

贾晓辉,曹秀玲,王晓山. 2024. 考虑地形效应的随机有限断层法地震动模拟研究[J]. 地震研究, 47(4): 619–626, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0019.

Jia X H, Cao X L, Wang X S. 2024. Topographic effect related seismic simulation with the stochastic finite-fault method[J]. *Journal of Seismological Research*, 47(4): 619–626, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0019.

考虑地形效应的随机有限断层法地震动模拟研究*

贾晓辉¹, 曹秀玲¹, 王晓山²

(1. 河北地质大学 城市地质与工程学院, 河北省地下人工环境智慧开发与管控技术创新中心, 河北 石家庄 050031;
2. 河北红山巨厚沉积与地震灾害国家野外科学观测研究站, 河北 邢台 054000)

摘要: 为在强地震动模拟计算中实现地震动的地形效应, 采用地震动随机模拟中的有限断层法, 依据山地中的局部场地条件和地形特征, 提出在随机模型中构建局部场地放大项和高频衰减联合的场地效应项表征地形效应的方法, 并以位于张家口典型山地地形的崇礼冬奥会场址区为研究区, 结合近场地震构造背景, 完成场址区可能面临的强地震动场计算分析。结果表明: ①计算得到崇礼场址区潜在最大地震动强度可能会达到 210 cm/s^2 ; ②山地模型与平层模型的对比研究得到不考虑地形效应的平层模型会低估地震动特性在山地地形的真实性; ③在随机有限断层法中采用相应的局部场地放大系数和高频衰减因子组成的场地联合效应实现地形效应的表达途径是可行的, 并且本方法在山地地形效应强度估计的准确性和地震动场计算效率方面具有一定优势。

关键词: 地形效应; 随机有限断层法; 强地面运动模拟; 冬奥会场址

中图分类号: P315.91 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2024)04-0619-08
doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0019

0 引言

在地震工程学中, 影响地震动特性的因素包括震源破裂过程、地震波传播介质路径和场地条件。其中, 场地条件一般指局部地质条件, 如工程所处点位近地表的地基土壤场地类型、沉积层厚度、地下水位、微地貌地形等工程地质概况。大量的地震现场震害调查、强地震动观测记录分析、强地面运动理论计算分析和数值模拟研究表明, 局部场地条件是引起地震动强度分布呈现局部变化的主要因素。

在1970年云南通海7.8级、2008年四川汶川8.0级、2011年四川芦山7.0级、2014年云南鲁甸6.5级等地震现场调查中均发现, 局部地形中的凸起山体、凹陷盆地等不规则地形会引起地震动

特性局部变化, 进而加重地表震害并发生地震烈度异常现象(胡聿贤, 2006; 薄景山等, 2009)。受地形效应的影响, 在2011年芦山7.0级、2014年鲁甸6.5级等中强地震的近场区山体基岩强震台上, 均获取到水平向加速度峰值达 1 g 的自由场加速度时程(任叶飞等, 2014)。王伟(2011)对1999年中国台湾集集7.6级地震、汶川8.0级地震中的山体地形地震动记录进行处理分析, 发现山地地形主要放大地震动的高频部分。近年来, 一些学者运用谱元法、有限差分法、有限元法等数值分析技术(高孟潭等, 2002; 王海云, 谢礼立, 2010; 付长华等, 2012; 蒋涵等, 2015), 从理论上对影响山体地形效应的因素进行了深入讨论。针对地形效应的理论研究, 在震源破裂、地震动传播路径等方面采用简单模型是可行的, 若要实现设定地震的强地面运动真实模拟, 则需建

* 收稿日期: 2023-01-30.

基金项目: 河北省高校基本科研业务费项目(QN202205); 河北省地震科技星火计划项目(DZ2021113000001).

第一作者简介: 贾晓辉(1987-), 讲师, 硕士生导师, 主要从事地下结构抗震和强地面运动模拟研究.

E-mail: jiaxiaohui@126.com.

立含起伏地形的地下介质三维速度结构模型、设定地震的震源模型,但这类模型的建模和计算过程会耗费大量人力和机时。除以上确定性理论方法外, Motazedian 和 Atkinson (2005) 提出了基于动力学拐角频率的随机有限断层法,该方法已成为高频地震动加速度时程模拟计算的主要方法之一,被广泛应用于中强地震的高频成分模拟和活断层的地震动强度估计研究。

随机有限断层法所合成的地震动成分主要为高频段,这正好与山地起伏地形放大的地震动成分为高频段契合,并且随机法具有建模方便、计算效率高等优点。因此,本文选用随机有限断层法,尝试改进模型中的局部场地效应项来实现地形效应的模拟计算,并选取张家口崇礼冬奥会场址区为研究区,结合张家口地区地震构造背景,完成考虑地形效应的近场区强地面运动计算分析。

1 研究方法

随机有限断层法是半经验半理论方法,地震动计算先由震源、传播路径和场地效应三者频率域乘积拟合得到地震动傅立叶谱,再转换到时域生成剪切波地震动时程 (Beresnev, Atkinson, 1999; Atkinson *et al.*, 2009; Boore, 2009; 高阳等, 2014)。在震源部分,将发震断层划分成若干子断层,然后使用含拐角频率的子断层震源谱公式计算各个子断层在观测点产生的地震动,进而叠加合成观测点地震动时程,如图 1 所示。该方法能满足地震矩和辐射能守恒,并克服子断层对结果的不确定影响,从而保证了合成地震动结果的可靠性 (Boore, 2009)。以第 ij 个子断层为例,其在观测点所产生的地震动傅立叶谱计算公式为:

$$A_{ij}(f) = E_{ij} H_{ij} G(R_{ij}) e^{-\frac{\pi R_{ij}}{Q(f)\beta}} S(f) e^{-\pi/\kappa} \quad (1)$$

式中: E_{ij} 为震源谱; H_{ij} 为低频比例因子; $G(R_{ij})$ 为几何衰减传播函数; $Q(f)$ 为品质因子; $S(f)$ 为场地放大因子; κ 为高频衰减因子; f 为频率; β 为剪切波速; R_{ij} 为第 ij 个子断层到观测点的距离。

式 (1) 中场地放大项 $S(f)$ 和高频衰减项 $e^{-\pi/\kappa}$ 分别表征地震动合成中局部场地土放大和场地高频衰减的作用,本文将二者在频率域的乘积

称为局部场地效应影响项 $G(f)$, 表示为:

$$G(f) = S(f) e^{-\pi/\kappa} \quad (2)$$

其中,局部场地放大项 $S(f)$ 与场地土类型、覆盖层厚度密切相关。Boore 和 Atkinson (1987) 已建立了北美地区基岩场地和非常坚硬基岩场地的局部放大系数,我国也在河北、新疆等地区建立了 II 类和 III 类场地平均放大系数 (贾晓辉, 2019; 姜慧, 2005)。高频衰减项中的 κ 是地震动模拟中表征地震动频谱特性的重要参数,其物理意义虽然尚未充分认识,但其取值与场地土类型、高程、地形起伏等因素密切相关。如傅磊和李小军 (2017) 对汶川地震的强震动台场地高频衰减系数取值研究表明,山地、起伏地形中的 κ 衰减较慢,他们还建立了四川地区场地高频衰减因子与高程、坡度的经验关系。综上,本文在随机有限断层法中结合观测点场地土类型、地形等因素,提出局部场地放大项和高频衰减项联合的场地效应来表征各个观测点的地形效应,并将其运用到山地地形的合成地震动计算中。

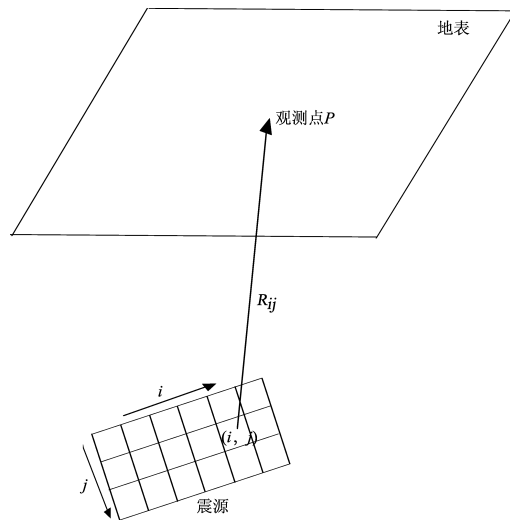


图 1 随机有限断层模型示意图

Fig. 1 Sketch of the stochastic finite - fault model

2 近场强地面运动场计算

2.1 近场地震构造背景

本文所选张家口崇礼冬奥会场址地处我国华北地块北缘,在地质构造单元上,该研究区位于

张家口—渤海活动构造带西段，并处于太行山隆起带、燕山隆起带和山西地堑的交汇部位。研究区内地形和地貌呈多样化，其北部为坝上高原，属内蒙古高原的南缘地带，中南部为坝下山地、山间盆地地貌区，整体上呈西北高、东南低的区域地貌格架。崇礼县正好位于坝上高原的南部边缘，地形异常陡峭，沟谷交错纵横，高程分布在650~1 800 m，相对高差明显可见，是研究地震动地形效应的理想示范区（图2）。

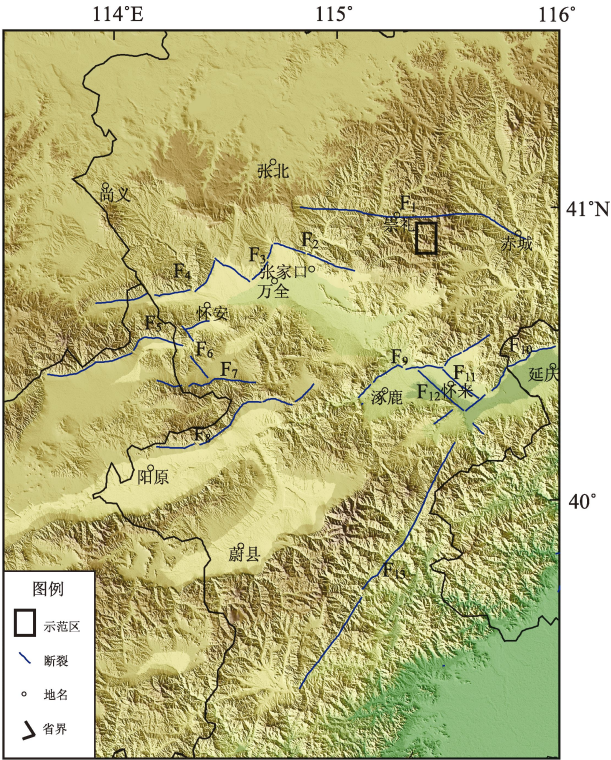
由图2可见，研究区内活动断裂较为发育，断裂几何形态较复杂，地震活动性较强（周江林等，2015）。其中，NE-NEE向断裂主要以正断活动为主，规模较大且延伸长度长；NW-NWW向断裂具有明显的正断兼左旋走滑特征，且在盆地中多呈隐伏状分布。NE-NEE向和NW-NWW向断裂共同控制了研究区第四纪盆地，如张宣盆地、延矾盆地、怀涿盆地等，主要活动断裂的几何学和运动学特征参数见表1。

尚义—赤城断裂和张家口断裂是崇礼冬奥会场址近场区的两条重要活动断裂，二者与《中国地震动参数区划图》（GB 18306—2015）中划分的张北潜在震源区和张家口潜在震源区相对应（高孟潭，2015）。

表1 张家口地区主要活动断裂特征

Tab. 1 Characteristics of the major active faults in Zhangjiakou region

| 断裂名称 | 长度 /km | 产状 | | | 断层 性质 | 活动 时间 |
|-----------------------------|-----------|------------|------------|------------|----------|--------------------------------|
| | | 走向/ (°) | 倾向/ (°) | 倾角/ (°) | | |
| F ₁ : 尚义—赤城断裂 | 150 | EW | S或N | 47 | 正断 | Q ₂ |
| F ₂ : 张家口断裂 | 60 | 330 | SW | 60 | 正断 | Q ₂ —Q ₃ |
| F ₃ : 万全断裂 | 15 | NE | SE | 70 | 正断 | Q ₂ —Q ₃ |
| F ₄ : 怀安盆地北缘断裂 | 43 | 20~80 | SE | 50~75 | 正断 | Q ₃ —Q ₄ |
| F ₅ : 天镇盆地北缘断裂 | 70 | 50 | SE | 50~60 | 正断 | Q ₂ —Q ₃ |
| F ₆ : 左所堡—松枝口断裂 | 105 | 330 | NE | 50~70 | 正断 | Q ₂ |
| F ₇ : 怀安盆地南缘断裂 | 41 | EW | N | 70~75 | 正断 | Q ₂ —Q ₃ |
| F ₈ : 阳原盆地北缘断裂 | 62 | 32~80 | SE | 50~65 | 正断 | Q ₂ —Q ₃ |
| F ₉ : 怀涿盆地北缘断裂 | 58 | 50~80 | SE | 50~75 | 正断 | Q ₃ —Q ₄ |
| F ₁₀ : 延矾盆地北缘断裂 | 102 | 20~85 | SE | 50~80 | 正断 | Q ₃ —Q ₄ |
| F ₁₁ : 黄土窑—土木断裂 | 21 | 315 | SW | 60 | 正断 | Q ₃ |
| F ₁₂ : 新保安—沙城断裂 | 26 | 290~310 | SW | 50~70 | 正断 | Q ₃ —Q ₄ |
| F ₁₃ : 孙庄子—乌龙沟断裂 | 120 | 25~30 | NW, SE | 60~80 | 正断 | Q ₃ |



F₁: 尚义—赤城断裂; F₂: 张家口断裂; F₃: 万全断裂; F₄: 怀安盆地北缘断裂; F₅: 天镇盆地北缘断裂; F₆: 左所堡—松枝口断裂; F₇: 怀安盆地南缘断裂; F₈: 阳原盆地北缘断裂; F₉: 怀涿盆地北缘断裂; F₁₀: 延矾盆地北缘断裂; F₁₁: 黄土窑—土木断裂; F₁₂: 新保安—沙城断裂; F₁₃: 孙庄子—乌龙沟断裂

图2 张家口地区主要活动断裂分布

Fig. 2 Major active faults in Zhangjiakou region

尚义—赤城断裂是尚义—平泉断裂的西段，总体走向近EW，全长约150 km，断面陡峭，断裂切割深度较大，倾向或南或北，指示其多次活动的复杂特征。主要活动时代为中更新世，全新世以来活动性不明显，断裂附近发生的最大历史地震为1998年张北M_s6.2地震。断裂穿过崇礼冬奥会场址区的万龙滑雪场北侧，是距场址区最近且规模最大的断裂。综合尚义—赤城断裂的断层尺度和活动性特征开展分析，认为其具备发生中强以上地震的地质构造条件，是场址区附近重要的潜在震源之一。

张家口断裂是张家口—渤海构造带西段的一条主要断裂，是张宣盆地的北缘边界主控断裂，总体走向NW向，倾向SW向，全长约60 km。以张家口市为界将其细分为东、西两段，东段断裂延伸至基岩山地，断层破碎带、断层三角面发育；

西段自张家口市往北西方向延伸至北新屯乡，主要活动时代为晚更新世。张家口断裂具备潜在中强地震的发震条件，距离崇礼冬奥会场址区较近，同样是应分析的重要潜在震源之一。

基于以上地震构造背景分析，本文选择尚义—赤城断裂和张家口断裂分别作为地震动计算中的潜在发震断层。

2.2 近场区强地震动计算分析

基于动力学拐角频率的随机有限断层法的地震动合成模型参数主要由震源模型、路径传递函数模型和场地传递函数模型 3 大类物理参数和相应的计算参数组成。震源模型包括全局震源参数和局部震源参数，全局参数主要表征发震断层产状和面积，局部参数主要表征破裂面的滑动分布、滑动速率时间；路径传递函数包括几何传播函数形式、持时函数形式、区域品质因子、地壳平均密度和剪切波速，用于约束地震波传播中的几何衰减；场地传递函数包括地壳放大模型和近地表局部场地放大模型，局部场地特性相关的参数包括场地放大因子、 κ 。

常用的场地放大效应估计方法是四分之一波长法，本文选取张家口地区强震台的场地钻孔数据，使用该方法计算得到区内 II 类和 III 类场地放大系数，I 类场地则采用北美西部地区基岩放大系数作为参考。 κ 计算采用常用的 Anderson 经典方法，主要利用研究区强震动记录计算得到 κ 值，统计总结高频衰减因子 κ_0 的分布规律，结合观测点场地类型、坡度和高程等因素，经统计分析，得到研究区盆地和山地地区的 κ_0 取值经验关系。本文研究区位于坝上高原边缘，山地与沟谷交错，考虑到不同地形对地震动的放大效应，在计算时特别考虑了地形影响的强地面运动计算，对于研究区内的盆地、山地等不同地形的地震动效应，可以通过选用观测点相应的局部场地放大项和场地高频衰减项组成的场地联合效应项来表征（贾晓辉，2019）。

首先假定尚义—赤城断裂为发震断裂，依据发震震级与断裂活动性、规模的关系（Wells, Coppersmith, 1994；龙锋等，2006），确定发震震级上限为 $M_w 6.3$ ，采用断层走向和倾角、断层埋深设定发震震源参数，使用张家口地区地震波传

播的地壳品质因子和几何衰减模型（赵翠萍等，2011），考虑山地地形影响并使用场地联合效应项建模做地震动的计算分析，计算参数见表 2。

在崇礼冬奥会场址区加密设定 6 个重点场址观测站，并提高计算次数，旨在削弱研究区结果的随机性并获得较为准确的地震动加速度值。加密的观测站及获取的相应峰值加速度见表 3。

表 2 尚义—赤城断裂地震动计算输入参数

Tab. 2 Input modeling parameters in the stochastic simulation of an earthquake on the Shangyi – Chicheng fault

| 参数名称 | 参数值 |
|----------------------------------|-------------------------------------|
| 断层方位 | 走向 30°，倾角 45° |
| 断层沿走向和下倾方向的尺度/km | 150 × 10 |
| 断层上界埋藏深度/km | 0.1 ~ 2 |
| 震级 M_w | 6.3 |
| 子断层大小/km | 2 × 2 |
| 滑动分布 | 随机分布 |
| 品质因子 | $Q(f) = 248.0f^{0.70}$ （赵翠萍等，2011） |
| 地壳放大模型 | 坚硬岩石场地放大模型 (Boore, Joyner, 1997) |
| 局部场地放大模型 | 美国基岩 I 类场地 河北地区 II 类场地 |
| 窗函数 | Saragoni – Hart 窗 |
| 脉冲比例 | 50% |
| 高频衰减因子 κ_0/s | 盆地 0.032 山地 0.02 |
| 地壳剪切波速 $\beta/(km \cdot s^{-1})$ | 3.5 |
| 破裂速度/ $(km \cdot s^{-1})$ | 0.8 β |
| 地壳密度/ $(g \cdot cm^{-3})$ | 2.8 |

表 3 尚义—赤城断裂及张家口断裂对场址区重点观测点地震动强度估计

Tab. 3 PGA – values of a scenario earthquake at 6 sites in the Chongli Winter Olympic area on the Shangyi – Chicheng fault and the Zhangjiakou fault

| 编号 | 重点观测点 | PGA/ $(cm \cdot s^{-2})$ | |
|----|-----------|--------------------------|-------|
| | | 尚义—赤城断裂 | 张家口断裂 |
| A | 翠云山银河滑雪场 | 190.8 | 136.2 |
| B | 万龙滑雪场 | 210.7 | 125.8 |
| C | 翠云山森林度假景区 | 207.0 | 101.7 |
| D | 张家口塞北滑雪场 | 118.7 | 162.3 |
| E | 崇礼太子城小镇 | 186.1 | 118.6 |
| F | 国家滑雪中心 | 174.5 | 113.1 |

以尚义—赤城断裂为设定震源，如图 3a 中粉色线段所示，计算得到张家口地区强地面运动 PGA 地表分布。图 3a 显示，地震动峰值区域位于冬奥会场址区及其东侧， PGA 达 235 cm/s^2 ，在场址区

估算产生的 PGA 约为 210 cm/s^2 。参考《中国地震烈度表》（GB/T 17742—2020），研究区划分在Ⅷ度范围内，可能产生场馆房屋损坏、滑雪场边坡塌方等现象。

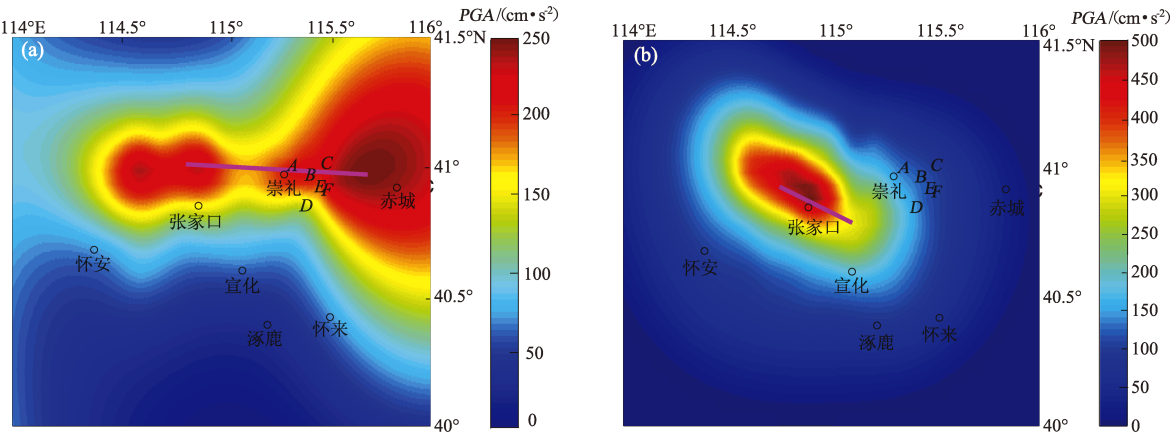


图 3 尚义—赤城断裂 (a)、张家口断裂 (b) 强地震动计算得出的峰值加速度地表分布
Fig. 3 PGA distribution of a scenario earthquake on the Shangyi – Chicheng fault (a) and the Zhangjiakou fault (b)

按照同样方法，假定张家口断裂为发震断裂，考虑地震活动性和断层规模，设定发震震级上限为 $M_w6.5$ 。随机断层法的输入参数见表 4，经数十次反复计算并取均值，获得冬奥会场址区加密观测站各点的 PGA （表 3）。

表 4 张家口断裂地震动计算输入基本参数

Tab. 4 Input modeling parameters in the stochastic simulation of a scenario earthquake on the Zhangjiakou fault

| 参数名称 | 参数值 |
|---------------------|-------------------------------|
| 断层方位 | 走向 303° ，倾角 90° |
| 断层沿走向和下倾方向的尺度/km | 46×10 |
| 断层上界埋藏深度/km | $0.1 \sim 2$ |
| 震级 (M_w) | 6.5 |
| 子断层大小/km | 2×2 |
| 滑动分布 | 随机分布 |
| 品质因子 | $Q(f) = 248.0f^{0.70}$ |
| 地壳放大模型 | 坚硬岩石场地放大模型 |
| 局部场地放大模型 | 美国基岩 I 类场地 |
| | 河北地区 II 类场地 |
| 高频衰减因子 κ_0/s | 盆地 0.032 |
| | 山地 0.02 |

以张家口断裂为设定震源，如图 3b 中粉色线段所示，计算得到张家口地区强地面运动 PGA 地表分布。图 3b 结果显示，地震动峰值区域位于张家口市区， PGA 达 450 cm/s^2 ，在冬奥会场址区估算产生的 PGA 约为 120 cm/s^2 ，相当于地震烈度Ⅶ度的地震影响，可能出现房屋轻微破坏、地表裂缝等现象。

3 地形效应影响分析讨论

对于多数随机有限断层计算模型，在局部场地模型中常使用美国局部场地放大模型、川滇地区局部场地放大模型与 κ_0 通用模型 0.04 s 进行组合，而对场地效应对地震动模拟的影响考虑不够细致。事实上，局部场地放大系数和高频衰减模型对合成地震动计算存在很大影响。

假设不考虑地形起伏变化，将研究区视为平层模型，山地地区场地放大系数选用美国基岩场地局部放大系数（Boore, Joyner, 1997），见表 5。研究区的高频衰减因子取值不考虑起伏地形分区，均统一取为常用的 $\kappa_0 = 0.04\text{ s}$ 。在尚义—赤城断裂、张家口断裂设定地震的强震动计算模型中，

场地模型统一选用平层模型，不考虑盆地和地形的变化，而模型中其它输入的地震动计算基本参数保持不变。计算得到尚义—赤城断裂、张家口断裂分别作为发震断层在平层模型中的强地面运动分布，结果如图 4 所示。

由图 4 可见，在崇礼山区的 6 个重点观测点，尚义—赤城断裂上 PGA 的计算值基本在 100 cm/s^2 左右（图 4a），张家口断裂上 PGA 的计算值基本在 80 cm/s^2 左右（4b）。与考虑地形起伏的山地模型结果（图 3）对比，平层模型给出的观测点的

PGA 要明显小于山地模型给出的结果。6 个重点观测点均位于崇礼山地地形中，山地模型在计算时考虑了地形起伏变化对地震动特性的影响，即山体地形对地震动的放大效应。综上，通过数值模型对比分析，从理论分析的角度验证了地形起伏变化对地震动放大效应的客观存在，在不考虑地形效应的平层模型中会低估地震动特性在山地地形的真实性。

4 结论

对于起伏地形地区的地震动效应，本文使用随机有限断层法将地形效应的影响方法中的局部场地放大项和场地高频衰减项组成的场地联合效应项来表征。结合张家口地区地震构造背景，以崇礼冬奥会场址区作为研究区，开展考虑地形效应的强地面运动场计算分析，并对地形效应的影响进行讨论，主要得到以下结论：

（1）对于山地、盆地等不同地形对地震动的地形效应表达，可结合观测点局部场地条件类型和地形、高程、坡度等因子，在随机有限断层法中采用相应的局部场地放大系数和高频衰减因子组成的场地联合效应来实现，本文方法在山地地形效应强度估计和计算效率方面存在一定优势。

（2）山地地形模型和平层模型的计算结果对比分析表明，若不考虑地形效应，在地形起伏地区会低估真实的地震动强度，山地地形模型能实现山体地形的地震动放大效应，并对实际地震动做较为准确的估算。

（3）尚义—赤城断裂和张家口断裂是崇礼冬奥会场址区附近重要的潜在震源，其潜在地震动强度可能会分别达到 210 cm/s^2 和 120 cm/s^2 ，计算结果可为崇礼地区地震动强度预测估计提供参考数据。

本文研究所得的研究区地震动估计结果与《中国地震动参数区划图》（GB 18306—2015）给出的结果相差不大。因此，基于动力学拐角频率的随机有限断层法使用场地联合效应项表征地形效应的途径是基本可行的。

本文方法是在美国学者 Boore 和 Motazedian 开发编写的源程序基础上，作进一步修改完善完成的，在此表示感谢！

表 5 北美基岩场地局部场地放大系数
Tab. 5 Node points of amplification for generic rock sites in North America

| 频率/Hz | 放大系数 | 频率/Hz | 放大系数 |
|-------|------|-------|------|
| 0.01 | 1.00 | 2.26 | 2.06 |
| 0.09 | 1.10 | 3.17 | 2.25 |
| 0.16 | 1.18 | 6.05 | 2.58 |
| 0.51 | 1.42 | 16.6 | 3.13 |
| 0.84 | 1.58 | 61.2 | 4.00 |
| 1.25 | 1.74 | | |

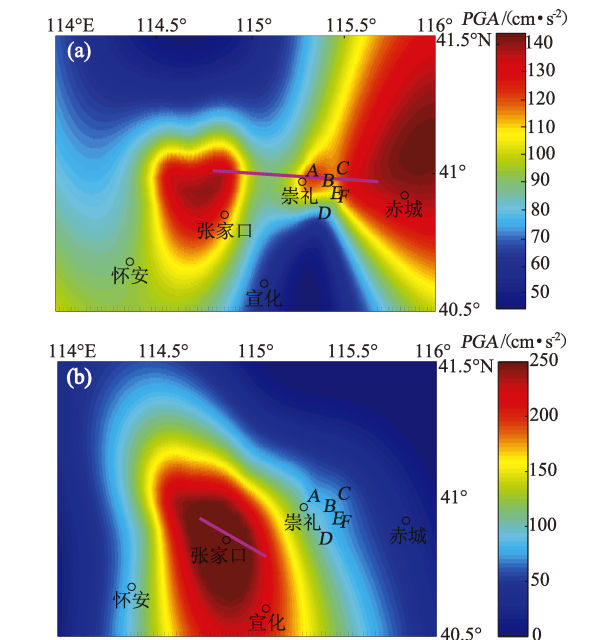


图 4 应用平层模型计算得出的尚义—赤城断裂
(a)、张家口断裂 (b) 峰值加速度地表分布
Fig. 4 PGA distribution of a scenario earthquake on the Shangyi – Chicheng fault (a) and the Zhangjiakou fault (b) calculated by the plain model

参考文献:

- 傅景山, 齐文浩, 刘红帅, 等. 2009. 汶川特大地震震源烈度异常原因的初步分析[J]. 地震工程与工程振动, 29(6): 53–64.
- Bo J S, Qi W H, Liu H S, *et al.* 2009. Abnormality of seismic intensity in Hanyuan during Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 29(6): 53–64. (in Chinese)
- 付长华, 高孟潭, 陈颀. 2012. 北京盆地结构对长周期地震动反应谱的影响[J]. 地震学报, 34(3): 374–382.
- Fu C H, Gao M T, Chen K. 2012. A study on long – period response spectrum of ground motion affected by basin structure of Beijing[J]. Acta Seismologica Sinica, 34(3): 374–382. (in Chinese)
- 傅磊, 李小军. 2017. 龙门山地区的 kappa 模型及汶川 $M_s 8.0$ 地震的强地震动模拟[J]. 地球物理学报, 60(8): 2935–2947.
- Fu L, Li X J. 2017. The Kappa(κ_0) model of the Longmenshan region and its application to simulation of strong – motion by the Wenchuan $M_s 8.0$ Earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(8): 2935–2947. (in Chinese)
- 高孟潭, 俞言祥, 张晓梅, 等. 2002. 北京地区地震动的三维有限差分模拟[J]. 中国地震, 18(4): 356–364.
- Gao M T, Yu Y X, Zhang X M, *et al.* 2002. Three dimensional finite difference simulation of ground motions in the Beijing area[J]. Earthquake Research in China, 18(4): 356–364. (in Chinese)
- 高孟潭. 2015. GB 18306—2015 中国地震动参数区划图宣贯教材[M]. 北京: 中国标准出版社.
- Gao M T. 2015. Publicizing and implementing materials for GB 18306—2015 Seismic ground motion parameter zonation map of China[M]. Beijing: Standards Press of China. (in Chinese)
- 高阳, 潘华, 汪素云. 2014. 随机有限断层法模拟中强地震近场强地震动的参数影响研究[J]. 地震学报, 36(4): 698–710.
- Gao Y, Pan H, Wang S Y. 2014. Effect of parameters on near – fault ground – motion simulation for moderate – strong earthquake by Stochastic Finite – fault Method[J]. Acta Seismologica Sinica, 36(4): 698–710. (in Chinese)
- 胡聿贤. 2006. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社.
- Hu Y X. 2006. Earthquake Engineering [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 贾晓辉. 2019. 城市地下燃气管道抗震分析及地震灾害情景构建[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- Jia X H. 2019. Seismic analysis and earthquake disaster scenario construction of urban underground gas pipelines[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 姜慧. 2005. 地震动随机模拟方法中的场地效应研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- Jiang H. 2005. Study on site effects of stochastic simulation of earthquake ground motions[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 蒋涵, 周红, 高孟潭. 2015. 山脊线与坡度和峰值速度放大系数的相关性研究[J]. 地球物理学报, 58(1): 229–237.
- Jiang H, Zhou H, Gao M T. 2015. A study on the correlation of ridge line and slope with peak ground velocity amplification factor[J]. Chinese Journal of Geophysics, 58(1): 229–237. (in Chinese)
- 龙锋, 闻学泽, 徐锡伟. 2006. 河北地区地震活断层的震级 – 破裂长度、破裂面积的经验关系[J]. 地震地质, 28(4): 511–535.
- Long F, Wen X Z, Xu X W. 2006. Empirical relationships between magnitude and rupture length, and rupture area, for seismogenic active faults in North China[J]. Seismology and Geology, 28(4): 511–535. (in Chinese)
- 任叶飞, 温瑞智, 周宝峰. 2014. 2013 年 4 月 20 日四川芦山地震强地面运动三要素特征分析[J]. 地球物理学报, 57(6): 1836–1846.
- Ren Y F, Wen R Z, Zhou B F. 2014. The characteristics of strong ground of Lushan Earthquake on April 20, 2013[J]. Chinese Journal of Geophysics, 57(6): 1836–1846. (in Chinese)
- 王海云, 谢礼立. 2010. 自贡市西山公园地形对地震动的影响[J]. 地球物理学报, 53(7): 1631–1638.
- Wang H Y, Xie L L. 2010. Effects of topography on ground motion in the Xishan Park, Zigong City[J]. Chinese Journal of Geophysics, 53(7): 1631–1638. (in Chinese)
- 王伟. 2011. 地震动的山体地形效应[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- Wang W. 2011. Effect of hill topography on ground motion[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanism China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 赵翠萍, 陈章立, 华卫, 等. 2011. 中国大陆主要地震活动区中小地震震源参数研究[J]. 地球物理学报, 54(6): 1478–1489.
- Zhao C P, Chen Z L, Hua W, *et al.* 2011. Study on source parameters of small to moderate earthquakes in the main seismic active regions, China mainland[J]. Chinese Journal of Geophysics, 54(6): 1478–1489. (in Chinese)
- 周江林, 尤惠川, 唐方头. 2015. 张家口—宣化盆地断裂特征与活动性研究[J]. 地震工程学报, 37(3): 702–709.
- Zhou J L, You H C, Tang F T. 2015. Characteristics and tectonic activities of faults in Zhangjiakou – Xuanhua Basin[J]. China Earthquake Engineering Journal, 37(3): 702–709. (in Chinese)
- GB 18306—2015, 中国地震动参数区划图[S].
- GB 18306—2015, Seismic ground motion parameters zonation map of China[S]. (in Chinese)
- GB/T 17742—2020, 中国地震烈度表[S].
- GB/T 17742—2020, The Chinese seismic intensity scale [S]. (in Chinese)
- Atkinson G M, Assatourians K, Boore D M. 2009. A guide to differences between stochastic point – source and stochastic finite – fault simulations[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 99(6): 3192–3201.
- Beresnev I A, Atkinson G M. 1999. Generic finite – fault model for ground – motion prediction in Eastern North America[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 89(3): 608–625.
- Boore D M, Atkinson G M. 1987. Stochastic prediction of ground motion and spectral response parameters at hard – rock sites in Eastern North America[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 77(2): 440–467.
- Boore D M, Joyner W B. 1997. Site amplification for generic rock sites[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 87(2): 327–341.

- Boore D M. 2009. Comparing stochastic point – source and finite – source ground – motion simulations; SMSIM and EXSIM[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 99(6):3202 – 3216.
- Motazedian, Atkinson G M. 2005. Stochastic finite – fault modeling based on a dynamic corner frequency[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 95(3):995 – 1010.
- Wells D L, Coppersmith K J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 84(4):974 – 1002.

Topographic Effect Related Seismic Simulation with the Stochastic Finite-fault Method

JIA Xiaohui¹, CAO Xiuling¹, WANG Xiaoshan²

(1. School of Urban Geology and Engineering, Hebei Technology Innovation Center for Intelligent Development and Control of Underground Built Environment, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China)

(2. Hebei Hongshan National Observatory on Thick Sediments and Seismic Hazards, Xingtai 054000, Hebei, China)

Abstract

Based on the local site condition and topographical features of the mountain land, and according to the Stochastic Finite-fault method, we propose a method of illustrating the topographical effect with the site response effect including local site amplification and high frequency attenuation to estimate the topographical effect by simulating the strong ground motion. Taking Chongli, the Winter Olympic Games site in the typical mountainous topography in Zhangjiakou region as a study case, we calculate and analyze the strong ground motion field. The results show that: ① The maximum value of *PGA* at Chongli site may reach 210 Gal. ② The comparison of the mountain model with the flat-layer model shows that the flat-layer model ignoring the topographical effect will underestimate the validity of the strong ground motion in the mountain land. ③ When using the Stochastic Finite-fault method, it is feasible to take into account the site combined effect consisting of the local site amplification factor and the high frequency attenuation factor to express the topographical effect. This method is superior in estimating the topographical effect intensity and computing the ground motion field.

Keywords: topographic effect; the Stochastic Finite-fault method; strong ground motion simulation; the Winter Olympic Games Site