DOI:10.11918/202205043

随机有限断层法的俯冲带板内地震动模拟

林德昕[1,2],马 强[1,2],陶冬旺[1,2],马完君[1,2],解全才[1,2],刘名吉[1,2]

(1.中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室,哈尔滨 150080;
2.地震灾害防治应急管理部重点实验室,哈尔滨 150080)

摘 要:为明确随机有限断层法在俯冲带板内地震动模拟中的适用性,以2021年日本千叶M_j6.1俯冲带板内地震为例,使用该方法模拟了震中范围100 km内25组KiK-net台站井上和井下记录,并分析了模拟与观测记录的频谱、持时、峰值和空间分布等地震动特征。结果表明:模拟与观测记录的5%阻尼比拟加速度反应谱(A_{ps})在0.1~10 Hz频带范围内吻合较好;基于70%能量持时模型的模拟记录在强震动段和持时上与观测记录匹配良好;井上台模拟与观测记录的地表峰值加速度(A_{pg})接近,且两者A_{pg}衰减特征基本一致;模拟和观测记录所得A_{pg}等值线相似。此外,将模拟和观测记录与现有日本俯冲带板内地震动衰减关系式(Zhao16)进行了比较,发现Zhao16的A_{pg}预测值普遍出现高估,其A_{ps}预测值在低频和高频分别出现一定程度的低估和高估,这可能与研究区域的盆地效应和软土层有关。研究结果为随机有限断层法模拟俯冲带板内地震动的适用性提供了依据,进而为探索将该方法应用于中国具有相似俯冲带构造的地区提供参考。

关键词:2021日本千叶地震;随机有限断层法;地震动模拟;俯冲带衰减关系;俯冲带板内地震
中图分类号:P315.9 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2023)10-0103-11

Simulation of ground motions caused by subduction slab earthquakes based on stochastic finite fault method

LIN Dexin[1,2], MA Qiang[1,2], TAO Dongwang[1,2], MA Wanjun[1,2], XIE Quancai[1,2], LIU Mingji[1,2]

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to verify the applicability of the stochastic finite fault method in simulating ground motions caused by subduction slab earthquakes, the 2021 Chiba, Japan M_j 6.1 subduction slab earthquake was taken as an example, and a total of 25 sets of surface and borehole station records within a range of 100 km around the epicenter were obtained from KiK-net and simulated by the stochastic finite fault ground motion method. The ground motion characteristics such as spectrum, duration, peak value, and spatial distribution of simulated and observed records were analyzed. Results show that the simulated and observed response spectra of pseudo-spectral acceleration (A_{ps}) with 5% damping ratio were well matched in the band range of 0.1 - 10 Hz. The simulated records of duration model based on 70% energy duration were consistent with the observed records in the strong motion section. The simulated and observed peak ground acceleration (A_{pg}) from the surface stations were in good agreement, and the A_{pg} attenuation characteristics were basically the same. The A_{pg} contours based on the simulated records were very similar to the observed A_{pg} contours. In addition, the simulated results and observed records were compared with the results of commonly used ground motion prediction equations (Zhao16) for subduction slab earthquakes in Japan. Results show that the A_{pg} prediction of Zhao16 was generally overestimated, and the A_{ps} prediction was underestimated and overestimated to some extent at low and high frequencies respectively, which may be caused by the basin effect and soft soil layer in the study area. The research results can provide basis for the applicability of the stochastic finite fault method in ground motions caused by subduction slab earthquakes, and will offer further reference for exploring the application of the method to areas with similar tectonics in China.

Keywords: 2021 Chiba earthquake; stochastic finite fault method; ground motion simulation; subduction zone ground-motion prediction equations; subduction slab earthquake

收稿日期:2022-05-14;**录用日期**:2022-06-24;**网络首发日期**:2022-10-19
网络首发地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20221019.1028.004.html
基金项目:中国地震局工程力学研究所基本科研业务专项(2021B08,2016A03);国家自然科学基金(5150082083)
作者简介:林德昕(1995—),男,博士研究生;马 强(1979—),男,研究员,博士生导师
通信作者:马 强,maqiang@iem.ac.cn

随机有限断层方法考虑了震源、传播路径和场地的全过程,使用简单高效、输入参数物理意义清晰,是地震工程中主流的强地震动模拟方法。其模拟的地震动记录在频谱、幅值以及持时上与观测记录对应良好[1]。通过模拟已发生地震的地震动可以验证相对稳定的路径和场地参数,对于未来可能发生的地震利用现有合理输入参数结合其震源信息,使用模拟方法快速得到地震动影响场,进而为后续的地震烈度速报、震后情景构建和灾情评估等震后态势感知系统提供地震动输入。

该方法被广泛应用于世界各地的地震动模拟中[2-5],但这些地震多是发生在内陆或震源深度不足 25 km 的俯冲带浅层地壳区域,目前国内针对浅层地壳以下俯冲带地震引起的地面运动模拟研究较少。文献[6]对俯冲带板间地震的地震动进行了模拟,虽然浅层地壳地震、俯冲带板间地震和板内地震存在一定的关联,但俯冲带板内(subduction slab)事件的震源深度更深(通常超过 50 km),其地震动大于同条件俯冲带板间事件的地震动,地震动峰值衰减慢于浅层地壳地震,短周期谱相比于另外两者会更高[7-10]。考虑到俯冲带板内和板间地震的地震动差异较大[11],随机有限断层法在俯冲带板内地震动模拟中的适用性还有必要进一步验证。作为地震多发国家,中国海域分布在大陆板块与海洋板块共同作用的俯冲带地区,南海北部及华南沿海历史上曾发生 7 级以上地震,俯冲带地震活动性较强[12]。然而中国对俯冲带地震的相关研究起步较晚,海域地震动记录稀缺,这对地震风险评估造成严重制约,由于中国台湾地区俯冲带与日本俯冲带构造相似[13],日本地区俯冲带地震研究对中国俯冲带地震的地震动模拟以及地震工程研究有重要的参考价值。

北京时间 2021 年 10 月 7 日 21 时 41 分,日本千叶县(35.6°N,140.1°E)发生 M_j 6.1 地震,日本气象厅及日本总务省消防厅发布的地震震源深度为 60 km。根据美国地质调查局(USGS)公开的震源机制解,此次地震断层机制为逆断层。本文利用 Zhao 等[14]的日本地区地震分类方法,进一步将其确定为俯冲带板内地震,基于随机有限断层法对此次俯冲带板内地震引起的地面运动进行了模拟。

1 随机有限断层法

文献[15]在随机点源法[16-17]和静拐角频率的有限断层方法[18-19]基础上,提出了动力学拐角频率模型的随机有限断层方法,摆脱了子断层尺寸划分对地震动模拟结果的影响,解决了同一个子断层在地震中多次破裂的异常问题。此后为了保证随机点源法和有限断层法在远场模拟结果相匹配,文献[20]进一步做出重要改进,将子断层拐角频率的倒数作为震源上升持时,在低频段使用滤波器函数以保证低频傅里叶谱的一致性,这使得随机有限断层法进一步扩大了适用震级范围。

根据随机有限断层模型,将断层面沿走向和倾向划分为 N 个子断层[21],频域上可将第 i 行 j 列子断层在距离为 R_{ij} 的目标场点加速度傅里叶谱描述为

$$A_{ij}(f)=\left\{\frac{CM_{0ij}H_{ij}(2\pi f)^2}{1+(f/f_{0ij})^2}\right\}\cdot\left\{\exp\left(-\frac{\pi fR_{ij}}{Q\beta}\right)G(R_{ij})\right\}\cdot\{\exp(-\pi\kappa f)A(f)\} \tag{1}$$

式中:第 1 项为震源部分;M_{0ij}、f_{0ij} 和 R_{0ij} 分别为第 i 行 j 列子断层的地震矩、拐角频率和到目标场点的震源距;$C=\Re^{\theta\varphi}FV/(4\pi\rho\beta^3)$ 为常数,$\Re^{\theta\varphi}$ 为辐射图型系数,通常取剪切波的平均值 0.55;F 为自由表面放大,通常取 2.0;V 为 2 个水平分量的分配系数,一般取 0.71;ρ 和 β 分别为震源附近的介质密度和剪切波速。第 i 行 j 列子断层的拐角频率表示为

$$f_{0ij}=4.9\times10^6\beta\left(\frac{\Delta\sigma N}{N(t)M_0}\right)^{1/3} \tag{2}$$

式中:$\Delta\sigma$ 为应力降;M_0 为整个断层的地震矩;$N(t)$ 为 t 时刻已经破裂的子断层的数量之和。

为了保证高频辐射能守恒,文献[15]引入高频标定因子 H_{ij} 对低估的子断层远场辐射能进行补偿,表达式如下:

$$H_{ij}(f)=\sqrt{\frac{N\sum\{f^2/[1+(f/f_0)^2]\}^2}{\sum\{f^2/[1+(f/f_{\omega,ij})^2]\}^2}} \tag{3}$$

式(1)的第 2 项为路径传播部分,包括非弹性衰减 $\exp\left(-\frac{\pi fR_{ij}}{Q\beta}\right)$ 和几何扩散 $G(R_{ij})$ 两部分,其中 Q 为传播介质的品质因子,R_{ij} 为第 i 行 j 列子断层到目标台站的距离。第 3 项为场地影响,$\exp(-\pi\kappa f)$ 表示震源谱高频成分的快速衰减,$A(f)$ 为近地表场地的放大效应,包括地壳放大和局部土层放大两部分。

将式(1)表示的所有子断层在目标场点产生的加速度谱经过傅里叶逆变换,考虑断层内的破裂和地震波传播造成的时间上的迟滞,在时域内叠加即可得到该场点最终的地震动加速度时程,可表示为

$$a(t)=\sum_{i=1}^{n_l}\sum_{j=1}^{n_w}a_{ij}(t+\Delta t_{ij}) \tag{4}$$

式中:n_l 和 n_w 分别为沿断层走向和倾向划分的子断层数目之和;a_{ij} 为第 i 行 j 列子断层的加速度时程,即式(1)中 A_{ij} 的傅里叶逆变换值;Δt_{ij} 为破裂传播到

第 i 行 j 列子断层，并从该子断层传播到目标场点的时间延迟。

2　数据处理和参数获取

2.1　地震动记录筛选及处理

本次千叶县 M_j6.1 俯冲带板内地震引起的地面运动模拟所用井下和井上加速度数据均来自日本防灾技术科学研究所的 KiK-net 强地震动台网。选取震中距≤100 km 的台站，利用文献[22]基于信噪比的评估方法对记录进行筛选以确定记录质量，最终有 25 个台站的记录通过了阈值为 5 的筛选标准，可被视为高质量记录，参考台站及震中位置见图 1。

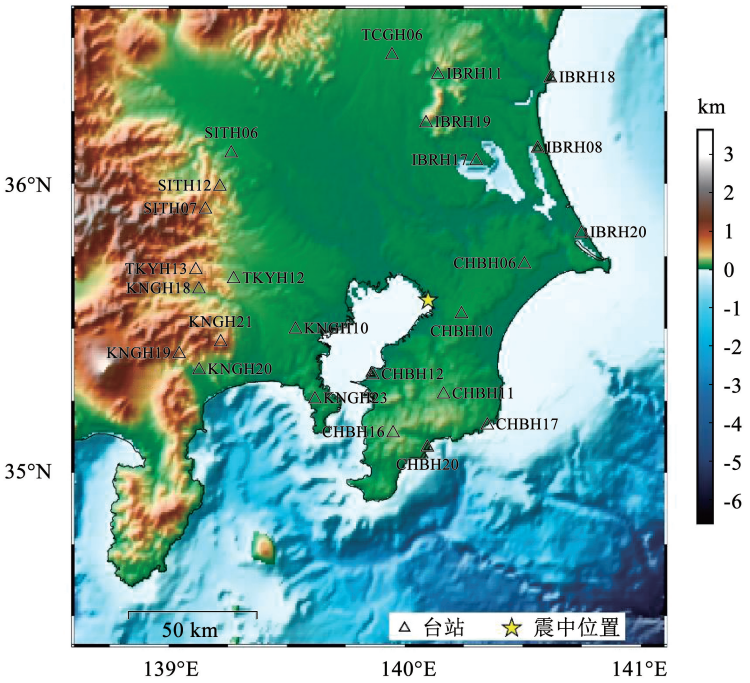


图 1　震中位置及 KiK-net 台站分布示意

Fig. 1　Schematic of locations of epicenter and KiK-net stations

根据 KiK-net 台网发布的强震动记录信息和台站钻孔资料，将所用台站的震源距、井上水平向峰值加速度（A_{pg}）和井上台场地分类整理见表 1，其中场地分类按照文献[23]基于场地周期的方法进行划分，对于给出完整钻孔资料的台站，使用土层厚度与对应土层等效剪切波速之比计算出的特征周期（即 $T=4H/V$）确定场地类别；未给出钻孔资料的台站，使用 H/V 平均反应谱比的峰值特征大致判断场地类别。

表 1　台站信息

Tab. 1　Information of stations

台站编号	东经/(°)	北纬/(°)	震源距/km	A_{pg-EW}/(cm·s^{-2})	A_{pg-NS}/(cm·s^{-2})	场地类型
CHBH10	140.2	35.5	63.601	81.5	60.2	SC IV*
CHBH11	140.2	35.3	71.241	57.4	42.4	SC II*
CHBH12	139.9	35.3	71.696	36.5	72.3	SC III*
CHBH06	140.5	35.7	73.266	42.6	43.2	SC IV2
CHBH17	140.3	35.2	81.116	21.0	17.3	SC IV1
CHBH16	140.0	35.1	81.348	66.7	53.5	SC IV2
KNGH10	139.5	35.5	82.096	140.6	107.8	SC III*
CHBH20	140.1	35.1	84.072	19.4	5.3	SC I
IBRH17	140.3	36.1	84.441	33.8	43.2	SC IV2
KNGH23	139.6	35.3	84.962	20.0	28.0	SC IV*
IBRH20	140.7	35.8	88.089	18.5	17.0	SC IV2

续表1

台站编号	东经/(°)	北纬/(°)	震源距/km	A_{pg-EW}/(cm·s^{-2})	A_{pg-NS}/(cm·s^{-2})	场地类型
IBRH19	140.1	36.2	92.096	10.6	11.0	SC I
IBRH08	140.6	36.1	94.338	18.8	24.2	SC IV*
TKYH12	139.3	35.7	98.105	30.8	45.6	SC III
KNGH21	139.2	35.5	102.585	9.8	18.0	SC I
IBRH11	140.1	36.4	105.634	43.3	50.1	SC III
KNGH18	139.1	35.6	107.779	31.8	24.0	SC II
TKYH13	139.1	35.7	108.293	14.8	15.4	SC I
SITH12	139.2	36.0	110.088	17.2	18.7	SC I*
KNGH20	139.1	35.4	111.035	20.8	23.2	SC IV1
SITH06	139.3	36.1	111.562	26.6	19.4	SC I*
SITH07	139.1	35.9	111.562	10.2	7.0	SC I
TCGH06	140.0	36.4	113.279	17.8	18.8	SC I*
IBRH18	140.6	36.4	114.938	17.3	22.3	SC I
KNGH19	139.0	35.4	115.928	10.8	12.0	SC I

注:未给出钻孔资料的台站以*标记。

由表1可以看出,KNGH10井上台站同时记录到了本次地震EW向和NS向地表A_{pg}值,分别为140.6 cm·s^{-2}和107.8 cm·s^{-2},地表水平向A_{pg}>60 cm·s^{-2}的台站有4个,分别为CHBH10、CHBH12、CHBH16和KNGH10台站;井上台场地情况复杂,涵盖场地分类标准的全部类型。所有地震动数据经过基线校正后,使用频带范围为0.1~25 Hz的四阶巴通沃斯非因果滤波器进行带通滤波处理。

2.2　输入参数的计算和选取

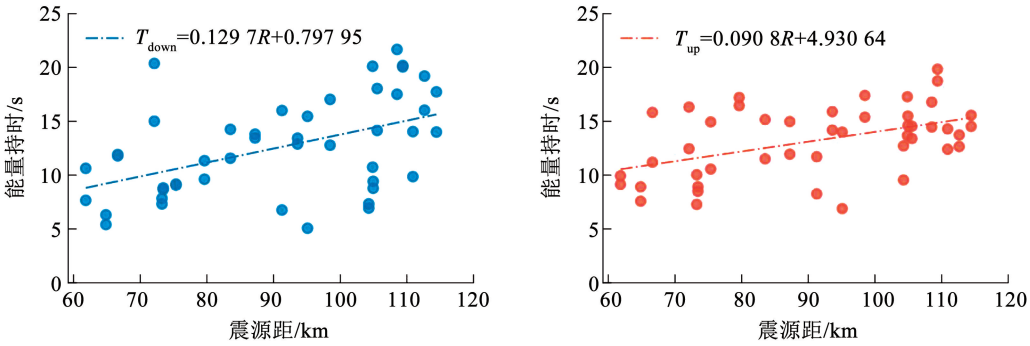
本文将USGS提供的震源机制信息作为本次模拟的震源参数,矩震级M_w=5.9,震源深度取60.5 km,断层走向、倾角和滑动角取178°、33°和94°。在断层几何信息不明确的情况下,断层尺寸使用文献[24]的俯冲带板内地震震源尺寸与矩震级经验统计关系估算,将其确定为10 km×8 km。结合上述断层尺寸估算出的上缘埋深为58.5 km。应力降利用文献[25]给出的破裂面积、应力降与地震矩的经验关系估计出初始值为3 MPa,之后通过"试错法"最佳匹配拟反应谱(A_{ps})残差平均值以确定本次模拟使用的应力降[26],增量设置为0.5 MPa,最终将应力降取为6 MPa。本文使用随机滑动分布的方式对子断层滑动权重进行分配。震源附近介质密度和S波波速由Crust 1.0全球地壳模型确定,分别为3.17 g·cm^{-3}和4.29 km·s^{-1}。

对于地震动持时,文献[4]使用90%能量持时作为地震动持时模型,这使得模拟加速度记录在持时上更加接近观测记录,本文认为70%能量持时更能体现S波主导的强地震动持续时间。因此,取地震动能量处于5%和75%之间的持续时间(即70%能量持时)作为本次模拟的地震动持时模型,以距离为自变量,回归得到二者的经验关系式

$$T = a + b \cdot R \tag{5}$$

式中:T可被视为包含了震源持时和路径持时的地震动持时模型(以下记为70%能量模型),a、b为模型系数,R为震源距。由于场地对于地震动持时的影响尚不明确,以上模型可能包含场地项对于持时的影响。本文计算了以上所选台站记录的能量持时,去掉其中持时异常过大和过小的台站(CHBH20和KNGN20)记录,对筛选后的记录使用最小二乘法进行回归,结果见图2。圆点表示观测记录的能量持时,点划线表示地震动持时模型,对应井下和井上地震动持时模型函数分别为$T_{down}=0.129\,7R+0.797\,95$和$T_{up}=0.090\,8R+4.930\,64$。

路径效应部分包括由几何扩散引起的弹性衰减以及在介质中传播损耗引起的非弹性衰减。几何扩散一般可用分段连续函数来简化表示,本文针对研究区域参考了文献[2]对日本3.11地震的模拟结果将几何扩散取为R_{hypo}^{-1};本文的研究区域位于日本火山弧前,传播路径项中非弹性衰减部分按照文献[27]对火山弧前弧后的研究结果,采用其拟合出的弧前区域品质因子用于本次地震动模拟,形式为$Q(f)=\begin{cases}300(f/0.1)^{0} & f\leqslant 0.64\ \text{Hz}\\ 150(f/1.0)^{1.30} & f\geqslant 3.66\ \text{Hz}\end{cases}$的模型,当频率0.64 Hz<$f$<3.66 Hz时,$Q(f)$由分段点处对应值连线构成的一次函数表示。



(a) 井下能量持时随震源距变化　　(b) 井上能量持时随震源距变化

图 2　地震动持时模型

Fig. 2　Ground motion duration model

井下台的场地效应考虑了包括地壳放大和表示局部场地高频快速衰减的 κ_0 值，在此基础上，井上台还考虑了局部场地效应，其中包含局部土层放大效应以及对井上台 κ_0 值的修正。

近地表地壳放大通过改进后的四分之一波长法[28]计算各个台站所在地区的波速模型获得，KiK-net 提供了部分台站对应井下土层结构的数据资料，但不足以使用四分之一波长法计算全部台站的近地表地壳放大。对于没有提供井下波速结构的台站，本文结合文献[29]提出的日本综合速度模型作为补充，选取台站所在划分区块的地下结构速度模型，计算出每个场点对应的近地表地壳放大因子，全部结果见图 3。

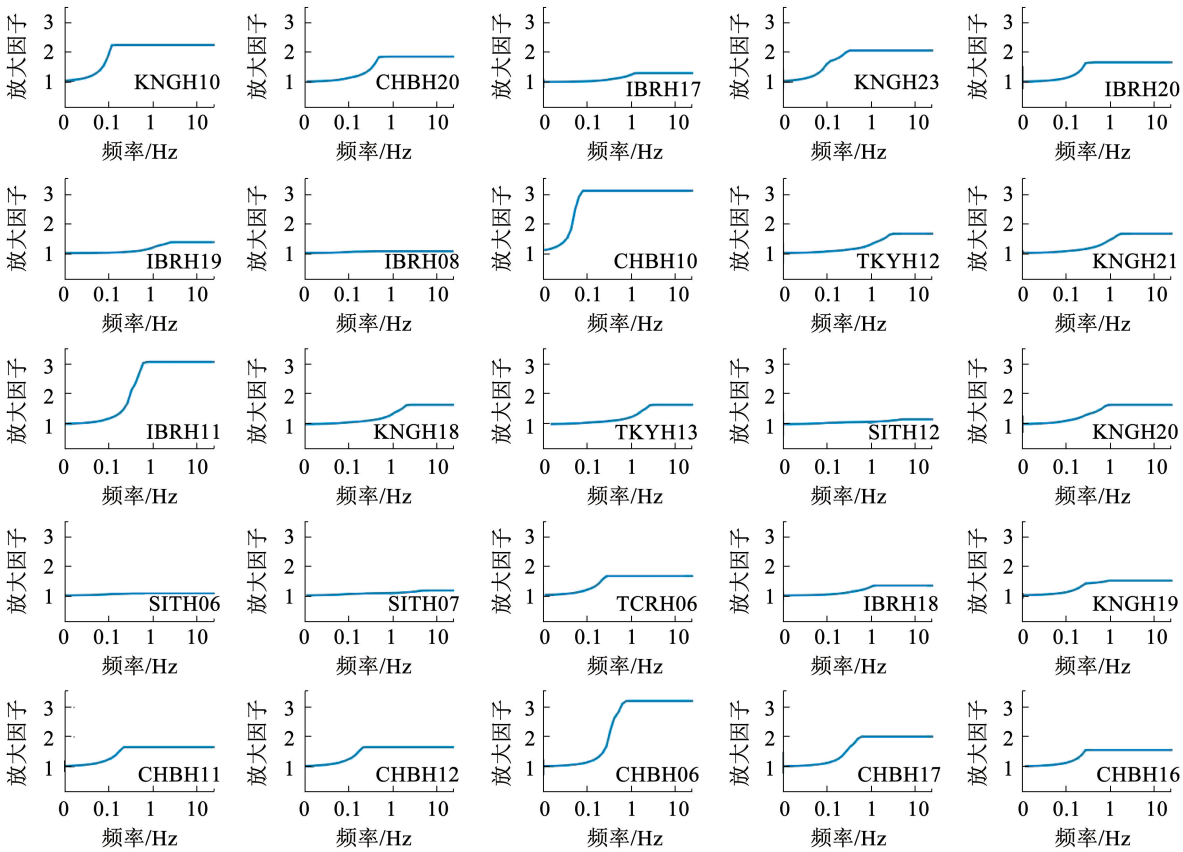
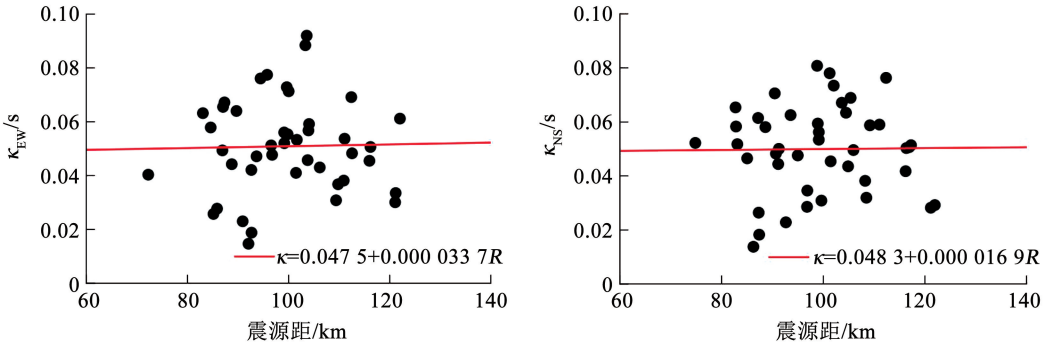


图 3　地壳介质放大因子

Fig. 3　Crustal medium amplification factor

与场地效应相关的高频衰减部分，本文使用文献[30]提出的 κ_0 值作为加速度幅值谱在高频部分的衰减，计算 κ_0 所用地震动数据为 2018—2021 年内目标区域及邻近台站记录到的 90 组井下水平向地震动加速度记录，所用记录均来自 KiK-net 台网，且经过基线校正和滤波处理。按照文献[31－32]的处理流程，取每条记录加速度时程 S 波到时到能量持时 80% 的部分进行傅里叶变换。根据文献[33－

34]的观点,将傅里叶幅值谱的衰减起始频率 f_E 控制在 5 Hz≤f_E < 10 Hz,衰减终止频率 f_{max} 控制在 10 Hz≤f_{max} ≤20 Hz,且起始频率与终止频率的间隔 > 10 Hz。本文所用起始频率为 5 Hz,终止频率为 20 Hz,对每组傅里叶谱中间的高频衰减部分使用最小二乘拟合,得到 EW 分量和 NS 分量的 κ 关于震源距 R 的关系式 $\kappa = 0.047\ 5 + 0.000\ 033\ 7R$ 和 $\kappa = 0.048\ 3 + 0.000\ 016\ 9R$(见图 4,圆点表示根据观测记录计算出的 κ 值)。当 $R = 0$ km 时 κ 记为 κ_0,表示目标研究区域的局部场地高频衰减效应,本文使用 2 个水平分量 κ_0 的算数平均值 0.048 作为此次模拟的局部场地高频衰减输入参数。



(a) EW向κ值随震源距变化　　(b) NS向κ值随震源距变化

图 4　EW 和 NS 向高频衰减 κ 值随震源距 R 的分布

Fig. 4　Distribution of high frequency attenuation κ with source distance R in EW and NS directions

由于 KiK-net 具有丰富的井上井下观测记录,本文采用物理意义明确的井上井下谱比法对各个台站的局部场地效应进行估计。首先,对所有基线校正和滤波后的井上井下水平向地震动记录进行傅里叶变换,并使用 Konno-Ohmachi 窗对其幅值谱进行平滑处理。对平滑后的两分量傅里叶幅值谱求几何平均值,再用同一个台站的井上和井下幅值谱均值做谱比,最终得到 25 个台站的井上井下谱比,将其作为本次模拟的局部场地效应参数,全部结果见图 5。

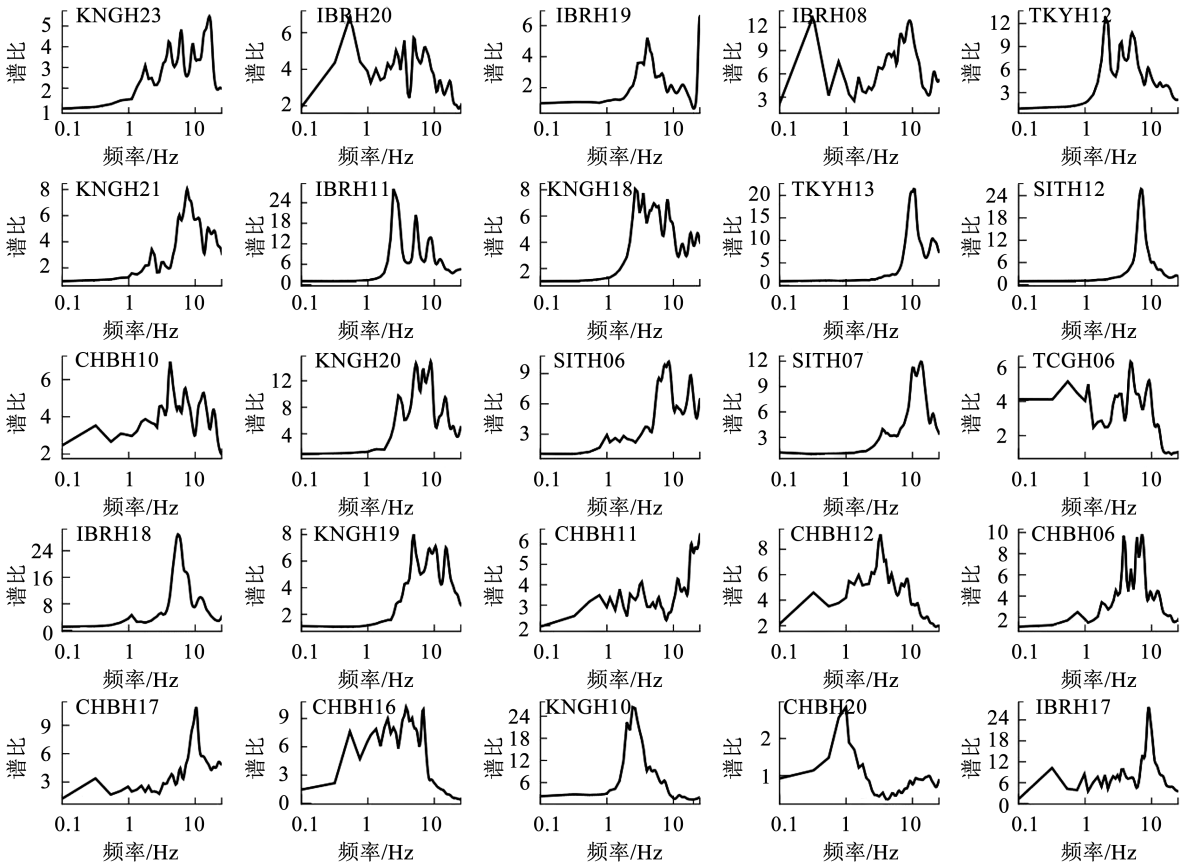


图 5　井上/井下谱比

Fig. 5　Surface/borehole spectral ratio

本次随机有限断层法模拟所用震源、路径和场地部分的输入参数见表 2。

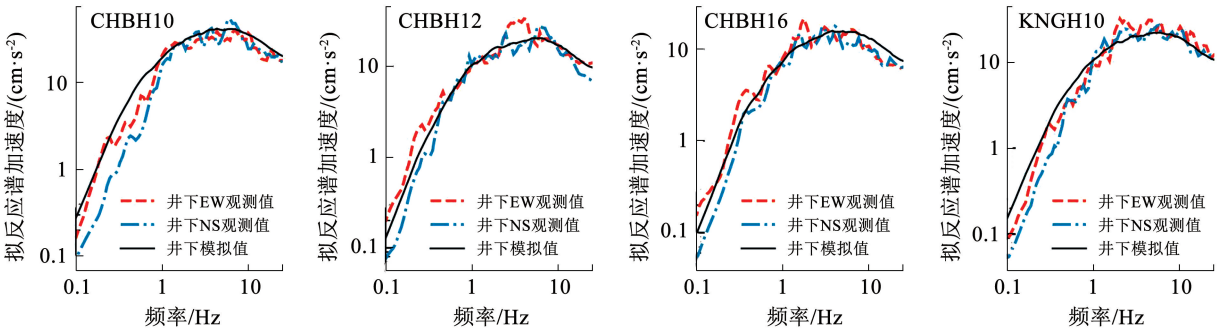
表 2　随机有限断层法模拟输入参数

Tab. 2　Input parameters for stochastic finite fault method

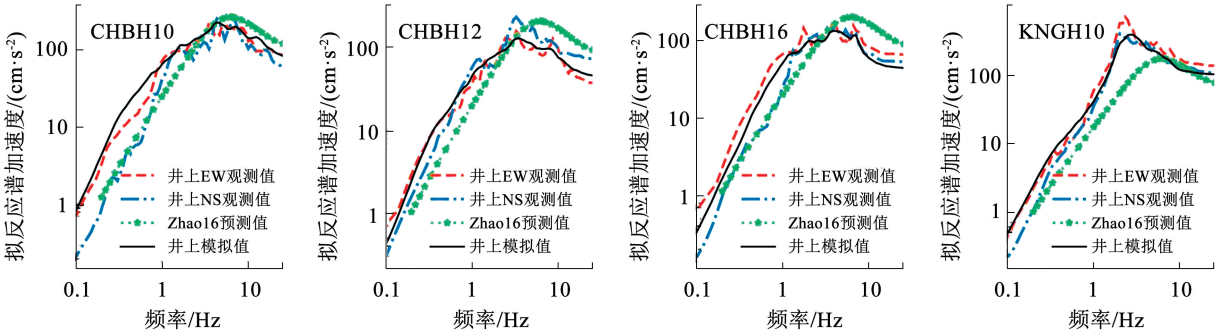
参数	取值	来源
矩震级 M_w	5.9	USGS
应力降/MPa	6	试错法最佳匹配
节面走向和倾角/(°)	178.33	USGS
有限断层长度和宽度/km	10×8	文献[24]
子断层尺寸/km	2×2	本文
上缘埋深/km	58.5	本文
介质密度/(g·cm^{-3})	3.17	Crust1.0
剪切波速/(km·s^{-1})	4.29	Crust1.0
脉冲百分比/%	50	文献[34]
几何衰减模型	R_{hypo}^{-1}	文献[27]
品质因子	$Q(f)=\begin{cases}300(f/0.1)^0 & f\leqslant 0.64\ \text{Hz}\\ 150(f/1.0)^{1.30} & f\geqslant 3.66\ \text{Hz}\end{cases}$	文献[2]
井上台持时	$T_{up}=0.090\ 8R+4.930\ 64$	最小二乘法
井下台持时	$T_{down}=0.129\ 7R+0.797\ 95$	最小二乘法
近地表地壳放大	见图 3	四分之一波长法
局部场地高频衰减/s	$\kappa_0=0.048$	本文及文献[30－34]
局部场地效应	见图 5	井上井下谱比法

3　模拟结果及分析

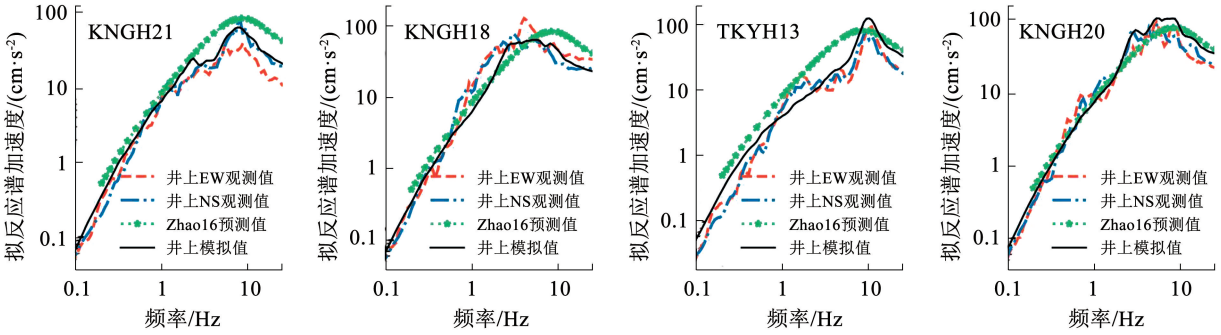
考虑到模拟结果的稳定性和随机方法的不确定性，使用有限断层法对全部井上井下台站记录各进行了 30 次模拟，得到相应阻尼比 5% 的 A_{ps} 和加速度时程，并将每组 30 次模拟 A_{ps} 的几何平均值作为目标台站的 A_{ps} 模拟结果。分别选取地表水平向 $A_{pg}>60\ \text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$ 的井上台观测记录和其对应井下台记录，将其 A_{ps} 值与模拟值进行比较，并在井上部分的对比中加入地震动预测方程(GMPEs)A_{ps} 预测平均值(以下简称预测值)，其中 GMPEs 为文献[7]提出的日本地区俯冲带板内水平向地震动衰减关系(以下简称 Zhao16)，Zhao16 所用场地见表 1，比较结果见图 6。其中，图 6(a)、(b)分别为井下和井上的比较结果。整体来看，井上和井下台模拟记录与观测记录得到的 A_{ps} 谱形高度相似，低频部分模拟稍微高估。由图 6(b)中可以看出，Zhao16 也可以较好地描述代表地面运动的井上台记录频谱特征，但 Zhao16 的 A_{ps} 预测值在低频上略低于观测值和模拟值，模拟得到的 A_{ps} 值更加接近观测值，由于以上台站处于关东盆地，盆地效应及厚覆盖层可能对实际地震动的低频造成一定程度的放大。为验证这种放大与盆地相关，本文在山地区台站中选取海拔 > 300 m 的台站(KNGH21、KNGH18、TKYH13、KNGH20)加入比较，见图 6(c)。可以看出，对于山地区台站，Zhao16 的 A_{ps} 值并没有出现低频段低估的现象。



(a) 盆地区井下模拟与观测记录A_{ps}



(b) 盆地区井上模拟与观测记录A_{ps}

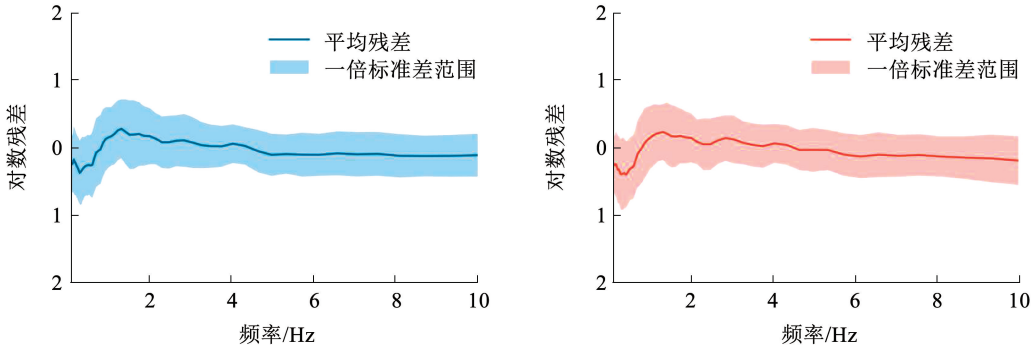


(c) 山地区台站井上模拟与观测记录A_{ps}

图 6　地震动模拟记录与观测记录的 A_{ps} 比较

Fig. 6　Comparison of A_{ps} between seismic simulation results and observation records

对模拟 A_{ps} 的评价可用观测记录与模拟记录的 A_{ps} 值对数残差表示，在 0.1 ~ 10 Hz 的频带范围内，全部井上井下台站的模拟记录与水平向观测记录 A_{ps} 对数残差结果见图 7，图 7(a) 为井下结果，图 7(b) 为井上结果，实线为对数残差平均值，越接近 0 表示模拟结果越接近观测值，阴影区域为对数残差的一倍标准差范围。可以看出在所选频段内，所有台站模拟记录的 A_{ps} 对数残差平均值均在 ±0.4 以内，其中 0.6 ~ 10 Hz 频段基本在 ±0.2 以内；A_{ps} 对数残差的一倍标准差主要在 ±0.5 范围内。由此可以看出，模拟记录能很好地反映本次地震动的频域特征。



（a）井下模拟与观测记录A_{ps}残差　　（b）井上模拟与观测记录A_{ps}残差

图 7　地震动模拟记录与观测记录 A_{ps} 残差

Fig. 7　Comparison of A_{ps} residual plots between seismic simulation results and observation records

检验模拟与观测记录加速度时程的匹配程度，同样选取地表水平向 A_{pg} > 60 cm·s^{-2} 的台站，从模拟 30 次得到的水平向加速度时程中挑出 A_{pg} 与观测记录 A_{pg} 几何平均值相近的井上记录进行对比，同时为了检验 70% 能量模型的表现，本文将广泛使用的由文献[35]开发的地震动持时模型(以下简称 AB98)加入对比，见图 8。可以看出相比于 AB98，70% 能量模型得到的模拟加速度时程与观测记录在强震动段更相似，其持时也更接近地震动观测记录，模拟地震动记录在时域上的表现良好。

峰值地面加速度(A_{pg})是计算仪器烈度的常用参数，与烈度分布有很强的相关性。为研究地表 A_{pg} 特征及其随距离的衰减特征，本文将 25 组井上台站水平向 A_{pg} 观测值、A_{pg} 模拟值与 Zhao16 的 A_{pg} 预测值进行比较。地表 A_{pg} 观测值使用井上水平向 A_{pg} 的几何平均值，将模拟 30 次井上记录获得的 A_{pg} 值进行几何平均作为地表 A_{pg} 模拟值，Zhao16 预测值所用场地见表 1。比较结果见图 9。可以看出，观测值和模拟值基本落在 Zhao16 一倍标准差范围内，表明模拟记录与 Zhao16 均能很好地描述本次俯冲带板内地震的 A_{pg} 衰减规律。此外，Zhao16 的 A_{pg} 预测值普遍高于地表 A_{pg} 观测值，地表模拟值更接近观测值，大多数模拟值与观测值匹配良好。由于 A_{pg} 主要受地震动高频成分的影响，关东盆地的厚软土覆盖层可能会抑制地震动的高频成分，从而导致 Zhao16 在 A_{pg} 预测上的高估。相比于 Zhao16 模型，随机有限断层法可以更灵活地考虑研究区域的局部场地效应。

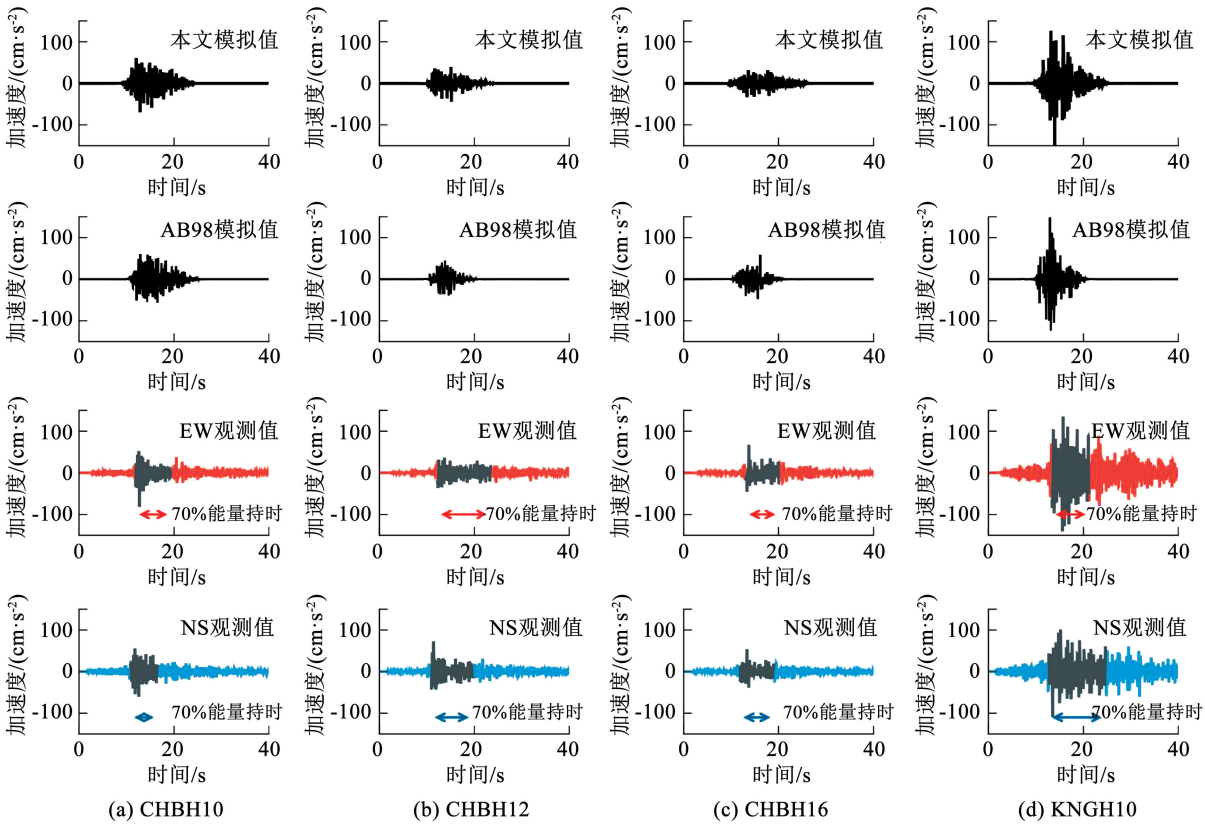


图 8　模拟记录与观测记录加速度时程比较

Fig. 8　Comparison of acceleration time history between seismic simulation results and observation records

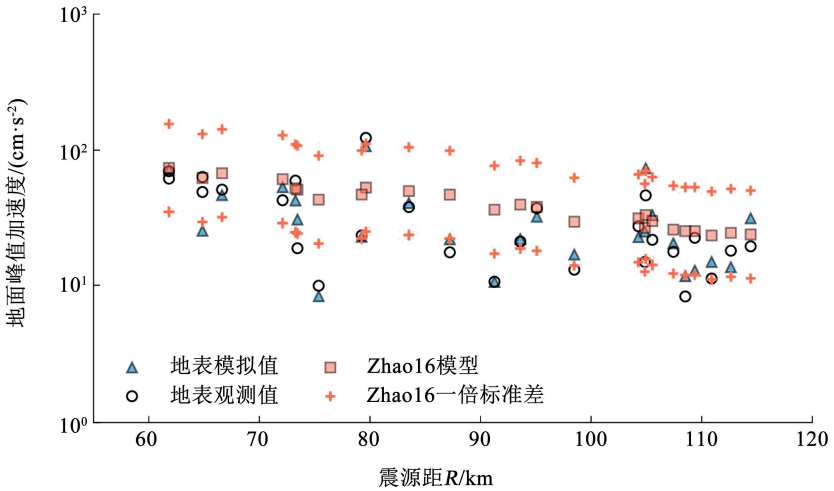
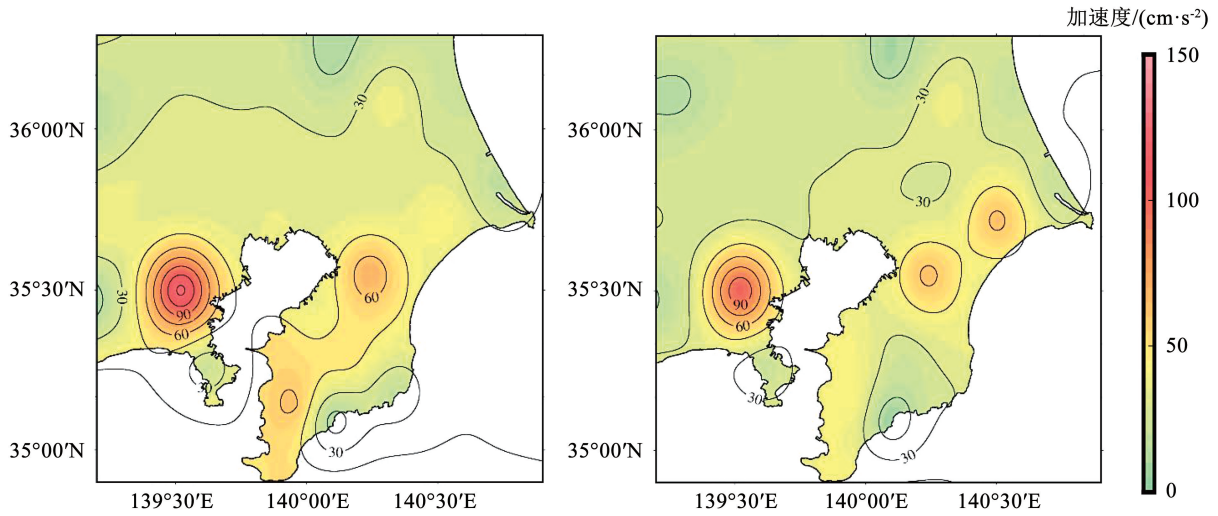


图 9　观测和模拟 A_{pg} 值与 Zhao16 衰减关系得到的 A_{pg} 值比较

Fig. 9　Comparison of A_{pg} values obtained by observation records, simulation results, and Zhao16 equations

进一步研究本次地震动的 A_{pg} 空间分布，基于井上水平向观测记录和模拟记录，利用连续曲率样条插值法方法[36]绘制地表 A_{pg} 等值线，其中地表 A_{pg} 模拟值为 30 次井上模拟值的几何平均值，结果见图 10，可以看出观测与模拟的 A_{pg} 空间分布相似，模拟记录得到的 A_{pg} 在东京地区略有低估，整体来看具有与观测记录较为一致的空间分布特征。



(a) 观测记录A_{pg}等值线 (b) 模拟记录A_{pg}等值线

图 10 模拟记录与观测记录 A_{pg}等值线对比

Fig. 10 Comparison of A_{pg} contours between simulation results and observation records

4 结 论

1)井上井下台模拟记录与观测记录的 A_{ps}幅值整体对应较好,虽然在 0.1 ~0.6 Hz 的低频段内,模拟 A_{ps}普遍存在高估现象,但在中高频段上(0.6 ~ 10 Hz),A_{ps}模拟值与观测值高度吻合。此外,Zhao16 也能很好地描述本次地震动的频谱特征,但盆地区台站的预测值在低频出现了一定程度的低估,而山地区台站并未出现上述情况,这可能是由于盆地效应及厚覆盖层对实际地震动造成了低频的放大。

2)模拟加速度时程与观测记录时程波形相似,基于 70% 能量持时回归得到的地震动持时模型可以有效改善模拟记录与观测记录在强震动段不匹配的情况,模拟加速度记录的持时也更接近真实记录。

3)地表 A_{pg}模拟值与观测值匹配良好,随机有限断层法和 Zhao16 均可以很好地描述本次俯冲带板内地震动的衰减特性。其中,Zhao16 的 A_{pg}预测值相比于模拟值和观测值普遍出现高估,这可能是目标研究区域软土层对地震动高频抑制引起的。

4)井上模拟记录与观测记录获得的 A_{pg}等值线相似度较高,通过随机有限断层法获得的模拟地震动在 A_{pg}空间分布上与此次观测到的俯冲带板内地震引起的地震动有很好的适配性。

参考文献

[1] ARORA S, JOSHI A, KUMARI P, et al. Strong ground motion simulation techniques—A review in world context [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(14): 673. DOI: 10.1007/s12517-020-05583-5

[2] GHOFRANI H, ATKINSON G M, GODA K, et al. Stochastic finite-fault simulations of the 2011 Tohoku, Japan, earthquake [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2013, 103(2B): 1307. DOI:10.1785/0120120228

[3] CHOPRA S, KUMAR D, CHOUDHURY P, et al. Stochastic finite fault modelling of M_w 4.8 earthquake in Kachchh, Gujarat, India [J]. Journal of Seismology, 2012, 16(3): 435. DOI:10.1007/s10950-012-9280-0

[4] DANG Pengfei, LIU Qifang, SONG Jian. Simulation of the Jiuzhaigou, China, earthquake by stochastic finite-fault method based on variable stress drop[J]. Natural Hazards, 2020, 103(2): 2295. DOI:10.1007/s11069-020-04083-9

[5] 何欣娟, 潘华. 2021 年云南漾濞 M_S6.4 地震的强地面运动模拟[J]. 地震地质, 2021, 43(4): 920
HE Xinjuan, PAN Hua. Simulation of strong ground motion from the 2021 Yangbi, Yunnan M_S6.4 earthquake[J]. Seismology and Geology, 2021, 43(4): 920. DOI:10.3969/j.issn.0253-4967.2021.04.012

[6] MA Wanjun, DANG Pengfei, XIE Zhinan, et al. Application of stochastic finite-fault method to marine earthquake: 2021 Fukushima earthquake in Japan [C]//2021 7th International Conference on Hydraulic and Civil Engineering & Smart Water Conservancy and Intelligent Disaster Reduction Forum (ICHCE & SWIDR). Nanjing: IEEE, 2021: 976. DOI: 10.1109/ICHCESWIDR54323.2021.9656290

[7] ZHAO J X, JIANG Fei, SHI Pan, et al. Ground-motion prediction equations for subduction slab earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2016, 106(4): 1535. DOI:10.1785/0120150056

[8] ZHAO J X, LIANG Xuan, JIANG Fei, et al. Ground-motion prediction equations for subduction interface earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2016, 106(4): 1518. DOI:10.1785/0120150034

[9] ZHAO J X, ZHOU Shuanglin, ZHOU Jun, et al. Ground-motion prediction equations for shallow crustal and upper-mantle earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2016, 106(4): 1552. DOI:10.1785/0120150063

[10] YOUNGS R R, CHIOU S J, SILVA W J, et al. Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes[J]. Seismological Research Letters, 1997, 68(1): 58. DOI:10.1785/gssrl.68.1.5

[11] ZHOU Shuanglin, ZHAO J X, HUANG Haifeng, et al. Comparison of ground-motion prediction equations developed for the horizontal component of strong-motion records from Japan[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2017, 107(6): 2821. DOI:10.1785/0120160305

[12] 胡进军，郝彦春，谢礼立. 潜在地震对我国南海开发和建设影响的初步考虑[J]. 地震工程学报，2014，36(3)：616
HU Jinjun, HAO Yanchun, XIE Lili. Effects of potential earthquakes on construction and development in South China Sea region[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(3): 616. DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2014.03.0616

[13] 周霜林. 俯冲带浅层壳内和上地幔地震动衰减关系研究[D]. 成都：西南交通大学，2018
ZHOU Shuanglin. Ground-motion prediction equations for shallow crustal and upper mantle earthquakes in subduction zone[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018

[14] ZHAO J X, ZHOU Shuanglin, GAO Pingjun, et al. An earthquake classification scheme adapted for Japan determined by the goodness of fit for ground-motion prediction equations[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2015, 105(5): 2750. DOI:10.1785/0120150013

[15] MOTAZEDIAN D. Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2005, 95(3): 995. DOI:10.1785/0120030207

[16] BOORE D M. Simulation of ground motion using the stochastic method[J]. Pure and Applied Geophysics, 2003, 160(3): 635. DOI:10.1007/PL00012553

[17] BOORE D M. Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1983, 73(6): 1865. DOI:10.1016/0040-1951(84)90122-7

[18] BERESNEV I A, ATKINSON G M. FINSIM—A FORTRAN program for simulating stochastic acceleration time histories from finite faults[J]. Seismological Research Letters, 1998, 69(1): 27. DOI:10.1785/gssrl.69.1.27

[19] BERESNEV I A, ATKINSON G M. Modeling finite-fault radiation from the ω^n spectrum[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1997, 87(1): 67. DOI: 10.1785/BSSA0870010067

[20] 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. DOI:10.1785/0120090056.

[21] HARTZELL S H. Earthquake aftershocks as Green's functions[J]. Geophysical Research Letters, 1978, 5(1): 1. DOI:10.1029/GL005i001p00001

[22] KTENIDOU O J, GELIS C, BONILLA L F. A study on the variability of kappa (κ) in a borehole: Implications of the computation process[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2013, 103(2A): 1048. DOI:10.1785/0120120093

[23] ZHAO J X. An empirical site-classification method for strong-motion stations in Japan using H/V response spectral ratio[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2006, 96(3): 914. DOI:10.1785/0120050124

[24] STRASSER F O, ARANGO M C, BOMMER J J. Scaling of the source dimensions of interface and intraslab subduction-zone earthquakes with moment magnitude[J]. Seismological Research Letters, 2010, 81(6): 941. DOI:10.1785/gssrl.81.6.941

[25] KANAMORI H, ANDERSON D L. Theoretical basis of some empirical relations in seismology[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1975, 65(5): 1073. DOI: 10.1007/BF02245320

[26] DANG Pengfei, LIU Qifang. Stochastic finite-fault ground motion simulation for the M_w 6.7 earthquake in Lushan, China[J]. Natural Hazards, 2020, 100(3): 1215. DOI:10.1007/s11069-020-03859-3

[27] GHOFRANI H, ATKINSON G M. Forearc versus backarc attenuation of earthquake ground motion[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2011, 101(6): 3032. DOI:10.1785/0120110067

[28] BOORE D M. Determining generic velocity and density models for crustal amplification calculations, with an update of the Boore and Joyner (1997) generic site amplification for $V_S(Z)=760$ m/s[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2016, 106(1): 313. DOI:10.1785/0120150229

[29] KOKETSU K, MIYAKE H, SUZUKI H. Japan integrated velocity structure model version 1[C]//15th World Conference on Earthquake Engineering 2012. Red Hook: Curran Associates, Inc., 2012: 10463

[30] ANDERSON J G, HOUGH S E. A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1984, 74(5): 1963. DOI:10.1785/BSSA0740051969

[31] DOUGLAS J, GEHL P, BONILLA L F, et al. A κ model for mainland France[J]. Pure and Applied Geophysics, 2010, 167(11): 1303. DOI:10.1007/s00024-010-0146-5

[32] 傅磊，李小军. 龙门山地区的 kappa(κ_0)模型及汶川 M_S8.0 地震的强地震动模拟[J]. 地球物理学报，2017，60(8)：2935
FU Lei, LI Xiaojun. The kappa (κ_0) model of the Longmenshan region and its application to simulation of strong ground-motion by the Wenchuan M_S8.0 earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(8): 2935. DOI:10.6038/cjg20170803

[33] HANKS T C. f_{max}[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1982, 72(6A): 1867. DOI:10.1785/BSSA07206A1867

[34] MOTAZEDIAN D. Region-specific key seismic parameters for earthquakes in northern Iran[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2006, 96(4A): 1383. DOI: 10.1785/0120050162

[35] ATKINSON G M, BOORE D M. Evaluation of models for earthquake source spectra in eastern North America[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1998, 88(4): 917. DOI: 10.1785/BSSA0880040917

[36] SMITH W, WESSEL P. Gridding with continuous curvature splines in tension[J]. Geophysics, 1990, 55(3): 293. DOI:10.1190/1.1442837

（编辑　苗秀芝）