 Measured and simulated results of some stations

单位: gal

台站	实测结果				模拟结果	
	N-S	E-W	U-D	合矢量	本文修正方法	常规方法
CHB001	86	84	38	90	89.66	14.36
CHB002	57	51	31	66	55.59	11.51
CHB008	31	41	23	43	41.20	12.42
CHB013	16	18	8	19	23.76	11.09
CHB014	27	30	16	35	32.91	10.91
GNM007	22	24	9	26	29.31	13.54
NIG024	7	6	3	8	-	11.74
NIG026	4	3	2	5	-	9.64

由图6和表3可知,考虑盆地效应的地震动加速度相较于未考虑盆地放大效应地震动加速度有明显增大,更接近实测记录。其中CHB001台站位置地表地震动峰值加速度增幅最为显著,达到6.24倍,原因在于CHB001台站的震源距比其他台站要

更小故接收到的地震动效果更大;另一方面,CHB001台站位于盆地内部,受盆地聚焦效应影响,地震动被明显放大,而同样位于盆地内的CHB013台站位置PGA增幅为2.14倍,表现出显著的空间变化特性。而未考虑盆地效应时,该区域的地震动峰值加速度大致相同,这主要与用随机有限断层法模拟时所考虑的放大因子和几何衰减模型有关。

此外,由表3可知,采用所建方法模拟所得PGA与实测记录大致吻合,表明了本文发展的改进随机有限断层法在模拟含沉积盆地场地地震动时的有效性。

3.1.2 地震动加速度反应谱结果与验证

图7给出了各台站位置地表地震动部分场地加速度反应谱结果,同时给出了实测三向地震动加速度反应谱作为对比,需要说明的是用随机有限断层法得出的地震动加速度反应谱是合加速度反应谱。由图7可知,加速度反应谱整体趋势比较吻合,部分台站的模拟结果在长周期存在反应谱高估的情况,主要原因是随机有限断层法在高频地震的模拟中更准确,并且随机有限断层法不考虑子空间之间的相互作用,当它将大断层分解成更小的区域时,通过模拟地震动得到的高频和低频分量的分布,与实

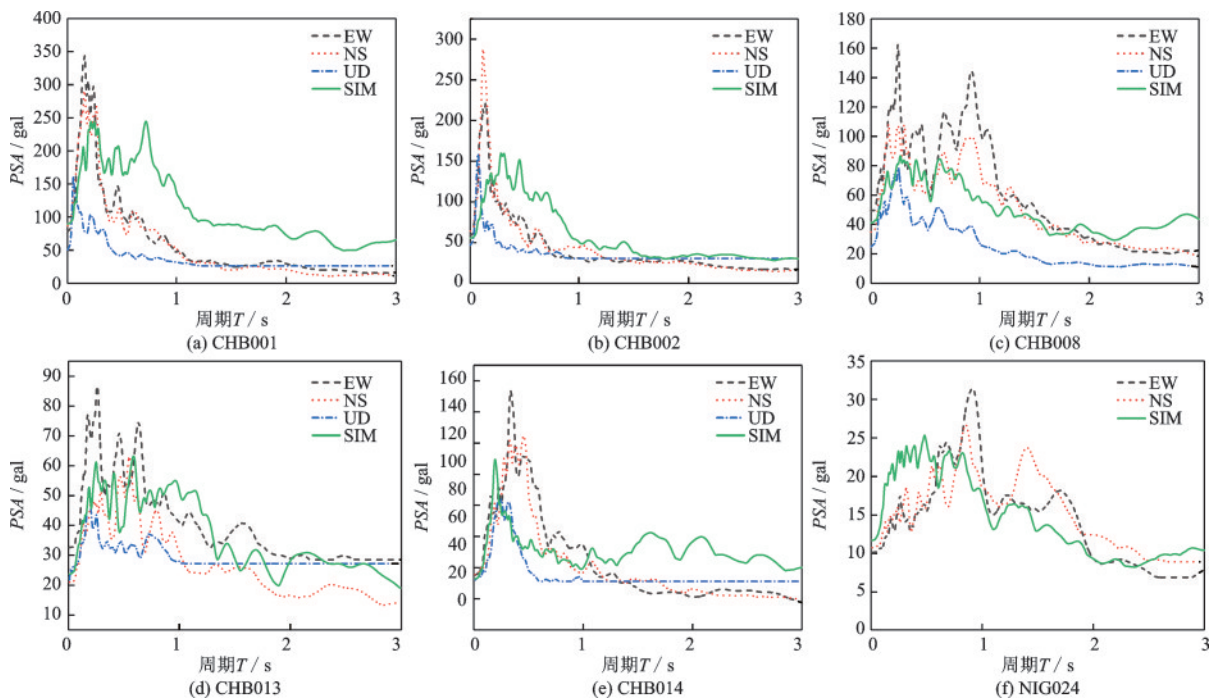


图7 各台站位置地表地震动加速度反应谱

Fig.7 Ground motion acceleration response spectrum at each station

际地震动能量分布在高频和低频之间的情况是不一致的,这也说明随机有限断层法存在一定的局限性。

图8提取了基于修正、常规随机有限断层法求解的3个周期对应的各台站位置地表地震动谱加速度。由图9可知,谱加速度两种方法所求不同周期对应的CHB001台站位置地表地震动谱加速度均存在最大差异,考虑盆地效应时放大近7倍,这主要是因为CHB001台站位于盆地内部,且和其他盆地内台站相比其所在区域沉积层较深厚,地震波在深厚

沉积盆地中多次反射、叠加,从而导致地表出现异常的地震动放大效应。同样在盆地内部的CHB008在长周期部分也表现出了和CHB001一样的场地放大效果,相较于不考虑场地影响下的结果谱加速度值扩大了近5倍,这也说明了深厚沉积盆地在长周期范围内的场地放大更加明显,并且沉积土层越厚的地方越容易发生场地放大效应。比如CH008台站位置,考虑盆地效应时,在 $T=1\text{ s}$, $T=2\text{ s}$ 的时候场地谱加速度值较不考虑盆地效应时放大约5倍,但是对于 $T=0.2\text{ s}$ 的结果,放大效果较小。

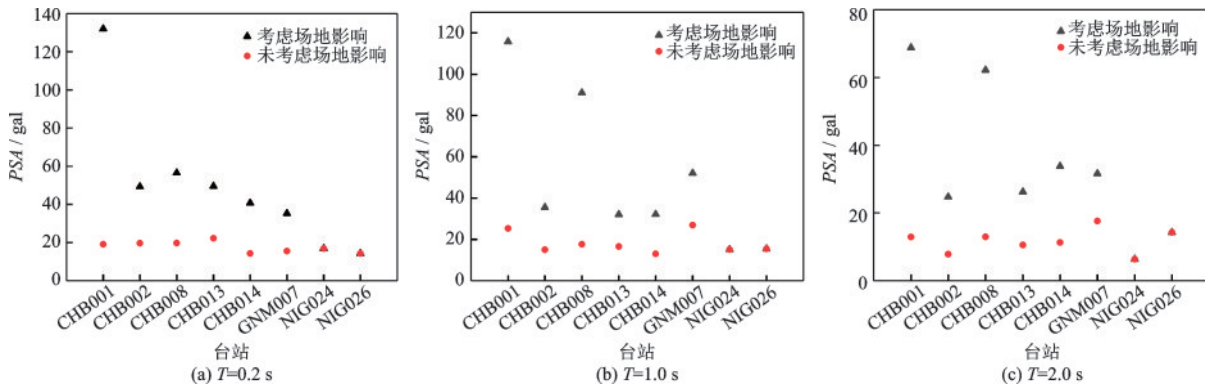


图8 不同周期对应的各台站位置地表地震动谱加速度

Fig.8 Acceleration of the surface seismic spectrum at each station position corresponding to different cycles

3.2 盆地区域地震动模拟结果与验证

以上述研究为基础,本节对盆地区域地震动进行模拟,进一步验证了本文所建方法的适用性与准确性。参考1度精度的全球沉积层模型,粗略采集了关东盆地的三维土层分布数据,如图9所示。将土层进行剖面切片,具体土层参数见表4。

剖析不同方向盆地基底边界,根据盆地基底起伏情况,再次运用边界元基于各台站的断层距以及台站和盆地的相对位置划分成不同区域。图10对比了修正随机有限断层法、常规随机有限断层法以及台站实测数据的PGA分布。

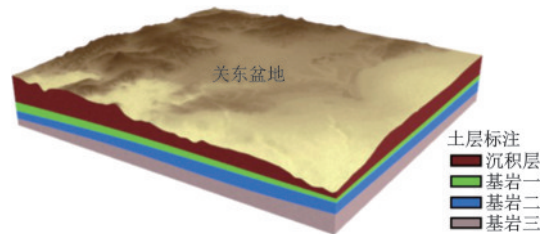


图9 关东盆地的三维土层分布

Fig.9 Three-dimensional soil layer distribution in the Kanto Basin

由图10可知,本文所建方法求解结果的分布形态更加接近于盆地台站实测地震记录,相较于未考虑盆地放大效应下的各台站模拟结果具有更明显的地震动空间变化特性。此外,盆地区域地震动最大值分别为184.41 gal(本文方法)、60.91 gal(常规方法)以及272.61 gal(台站)。本文所建方法结果较常规随机有限断层法结果有较大幅度的改善,但部分区域仍存在地震动强度的低估。沉积盆地地震动放大规律依赖因素众多,针对其它因素影响还需要进一步探索。

表4 各土层参数

Table 4 Parameters of each soil layer

土层名称	平均厚度/km	剪切波速/($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)
沉积层	1.9	0.55
基岩一	9.46	3.4
基岩二	7.97	3.62
基岩三	7.47	3.94

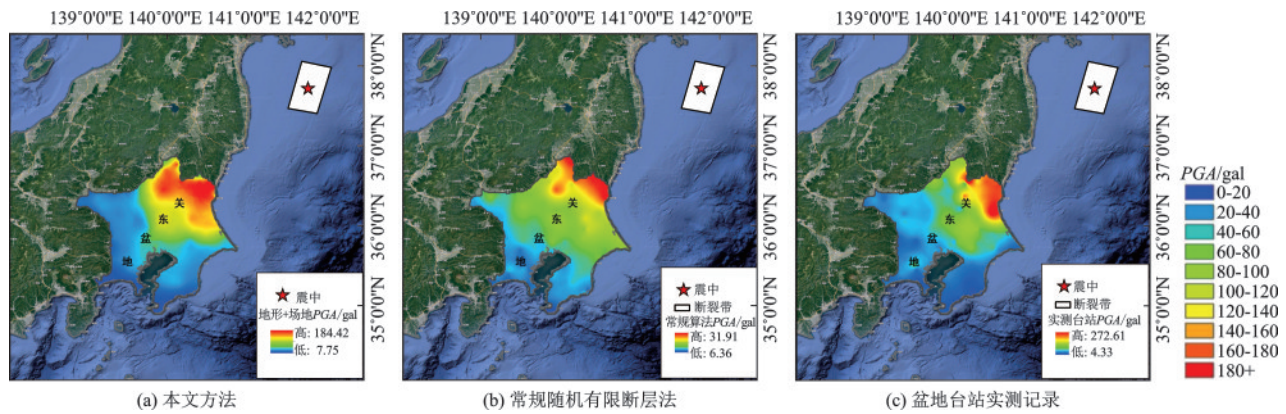


图10 本文方法、常规方法以及台站实测记录的PGA分布对比图

Fig.10 Comparison of PGA distribution charts of the proposed method, the conventional method, and the station measurement record

4 结论

对随机有限断层法进行改进,发展了一种沉积盆地全过程地震动模拟方法。以日本关东盆地为例,研究了日本2021年2月13日的 M_w 7.1海域地震关东盆地对地震动的放大效应。主要结论如下:

(1)引入沉积盆地地震动放大系数可对常规随机有限断层法进行有效修正,本文所建方法对沉积盆地场震动模拟具有更好的适用性和准确性。

(2)盆地效应引起盆地内部地震动出现显著的空间变化,关东盆地边缘地震动峰值加速度放大可达2.14~6.24倍。因盆地尺度较大,主要表现出边缘放大效应。

(3)不同深度的沉积层对场地的放大效果体现在不同的地震动周期内,深厚沉积土层在长周期内更易导致场地放大效应。

参考文献:

[1] 郭明珠,赵芳,赵凤仙.场地地震动局部地形效应研究进展[J].震灾防御技术,2013,8(3):311-318.
Guo M Z, Zhao F, Zhao F X. A review of the effect of small-scale surface topography on ground motions [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2013, 8(3): 311-318. (in Chinese)

[2] 高玉峰,代登辉,张宁.河谷地形地震放大效应研究进展与展望[J].防灾减灾工程学报,2021,41(4):734-752.
Gao Y F, Dai D H, Zhang N. Progress and prospect of topographic amplification effects of seismic wave in can-

yonsites[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021,41(4):734-752. (in Chinese)

[3] 陈少林,张莉莉,李山有.半圆柱型沉积盆地对SH波散射的数值分析[J].工程力学,2014,31(4):218-224.
Chen S L, Zhang L L, Li S Y. Numerical analysis of the plane SH waves scattering by semi-cylindrical alluvial valley [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(4): 218-224. (in Chinese)

[4] Xia C, Zhao B M, Horike M,等.用经验格林函数方法模拟汶川 M_w 7.9地震的强地震动[J].世界地震译丛,2018,49(1):35-52.
Xia C, Zhao B M, Horike M. et al. Strong ground motion simulations of the M_w 7.9 Wenchuan earthquake using the empirical Green's function method [J]. Translated World Seismology, 2018, 49(1): 35-52. (in Chinese)

[5] Liang J, Wu M, Ba Z, et al. Surface motion of a layered transversely isotropic half-space with a 3D arbitrary-shaped alluvial valley under qP-, qSV- and SH-waves [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 140: 106388.

[6] 袁晓铭,李雨润,孙锐.圆弧状沉积盆地与软土单覆盖层出平面地表运动对比[J].地震工程与工程振动,2002,22(4):16-21.
Yuan X M, Li Y R, Sun R. Comparison of out-of-plane surface ground motion between acircular-arc alluvial valley and a single overburden soft layer [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(4): 16-21(in Chinese).

[7] 高玉峰,代登辉,张宁.翡翠河谷地震动地形效应解析分析[J].地震学报,2022,44(1):40-49.
Gao Y F, Dai D H, Zhang N. Analytical study on the topographic effect on groundmotion of Feitsui canyon

- [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2022, 44(1): 40-49. (in Chinese)
- [8] 张宁, 潘家琐, 代登辉, 等. 含峭壁V形峡谷对地震SH波散射的解析解[J]. *地球物理学报*, 2021, 64(3): 896-906.
Zhang N, Pan J S, Dai D H, et al. An analytical solution to the scattering of plane SH waves by a V-shaped canyon with cliffs [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(3): 896-906. (in Chinese)
- [9] 陈国兴, 金丹丹, 朱姣, 等. 河口盆地非线性地震效应及设计地震动参数[J]. *岩土力学*, 2015, 36(6): 1721-1736.
Chen G X, Jin D D, Zhu J, et al. Nonlinear seismic response of estuarine basin and design parameters of ground motion [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(6): 1721-1736. (in Chinese)
- [10] Chen G, Jin D, Zhu J, et al. Nonlinear analysis on seismic site response of Fuzhou Basin, China [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2015, 105(2A): 928-949.
- [11] 丁海平, 刘启方, 金星, 等. 基岩地震动的一个相干函数模型——走滑断层情形[J]. *地震学报*, 2004, 26(1): 62-67.
Ding H P, Liu Q F, Jin X, et al. Acoherency function model of ground motion at base rock corresponding to strike-slip fault [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2004, 26(1): 62-67. (in Chinese)
- [12] Ba Z, Wang Y, Liang J, et al. Wave scattering of plane P, SV, and SH waves by a 3D alluvial basin in a multilayered half-space [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2020, 110(2): 576-595.
- [13] 黄磊, 刘中宪, 张雪, 等. 含流体层的河谷场地对地震波散射的间接边界元法模拟[J]. *地震学报*, 2020, 42(6): 657-668, 781.
Huang L, Liu Z X, Zhang X, et al. IBEM simulation of seismic wave scattering by valley topography with fluid layer [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2020, 42(6): 657-668, 781. (in Chinese)
- [14] 刘启方, 于彦彦, 章旭斌. 施甸盆地三维地震动研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2013, 33(4): 54-60.
Liu Q F, Yu Y Y, Zhang X B. Three-dimensional ground motion simulation for Shidian Basin [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2013, 33(4): 54-60. (in Chinese)
- [15] 贺春晖, 王进廷, 张楚汉. 基于震源-河谷波场数值模拟的坝址地震动参数确定方法[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(2): 585-592.
He C H, Wang J T, Zhang C H. Determination of seismic parameters for dam sites by numerical simulation of the rupture-canyon wave field [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(2): 585-592. (in Chinese)
- [16] 于彦彦, 丁海平, 刘启方. 透射边界与谱元法的结合及对波动模拟精度的改进[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(2): 13-22.
Yu Y Y, Ding H P, Liu Q F. Integration of transmitting boundary and spectral-element method and improvement on the accuracy of wave motion simulation [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(2): 13-22. (in Chinese)
- [17] Abraham J R, Smerzini C, Paolucci R, et al. Numerical study on basin-edge effects in the seismic response of the Gubbio valley, Central Italy [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2016, 14(6): 1437-1459.
- [18] Boore D M. Comparing stochastic point-source and finite-source ground-motion simulations: SMSIM and EXSIM [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2009, 99(6): 3202-3216.
- [19] Motazedian D, Atkinson G M. Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2005, 95(3): 995-1010.
- [20] 党鹏飞, 刘启方, 王冲, 等. 地震动随机有限断层模拟方法综述[J]. *地震工程与工程振动*, 2020, 40(6): 131-139.
Dang P F, Liu Q F, Wang C, et al. Review on the stochastic finite-fault ground motion simulation method [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2020, 40(6): 131-139. (in Chinese)
- [21] 王宏伟, 任叶飞, 温瑞智. 一种随机有限断层的三维地震动模拟方法——鲁甸地震为例[J]. *地震工程与工程振动*, 2021, 41(2): 181-191.
Wang H W, Ren Y F, Wen R Z. A modified stochastic finite-fault method for simulating ground motions in three dimensions: A case study of Ludian earthquake [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2021, 41(2): 181-191. (in Chinese)
- [22] 孙晓丹, 陶夏新. 基于动力学拐角频率的汶川主震近场地震动随机合成[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(增2): 124-129.
Sun X D, Tao X X. Stochastic modelling of ground motions for the Wenchuan earthquake using dynamic corner frequency [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(Sup2): 124-129. (in Chinese)
- [23] 王国新, 史家平. 随机有限断层法在汶川强地震动模拟中的应用[J]. *自然科学进展*, 2009, 19(6): 664-669.
Wang G X, Shi J P. Application of stochastic finite fault

- method in Wenchuan Strong Ground Motion Simulation [J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(6): 664-669. (in Chinese)
- [24] 夏晨, 赵伯明. 应用动力学拐角频率对经验格林函数法的改进[J]. *地震地质*, 2015, 37(2): 529-540.
Xia C, Zhao B M. Improvement of empirical Green's function method by using dynamic corner frequency[J]. *Seismology and Geology*. 2015, 37(2): 529-540. (in Chinese))
- [25] 孙吉泽, 俞言祥, 何金刚, 等. 2013年乌鲁木齐 M_s 5.6 和 M_s 5.1 地震强地震动模拟研究[J]. *地震学报*, 2017, 39(5): 751-763, 819.
Sun J Z, Yu Y X, He J G, et al. Ground motion simulation of 2013 rümq M_s 5.6 and M_s 5.1 earthquakes [J] *Acta Seismologica Sinica*, 2017, 39(5): 751-763, 819. (in Chinese)
- [26] 茆书巍, 鲍志东, 田作基, 等. 日本地区含油气盆地石油地质与油气成藏组合特征[J]. *中国石油勘探*, 2017(2): 74-83.
Mao S W, Bao Z D, Tian Z J, et al. Characteristics of petroleum geology and play of petroliferous basins in Japan [J]. *China Petroleum Exploration*, 2017(2): 74-83. (in Chinese)
- [27] Hanks T C, Mcguire R K. The character of high-frequency strong ground motion[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1981, 71(3): 1897-1919.
- [28] Beresnev I A, Atkinson G M, Johnson P A, et al. Stochastic finite-fault modeling of ground motions from the 1994 Northridge, California, earthquake. II. Wide Nonlinear response at soil sites[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1998, 88(6): 1402-1416.
- [29] Boore D. Determining generic velocity and density models for crustal amplification calculations, with an update of the Boore and Joyner (1997) generic site amplification for graphic site amplification [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2016, 106(1): 316-320.
- [30] 王希伟. 基于地震学的日本东北地区地震动衰减关系研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2012.
Wang X W. Study on seismic attenuation relationship in Northeast Japan based on seismology [D]. Harbin: Institute of engineering mechanics, China Seismological Bureau, 2012. (in Chinese)
- [31] 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.

(本文编辑: 赵霞)