

震源不确定性对近倾滑断层河谷场地地震动的影响研究

孟思博¹, 尹娜², 刘中宪¹, 王慎³

(1. 天津城建大学 天津市土木建筑结构保护与加固重点实验室, 天津 300384; 2. 天津城建大学 土木工程学院, 天津 300384; 3. 中国人民大学, 北京 100872)

摘要: 含不确定性的震源破裂激发的地震波传播至近地表引起的地震动具有不确定性。该文以随机变量表征震源凹凸体强度和破裂速度的不确定性, 通过设置不同破裂情景考虑凹凸体位置和初始破裂位置不确定性, 研究了考虑震源不确定性的近倾滑断层河谷场地地震动参数的空间分布, 分析了断层距和断层倾角对河谷场地地震动参数不确定性的影响规律。采用乘子降维法提高不确定性量化过程的计算效率, 基于边界元法模拟从断层破裂到场地响应的物理过程。研究表明, 震源不确定性导致地震动参数不确定性, 且河谷场地对地震波的散射效应导致地震动参数的不确定性出现非均匀放大; 河谷中心点竖向地震动峰值加速度变异系数可达 0.27, 山体竖向地震动峰值速度变异系数空间分布表现出剧烈波动现象; 河谷场地地震动变异性随断层距增大而降低, 断层距大于 4 km 后此趋于稳定, 随断层倾角增加而降低, 最大可达凹凸体强度变异性的 4 倍。

关键词: 近断层效应; 不确定性; 乘子降维法; 场地效应; 边界元法

中图分类号: TP183; P315.9

文献标志码: A

Effect of uncertainty of seismic sources on ground motions in valley sites near a dip-slip fault

MENG Sibol¹, YIN Na², LIU Zhongxian¹, WANG Shen³

(1. Tianjin Chengjian University, Tianjin Key Laboratory of Civil Structure Protection and Reinforcing, Tianjin 300384, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 3. Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: Ground motions caused by seismic waves propagating to the near surface due to the rupture of an uncertain seismic source also have uncertainty. In this paper, the uncertainties of asperity intensity and rupture velocity are represented by random variables, and three rupture scenarios are set up to consider the uncertainties of asperity location and initial rupture location. The spatial distribution of ground motion parameters in the valley near a dip-slip fault with uncertainty is investigated. The influences of the fault distance and the dip angle on the uncertainty of the ground motion parameters in the valley are analyzed. The multiplicative dimensional reduction method is used to improve the computational efficiency of the uncertainty quantification problem, and the physical process from fault rupture to site response is simulated based on the boundary element method. The results reveal that the uncertainty of seismic source leads to the uncertainty of ground motions. The scattering of seismic waves by the valley leads to the non-uniform amplification of the uncertainty. The coefficient of variation (COV) of the peak acceleration of the vertical ground motion at the center of the valley can reach 0.27. There are violent fluctuations in the spatial distribution of the COVs of the peak velocities of the vertical ground motions of the mountains. The variability of the ground motion at the valley decreases with the increase of the fault distance, and it tends to

收稿日期: 2025-01-16; 修回日期: 2025-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52478540, 52208497, 52278516)

作者简介: 孟思博 (1990—), 女, 副教授, 博士研究生, 主要从事地震工程方面研究。E-mail: sibomeng@yeah.net

通信作者: 王慎 (1988—), 女, 工程师, 硕士研究生, 主要从事工程防灾方面研究。E-mail: 20190009@ruc.edu.cn

stabilize when the fault distance is greater than 4 km. The variability decreases with the increase of the fault dip angle, and the maximum variability of the peak ground acceleration can be up to 4 times the COV of the asperity intensity.

Key words: near-fault effect; uncertainty; multiplicative dimensional reduction method; site effect; boundary element method

0 引言

我国活动断层总长超过 5 000 km,河谷场地分布广泛、数量众多,位于距活动断层 20 km 以内的区域,即近断层区域。近断层河谷场地地震动呈现出 2 种典型特征:一是由近断层效应引起的速度脉冲、竖向大振幅和长周期特征^[1];二是地震波散射效应引起的地震动参数非一致性^[2],如 2008 年我国汶川地震和 2010 年海地地震台站记录表明,河谷周围山体峰值地震动峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)分别达到河谷地表结果的 1.8 倍和 2.3 倍^[3-4]。

与此同时,数值技术已被广泛应用于地震动模拟和特性研究^[5-6],这是揭示其物理本质的常用方法。理论分析从平面 SH 波入射下二维半空间中半圆形河谷场地模型起步,研究至今已积累了丰富成果^[7],然而,将震源假设为平面波或点源的河谷场地地震动模拟均未能充分反映断层破裂面源效应。为此,部分研究采用运动学或动力学有限断层模型模拟震源,方法包括经验格林函数法、离散波数法、边界元法、有限差分法、谱元法和混合法^[8-12],这些方法已成为历史地震复现、丰富地震动数据库的有效手段,在近断层效应和河谷场地效应的耦合机制理论分析方面也给出了规律性结论^[13-15]。

此外,不确定性是地震动典型特征。受限于物探水平,断层物理参数和界面滑移特性随机性成为地震动不确定性的主要来源。地震波激发时的不确定性将随着地震波传播而传递,最终导致地表地震动不确定性。此问题为不确定输入经过确定性系统得到不确定输出的数学过程,有必要对输入与输出的变异性差异进行理论分析和科学量化,目前主要包括两类处理方法:一是基于随机混合震源模型考虑断层面位错量不确定性,主要用于历史地震复现^[16];二是采用蒙特卡洛法或逻辑树开展大量确定性样本计算获得地震动参数统计值,主要研究了断层类型、初始破裂点位置、凹凸体数量和位置、断层倾角、地震矩和破裂速度等引起的地震动变异性^[17-20],但存在计算成本高、模拟频率上限较低导致高频地震动变异性特征研究不足问题。笔者前期针对近走滑断层起伏地形地震动研究也发现高频波入射下局部场地对地震波的散射效应受不确定性影响较低频波更为显著^[21],目前倾滑断层不确定性对河谷场地地震动的影响研究尚未见报道。

鉴于此,本文以获取震源不确定性引起的近断层河谷场地地震动特征为目标,以倾滑断层破裂为例,分析震源不确定条件下近倾滑断层河谷场地地震动参数,研究凹凸体位置、凹凸体强度和破裂速度不确定性对河谷场地地震动的影响规律,并考察地震动参数变异性与断层距和断层倾角的相关性。为提高计算效率,基于乘子降维法将多维不确定性量化问题转化为少量确定性分析,其对样本数量的需求远低于蒙特卡洛法;单次确定性分析中,采用边界元法模拟频率范围为 0~10 Hz 的倾滑断层破裂过程和河谷场地中地震波传播过程。

1 分析方法

1.1 不确定性分析方法

假定震源不确定参数为随机变量,倾滑断层发震引起的场地动力响应 φ 可表示为

$$\varphi = g(\Delta) \quad (1)$$

式中: Δ 为震源不确定参数; $g(\cdot)$ 为 Δ 和 φ 间的映射关系,通常具有显著非线性和耦合性。

基于乘子降维法,场地动力响应 φ 可近似表示为^[22]

$$\varphi = g(\Delta) \approx g_0^{(1-n)} \times \prod_{i=1}^n g_i(\Delta_i) \quad (2)$$

$$g_i(\Delta_i) = g(d_1, \dots, d_{i-1}, \Delta_i, d_{i+1}, \dots, d_n) \quad (3)$$

$$g_0 = g(d_1, d_2, \dots, d_n) \quad (4)$$

式中: n 为随机变量个数; $g_i(\Delta_i)$ 为包含第 i 个随机变量的场地动力响应, 求解时将除第 i 个随机变量以外的随机变量取均值, 例如 d_{i-1} 为第 $i-1$ 个随机变量均值; g_0 为所有随机变量取均值时的场地响应。

当各随机变量相互独立时, 场地动力响应 φ 的 m 阶矩可表示为^[22]

$$E(\varphi^m) \approx E(g_0^{(1-n)} \times \prod_{i=1}^n g_i(\Delta_i))^m \approx g_0^{m(1-n)} \prod_{i=1}^n E(g_i(\Delta_i))^m \quad (5)$$

式中: $g_i(\Delta_i)$ 的 m 阶矩可通过一维数值积分计算, 采用高斯求积公式简化积分过程, 通常 5 个高斯积分点即可满足精度要求。

1.2 确定性分析方法

近断层河谷场地地震动的确定性模拟包括震源破裂和地震波场构造 2 个关键环节。本文采用运动学震源模型考虑倾滑断层破裂过程, 具体流程参考文献[13]。采用边界元法构造地震波场, 包括对沉积河谷、断层及邻近半空间表面边界离散化, 对各离散单元施加虚拟荷载。利用断层上下盘位错差、应力和位移边界条件求解虚拟荷载密度, 进而获得地表响应频域解, 并通过傅里叶变换获得场地时域响应。

1.2.1 计算模型

计算模型为位于倾滑断层上盘的沉积河谷场地, 沉积河谷包括两侧山体和中间谷地。假定谷地及两侧山体沿纵向几何和材料特征近似, 且断层面与河谷场地纵向平行, 可取横剖面二维计算模型简化考虑见图 1。倾滑断层发震时, 两侧岩土体发生沿断层面倾斜方向相对滑动, 因此属于二维模型平面内问题。定义断层尺寸为 L , 断层倾角 θ 为断层面与水平方向夹角, 埋深为 H_1 。断层到沉积层左上角的距离记为 W_1 , 山体和沉积层的宽度分别用 W_2 和 W_3 表示。计算域包括: 断层下盘 D_1 、断层上盘 D_2 (包括起伏地形) 和沉积谷地 D_3 ; 边界包括: 下盘地表 S_1 、上盘地表 S_2 和沉积谷地边界 S_3 , 图 1(b) 中分别采用黑色、蓝色和绿色表示实线。

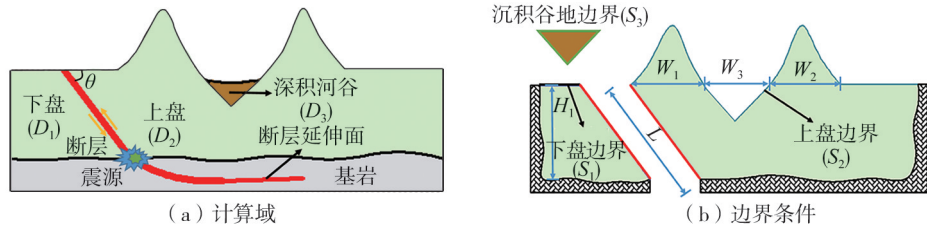


图 1 计算模型

Fig. 1 Calculation model

1.2.2 地震波场构造

假定各计算域介质均为线弹性, 简谐波作用下各计算域内任意点位移和牵引力可通过 Somigliana 积分表示为^[13]

$$u_i(x) = \int_D G_{ij}(y, \xi) f_j(\xi) dD_\xi + \int_S G_{ij}(x, \xi) \varphi_j(\xi) dS_\xi \quad (6)$$

$$t_i(x) = \int_D T_{ij}(y, \xi) f_j(\xi) dD_\xi + \int_S T_{ij}(x, \xi) \varphi_j(\xi) dS_\xi \quad (7)$$

式中: $G_{ij}(x, \xi)$ 和 $T_{ij}(x, \xi)$ 分别为坐标点 ξ 施加 j 向单位力引起的坐标点 x 处 i 方向位移和牵引力格林函数; $f_i(\xi)$ 为 i 向体力分量; $\varphi_j(\xi) dS_\xi$ 为每个计算单元在边界上的虚拟荷载密度。

对计算域各边界进行离散化, 边界条件用于求解每个计算单元分布力, 进而得到各计算域的位移和应力。对边界 S_1 、 S_2 、 S_3 进行离散, 每个边界单元位移和应力场可进一步表示为

$$u_i^{(t,n)}(x_n) = \int_{S_n} G_{ij}^{(s,n)}(x_n, y_n) \varphi_j^{(s,n)}(y_n) dS_y \quad (8)$$

$$\sigma_i^{(t,n)}(x_n) = \int_{S_n} T_{ij}^{(s,n)}(x_n, y_n) \varphi_j^{(s,n)}(y_n) dS_y \quad (9)$$

式中: 上标 t 和 s 分别为河谷场地总波场和由断层位移产生的散射波场; $n=1, 2, 3$, 分别为计算域 D_1 、 D_2 和 D_3 ; $\varphi_j^{(s,n)} dS_y$ 为边界单元上虚拟荷载密度; $G_{ij}^{(s,n)}$ 和 $T_{ij}^{(s,n)}$ 分别为基岩半空间和沉积河谷边界单元位移和应力格林函数^[13]。

结合式(8)~式(9)和边界条件可求解计算模型总波场。本问题中, 边界条件包括半空间和沉积河谷地表应力为 0, 半空间和沉积河谷交界面应力和位移连续, 断层面应力连续且存在给定的位移差。

2 方法验证

边界元法求解发震断层河谷场地确定性动力响应正确性已在文献[13]中给出验证结果,在此不再赘述;本节给出采用乘子降维法代替蒙特卡洛法开展考虑震源参数不确定性的近倾滑断层河谷场地动力响应适用性。

验证模型包括 2 个高为 240 m 的高斯型山体 and 1 个 V 形沉积谷地,沉积谷地宽度为 200 m、深度为 100 m,见图 2。倾滑断层延伸至地表,尺寸为 10 km,断层倾角为 45°,半空间与沉积谷地间的剪切波速比为 0.5,密度比为 1.2,模拟频率为 2、5、10 Hz。考虑倾滑断层破裂速度 ν_r 和凹凸体强度 D_a/D 为随机变量,其中 D_a 为凹凸体位错量, D 为断层平均位错量。参考文献[17],表 1 给出了 2 个随机变量的矩信息和概率分布函数。根据乘子降维法原理,需构建 $11(5 \times \text{随机变量数量} + 1 = 11)$ 个计算模型,见表 2。2 个随机变量的高斯求积(式(5))均采用 Hermite 展开式,因此 5 个积分点对应的计算模型与参数中,分别有 1 组与破裂速度和凹凸体强度取均值的工况一致,故实际计算模型为 9 个。为验证方法适用性,采用蒙特卡洛法计算了 1 000 个随机样本的统计值作对比。

不同入射频率下乘子降维法(multiplicative dimensional reduction method, M-DRM)和蒙特卡洛法(Monte Carlo simulation, MCS)求解的河谷场地地表位移幅值均值和均方根(root mean square, RMS)见图 3、图 4。结果表明,在低、中、高频情况下,地表位移幅值均值和 RMS 与蒙特卡洛法结果吻合良好,表明了乘子降维法对此问题的适用性。

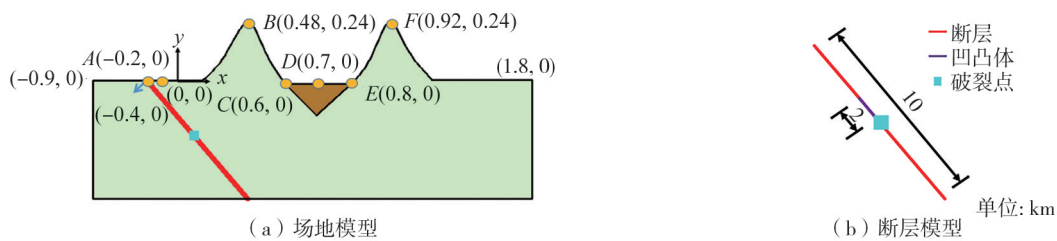


图 2 M-DRM 精度验证的计算模型

Fig. 2 Calculation model for accuracy verification of M-DRM

表 1 倾滑断层不确定参数概率分布和矩信息

Table 1 Probabilistic distribution and moment information of uncertain parameters of the dip-slip fault

变量	名称	分布	均值	均方根 (RMS)
$\nu_r / (\text{m/s})$	破裂速度	正态分布	2 720	136.0
D_a/D	凹凸体强度	正态分布	$2^{[17]}$	0.4

表 2 乘子降维法计算工况及参数

Table 2 Calculation cases and parameters of M-DRM

随机变量	工况	权重	破裂速度/(m/s)	凹凸体强度/D	
均值	1	—	2 720	2.0000	
	破裂速度	2	0.011 26	2 331	2.0000
		3	0.222 08	2 536	2.0000
		4(与工况 1 相同)	0.533 33	2 720	2.0000
		5	0.222 08	2 904	2.0000
		6	0.011 26	3 109	2.0000
凹凸体强度	7	0.011 26	2 720	0.857 2	
	8	0.222 08	2 720	1.457 8	
	9(与工况 1 相同)	0.533 33	2 720	2.0000	
	10	0.222 08	2 720	2.542 2	
	11	0.011 26	2 720	3.142 8	

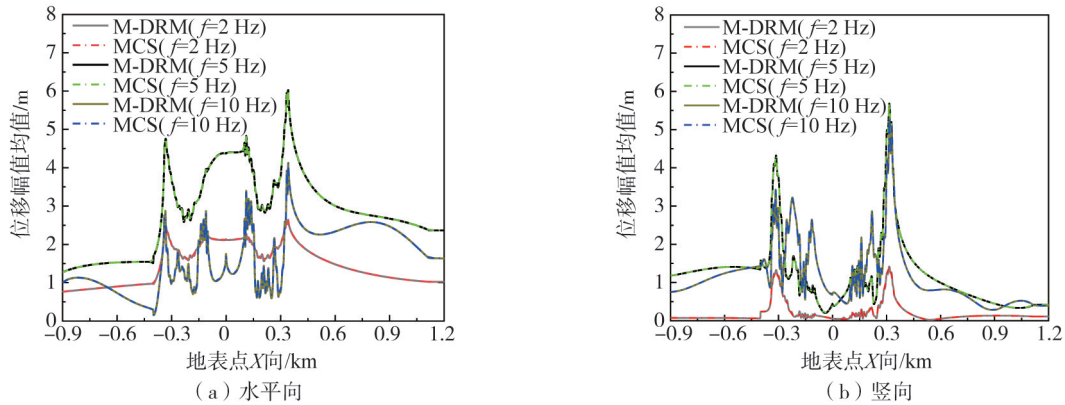


图3 不同入射频率波下河谷场地各方向位移幅值均值

Fig. 3 Displacement amplitude means in different directions of the valley site under different incident frequency waves

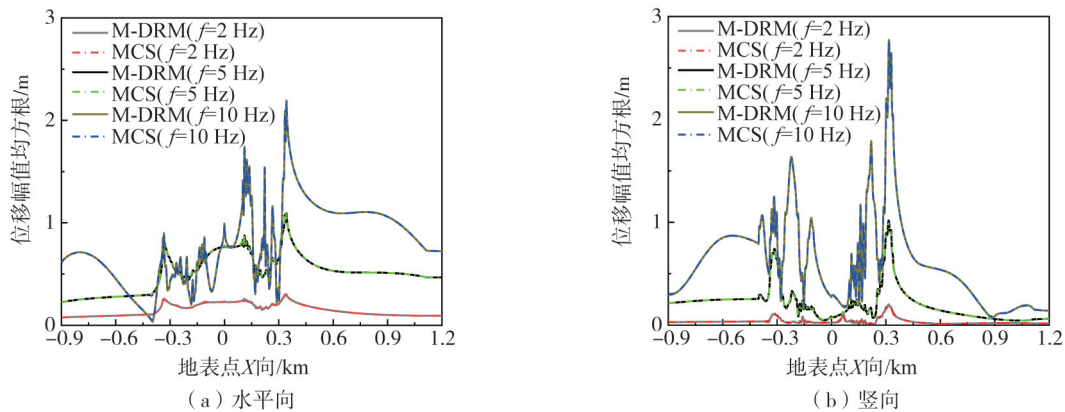


图4 不同入射频率波下河谷场地各方向位移幅度均方根

Fig. 4 Displacement amplitude RMS in different directions of the valley site under different incident frequency waves

3 数值分析

本节分析了断层破裂速度和凹凸体强度不确定性传播引起的近倾滑断层河谷场地动力响应。模拟频带范围 $0\sim 10\text{ Hz}$ ^[23],选取峰值加速度(PGA)和峰值速度(peak ground velocity, PGV)这2个典型地震动参数的均值和变异性作为考察指标,对比了有无河谷场地条件时场地响应差异,考察了断层倾角和河谷场地与断层间距对此差异的影响规律。计算模型、确定性参数、随机变量与第1节、第2节一致。考虑了3种不同破裂情景^[21]:凹凸体长度均为 2 km ,断层初始破裂点位于凹凸体底部,初始破裂点到地表距离分别为 5.0 、 7.5 、 10.0 km ,分别命名为破裂情景1、情景2和情景3。将断层与地表交点到沉积谷地表面左侧边缘的距离定义为断层距,采用变异系数(coefficient of variation, COV)表征场地响应变异性,COV为均方差与均值的比值。

3.1 河谷场地动力响应分析

本节比较了有无河谷场地条件下近倾滑断层场地动力响应均值和变异性,断层距为 1 km 、断层倾角为 45° 。3种破裂情景下场地PGA和PGV均值、变异系数见图5、图6。图中绿色和蓝色填充域表示均值 ± 1 倍均方差,灰色域和黄色域分别为山体和谷地所在位置(下同)。

由图5和图6可知,无河谷场地时,水平向和竖向PGA和PGV均值呈现远离断层而减弱趋势,当凹凸体和初始破裂点靠近地表时,地震动强度整体上更大,与实测记录规律基本一致^[4]。例如,当凹凸体距地表 5 km 时,PGA和PGV均值是距离为 10 km 时结果的2倍。水平PGA和PGV变异性均低于设定的凹凸体强度COV,COV空间分布规律性较强。

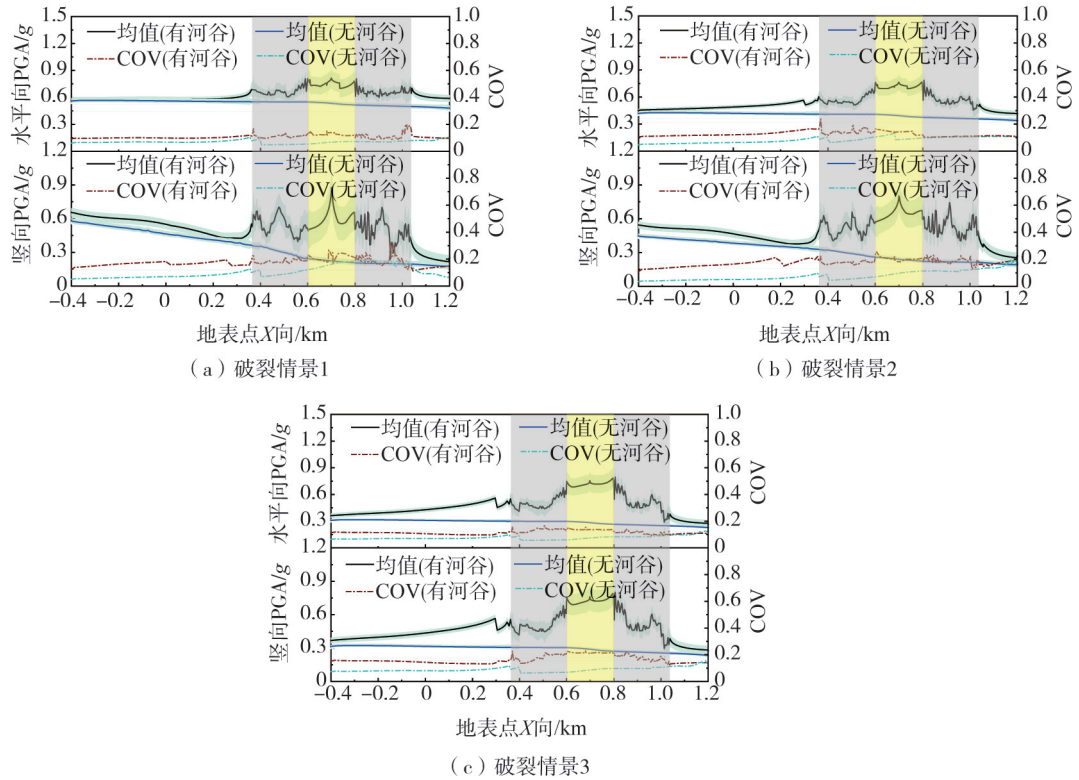


图 5 有无局部场地效应下 PGA 均值和变异系数

Fig. 5 Means and COVs of PGAs with and without local site effect

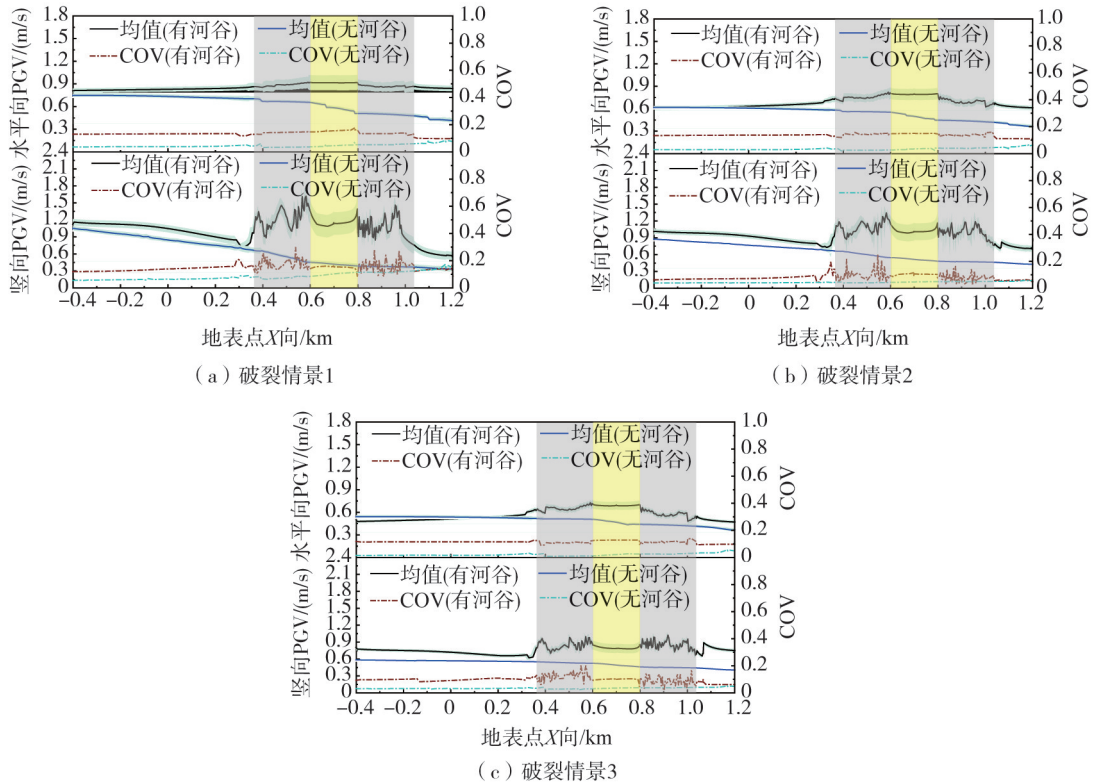


图 6 有无局部场地效应下 PGV 均值和变异系数

Fig. 6 Means and COVs of PGVs with and without local site effect

然而,河谷场地地震动空间分布更为复杂。河谷场地显著放大了水平向和竖向 PGA 和 PGV 均值;例如,在破裂情景 1 中,无河谷场地时 D 点竖向 PGA 均值为 0.22 g,有河谷场地时 D 点竖向 PGA 均值为其 3.9 倍;山顶 B 点 PGV 也可观察到类似现象,无河谷场地时其均值为 0.56 m/s,河谷场地导致其放大 2.5 倍。

此外,考虑河谷场地效应后,山体和谷地 PGA 变异性相较于未存在局部场地时更显著。3种破裂情景下,水平向 PGA 的 COV 均为 0.18,而竖向 PGA 变异性则随着凹凸体位置向下移动而减小。例如,在破裂情景 1 中, D 点(位于沉积谷地中部)竖向 PGA 的 COV 达到 0.27;而在破裂情景 3 中, D 点竖向 PGA 的 COV 为 0.26,表明了分析河谷场地地震动变异性时考虑凹凸体位置的重要性。同时,山体竖向 PGV 的 COV 波动剧烈,而谷地地表竖向 PGV 的 COV 基本保持不变。整体上,震源参数不确定性对近断层河谷场地地震动参数具有显著影响,尤其是谷地水平向和竖向 PGA、两侧山体竖向 PGV。

3.2 断层距对地震动空间变异性的影响

本节讨论了断层距 d 对近断层河谷场地地震动空间变异性的影响。断层距设置为 1、4、7 km,固定局部场地位置坐标、改变断层位置以调整断层距离,河谷场地范围在 x 为 0.36~1.04 km 之间。断层倾角为 45° ,其他参数与第 3.1 节相同。

不同断层距下河谷场地 PGA 和 PGV 均值和 COV 空间分布见图 7、图 8。结果表明,整体上,当断层距为 4、7 km 时,不同破裂情景下水平向和竖向 PGA 及 PGV 均值分布近似,且小于断层距为 1 km 的结果;当断层距从 1 km 变化到 4 km 时,谷地中心点水平向 PGA 均值减小 0.13 g,而当断层距从 4 km 变化到 7 km 时,变化量约为 0.06 g。

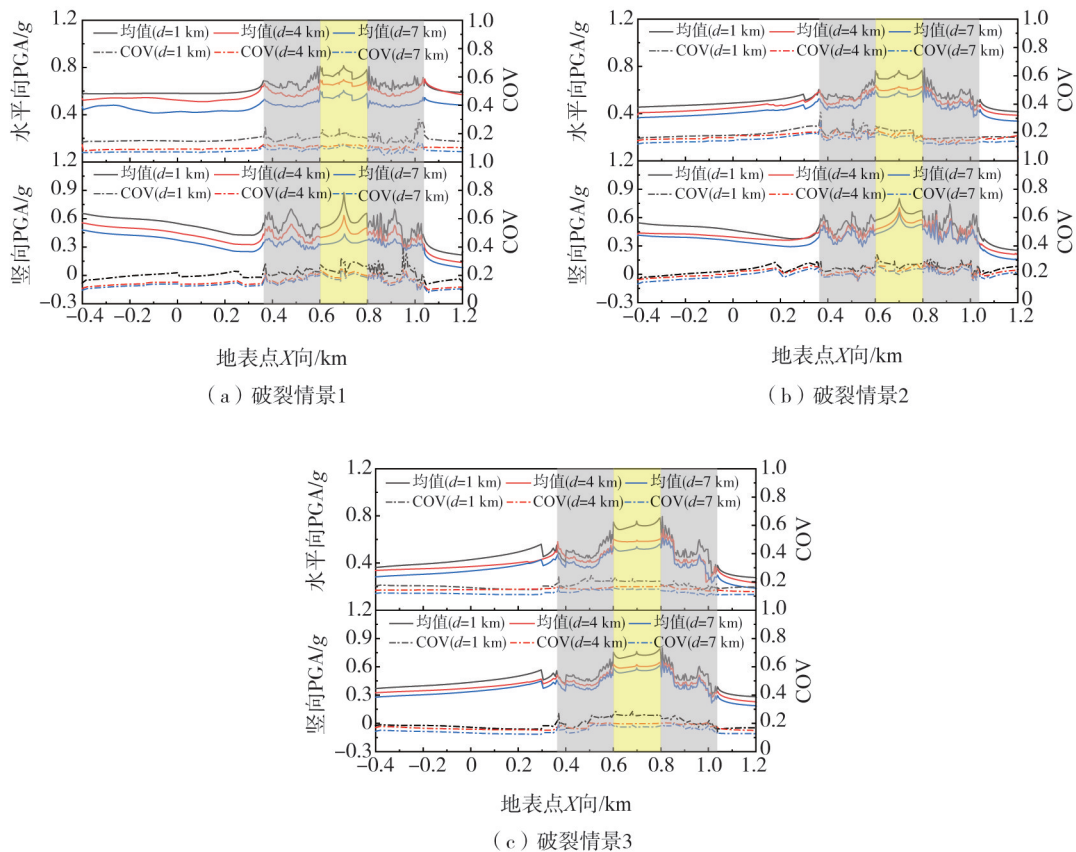


图 7 不同断层距条件下河谷场地 PGA 均值和变异系数

Fig. 7 Means and COVs of PGAs for valley sites under different fault distance conditions

变异性方面,随着断层距增加,河谷场地 PGA 和 PGV 变异性呈现不同程度减小。断层距为 1、4 km 时结果差异显著,而断层距为 4、7 km 时结果相似,此现象与 PGA 和 PGV 均值分布一致。例如,在破裂情景 1 中,河谷表面中心点($x=0.7$ km)处竖向 PGV 的 COV 在 1、4、7 km 的断层距下分别为 0.37、0.28、0.25;类似现象也出现在其他破裂情景下的 PGA 和 PGV 变异性分布中。整体上,当凹凸体和初始破裂点靠近地表时,1、4 km 断层距对应的 PGA 和 PGV 的 COV 在 x 为 $-0.4 \sim 1.2$ km 范围内差异显著;而当凹凸体和初始破裂点远离地面时,1、4 km 断层距对应的 PGA 和 PGV 的 COV 仅在谷地表面有显著差异。结果表明,在分析断层距对河谷场地 PGA 和 PGV 变异性影响时,应考虑凹凸体位置、凹凸体强度及破裂速度不确定性。

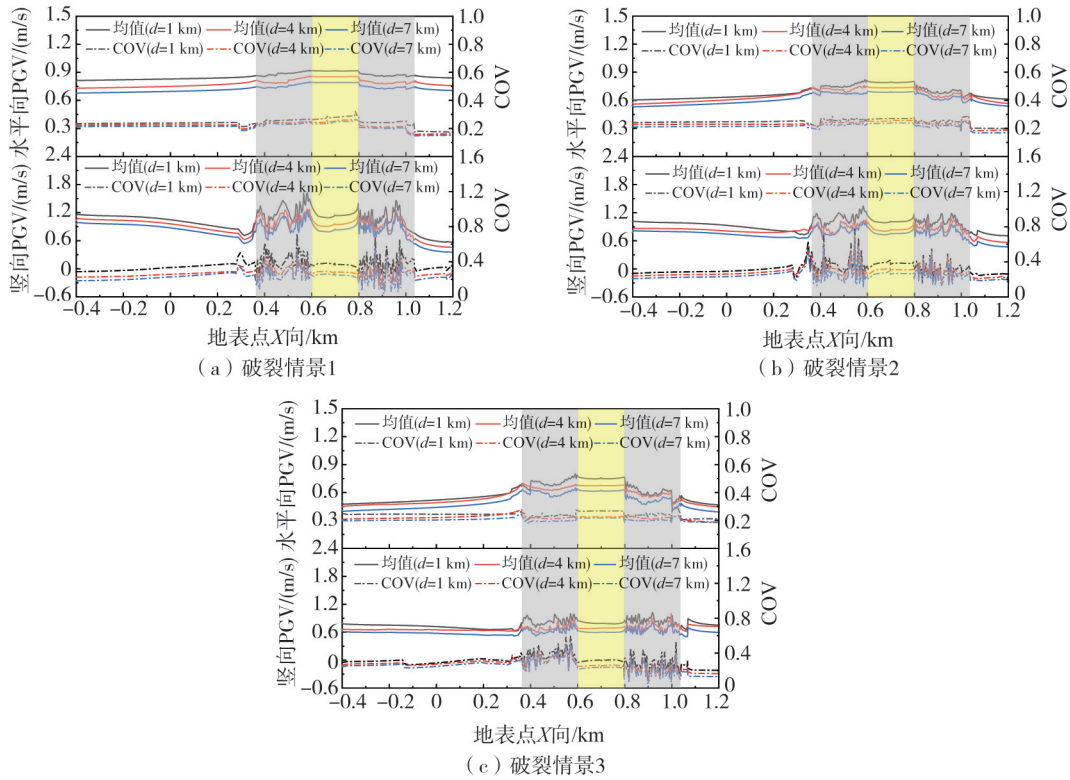


图 8 不同断层距条件下河谷场地 PGV 均值和变异系数

Fig. 8 Means and COVs of PGVs for valley sites under different fault distance conditions

3.3 断层倾角对地震动空间变异性的影响

本节讨论了断层倾角 θ 对近倾滑断层河谷场地地震动参数的影响。断层倾角设置为 30° 、 45° 、 60° ，断层距为 1 km，其他参数与第 3.1 节相同。不同断层倾角下河谷场地 PGA 和 PGV 均值和 COV 见图 9、图 10。

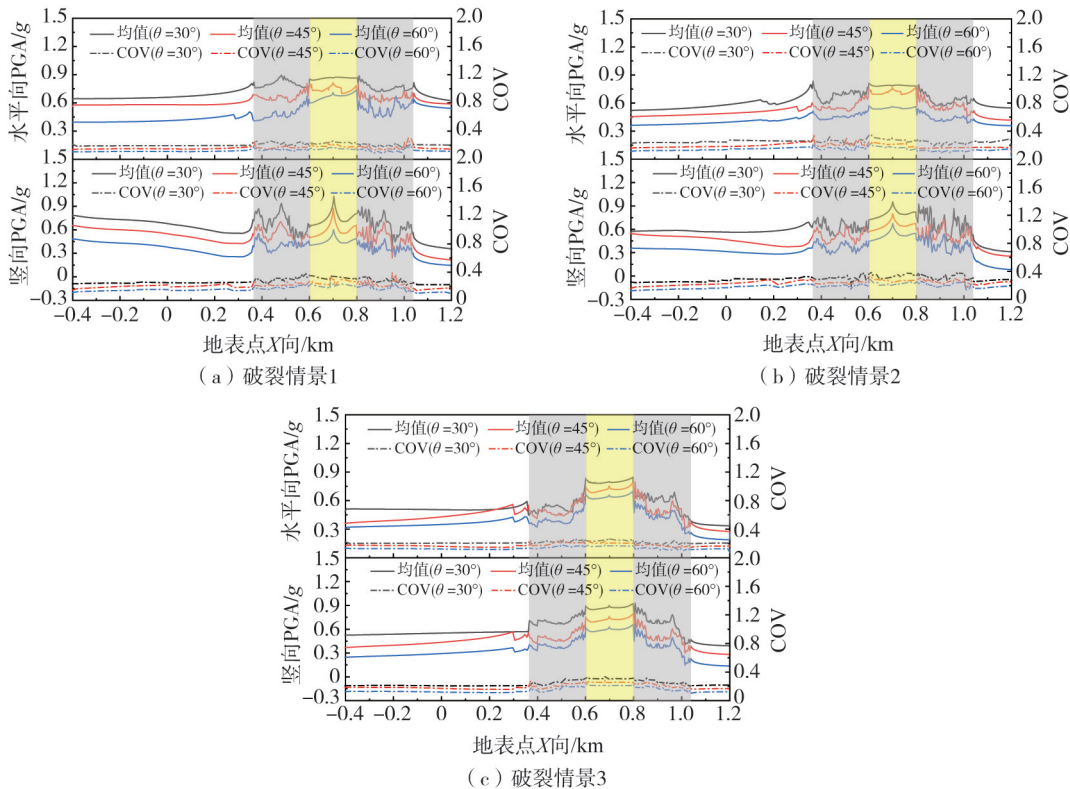


图 9 不同断层倾角条件下河谷场地 PGA 均值和变异性

Fig. 9 Means and COVs of PGAs for valley sites under different fault angle conditions

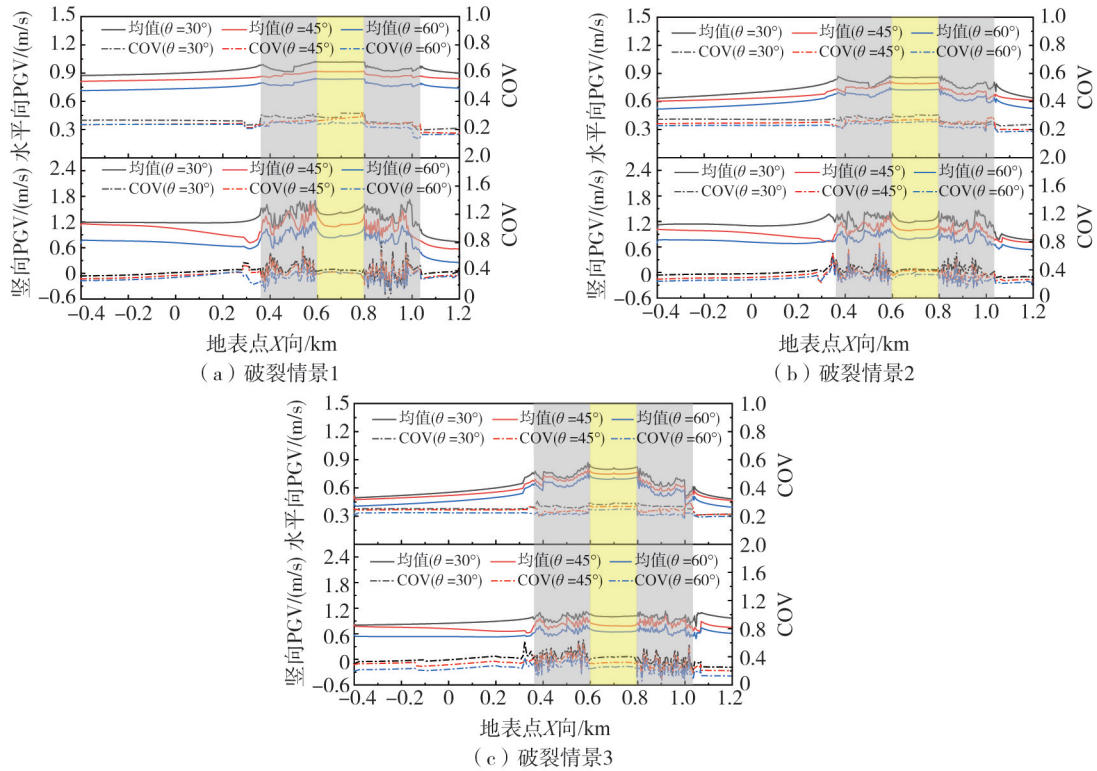


图10 不同断层倾角条件下河谷场地 PGV 均值和变异性

Fig. 10 Means and COVs of PGVs for valley sites under different fault angle conditions

由图9和10可知,水平向和竖向PGA和PGV均值随着断层倾角的增加而减小,原因在于断层面接近水平向时,断层上下盘相对位错直接推动地表产生水平位移,且导致更大的竖向挤压,导致地震动强度增大,此结论与已有研究一致^[13]。例如,在破裂情景1中,30°倾角下竖向PGA最大均值为1.03g,而在60°倾角条件下竖向PGA最大均值仅为0.60g,PGV亦存在类似情况。在破裂情景3中,由于凹凸体和初始破裂点距离地表较远,PGA和PGV受断层倾角影响较小;例如,在破裂情景1中,30°倾角下竖向PGV最大均值为1.72m/s,而60°倾角对应结果为1.21m/s,相差0.51m/s,而情景3中PGV仅相差0.30m/s。

河谷场地PGA和PGV变异性随着断层倾角的减小而增大,半空间场地地表点PGA和PGV变异性也表现出相似规律,说明变异性随着断层倾角的减小而增大,主要原因是断层引起的地震动强度整体提高,而非河谷场地效应。竖向PGV最大COV出现在破裂情景1、倾角为30°、 $x=0.87$ km(右侧山体)时,为0.83,达到了凹凸体强度变异性的4倍、破裂速度变异性的8倍,表明在某些破裂情景下,断层凹凸体强度和破裂速度不确定性在地震波传播过程中显著放大,影响竖向PGV变异性,且不确定性放大效应与断层倾角和地表位置密切相关。

4 结论

本文探讨了断层凹凸体位置、凹凸体强度和破裂速度不确定性对近倾滑断层河谷场地地震动参数的影响,研究了不同断层距和断层倾角条件下地震动空间变异性差异,得出如下主要结论:

1)河谷场地显著放大了水平向和竖向地震动均值,震源不确定性对近倾滑断层河谷场地地震动参数具有显著影响,尤其是谷地水平向和竖向PGA、两侧山体竖向PGV;河谷中心点竖向PGA均值可为无河谷场地结果的3.9倍以上,PGA变异系数可达0.27;山体竖向PGV变异系数剧烈波动而谷地结果近似不变。

2)在1、4km断层距下,河谷场地水平向和竖向PGA和PGV均值和变异性分布差异显著,而在4、7km断层距下结果较为近似;断层距为1、4、7km时,河谷中心点竖向PGV变异系数分别为0.37、0.28、0.25,表明河谷场地PGA和PGV均值和变异性随断层距增加而非线性减小;断层距对地震动变异性的影响范围与凹凸体和初始破裂点位置有关。

3)河谷场地水平向和竖向PGA和PGV均值、变异性随着断层倾角的增加而减小,河谷场地对不确定性的放大效应强弱亦与断层倾角有关,此规律不随凹凸体和初始破裂点位置改变;河谷两侧山体竖向PGV最大变异系数可达0.83,为凹凸体强度变异性4倍。

参考文献:

- [1] 刘启方,袁一凡,金星,等.近断层地震动的基本特征[J].地震工程与工程振动,2006,26(1):1-10.
LIU Qifang, YUAN Yifan, JIN Xing, et al. Basic characteristics of near-fault ground motion [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2006, 26(1): 1-10. (in Chinese)
- [2] 赵磊超,宋志强,王飞,等.SH波斜入射下河谷场地非一致地震动特性及影响因素分析[J].振动与冲击,2022,41(23):109-118.
ZHAO Leichao, SONG Zhiqiang, WANG Fei, et al. Non-uniform ground motion characteristics and influencing factors of valley site under oblique incidence of SH wave[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(23): 109-118. (in Chinese)
- [3] ZHANG Z Z, FLEURISSON J A, PELLET F L. A case study of site effects on seismic ground motions at Xishan Park ridge in Zigong, Sichuan, China[J]. Engineering Geology, 2018, 243: 308-319.
- [4] HOUGH S E, ALTIDOR J R, ANGLADE D, et al. Localized damage caused by topographic amplification during the 2010 $M_{7.0}$ Haiti earthquake[J]. Nature Geoscience, 2010, 3(11): 778-782.
- [5] 陈祖安,白武明,林邦慧,等.1966年以来华北地区一系列七级大震破裂过程的数值模拟[J].地球物理学报,2003,46(3):373-381.
CHEN Zuan, BAI Wuming, LIN Banghui, et al. Numerical simulation for rupture processes of a series of strong earth quakes ($M_s > 7$) in north China since 1966[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(3): 373-381. (in Chinese)
- [6] MOGI H, KAWAKAMI H. Analysis of scattered waves on ground with irregular topography using the direct boundary element method and Neumann series expansion[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(4): 1144-1157.
- [7] 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 Yufeng, DAI Denghui, ZHANG Ning. Progress and prospect of topographic amplification effects of seismic wave in canyon sites[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(4): 734-752. (in Chinese)
- [8] 张有兵,章文波.用经验格林函数法模拟2008年日本岩手——宫城地震的强地面运动[J].地震学报,2010,32(3):320-331,382.
ZHANG Youbing, ZHANG Wenbo. Strong ground motion simulation of the 2008 Iwate-Miyagi, Japan, earthquake using empirical Green's function method[J]. Acta Seismologica Sinica, 2010, 32(3): 320-331, 382. (in Chinese)
- [9] TAKENAKA H, KENNETT B L N, FUJIWARA H. Effect of 2-D topography on the 3-D seismic wavefield using a 2.5-D discrete wavenumber-boundary integral equation method[J]. Geophysical Journal International, 1996, 124(3): 741-755.
- [10] 何彦锋,孙伟家,符力耘.复杂介质地震波传播模拟中边界元法与有限差分法的比较研究[J].地球物理学进展,2013,28(2):664-678.
HE Yanfeng, SUN Weijia, FU Liyun. Comparison of boundary element method and finite-difference method for simulating seismic wave propagation in complex media[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(2): 664-678. (in Chinese)
- [11] 严珍珍,张怀,杨长春,等.汶川大地震地震波传播的谱元法数值模拟研究[J].中国科学(D辑:地球科学),2009,39(4):393-402.
YAN Zhenzhen, ZHANG Huai, YANG Changchun, et al. Numerical simulation study of spectral element method for seismic wave propagation of the Wenchuan Great Earthquake[J]. Science in China(Series D (Earth Sciences)), 2009, 39(4): 393-402. (in Chinese)
- [12] BOUCHON M. A simple, complete numerical solution to the problem of diffraction of SH waves by an irregular surface[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1985, 77(1): 1-5.
- [13] 刘中宪,刘英,孟思博,等.基于间接边界元法的近断层沉积谷地地震动模拟[J].岩土力学,2021,42(4):1141-1155,1169.
LIU Zhongxian, LIU Ying, MENG Sibao, et al. Near-fault ground motion simulation of alluvial valley based on indirect boundary element method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(4): 1141-1155, 1169. (in Chinese)
- [14] ZHANG Z G, ZHANG W, CHEN X F. Three-dimensional curved grid finite-difference modelling for non-planar rupture dynamics[J]. Geophysical Journal International, 2014, 199(2): 860-879.
- [15] JAYALAKSHMI S, DHANYA J, RAGHUKANTH S T G, et al. 3D seismic wave amplification in the Indo-Gangetic basin from spectral element simulations[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 129(2): 105923.
- [16] 孙晓丹,王罡,刘成清.芦山地震有限断层混合震源模型模拟[J].地震工程与工程振动,2013,33(4):15-20.
SUN Xiaodan, WANG Gang, LIU Chengqing. Finite fault models of the Lushan Earthquake made by using hybrid slip model[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2013, 33(4): 15-20. (in Chinese)
- [17] YAMADA M, SENNA S, FUJIWARA H. Statistical analysis of ground motions estimated on the basis of a recipe for strong-motion prediction: approach to quantitative evaluation of average and standard deviation of ground motion distribution[J]. Pure and Applied Geophysics, 2011, 168(1/2): 141-153.
- [18] FORTUNO C, DE LA LERA J C, GONZALEZ G, et al. Rupture parameter sensitivity of low frequency ground motion response spectra using synthetic scenarios in north Chile[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2021, 19(12): 4833-4864.
- [19] RIPPERGER J, MAI P M, AMPUERO J P. Variability of near-field ground motion from dynamic earthquake rupture simulations[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2008, 98(3): 1207-1228.
- [20] MORATTO L, SARAIO A, VUAN A, et al. The 2011 M_w 5.2 Lorca earthquake as a case study to investigate the ground motion variability related to the source model[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2017, 15(9): 3463-3482.
- [21] 孟思博,魏石涛,刘中宪,等.考虑震源不确定性的近断层高山峡谷场地地震动变异性分析[J].地震学报,2024,46(6):1034-1050.
MENG Sibao, WEI Shitao, LIU Zhongxian, et al. Ground motion variability of a mountain-canyon site near a strike-slip fault considering uncertainty of source[J]. Acta Seismologica Sinica, 2024, 46(6): 1034-1050. (in Chinese)
- [22] ZHANG X F, PANDEY M D. Structural reliability analysis based on the concepts of entropy, fractional moment and dimensional reduction method[J]. Structural Safety, 2013, 43: 28-40.
- [23] BJERRUM L W, SØRENSEN M B, OTTEMÖLLER L, et al. Ground motion simulations for Izmir, Turkey: Parameter uncertainty[J]. Journal of Seismology, 2013, 17(4): 1223-1252.