

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20201218001

近断层山体地形三维地震动放大效应谱元法模拟*

冯广军¹, 刘中宪^{1,2}, 陈 颀^{1,2}, 黄 磊¹, 李程程¹, 刘国瑞¹

(1. 天津城建大学, 天津市土木建筑结构防护与加固重点实验室, 天津 300384;
2. 中国能源建设集团天津电力设计院有限公司, 天津 300372)

摘要: 采用勒让德(Legendre)谱元法, 结合动力学有限断层破裂理论, 对一邻近隐伏发震断层的山体进行三维地震动模拟分析, 获得山体表面加速度、速度、位移响应时程和加速度反应谱。结果表明:(1)加速度方面, 60°倾角倾滑逆断层作用下, 山体背向断层一侧的PGA明显大于迎向断层一侧; 对90°直立型断层情况, 山体背向断层一侧的水平向PGA同样明显大于迎向断层一侧, 但对于竖向PGA分布, 该现象不明显; 倾滑断层作用下最大PGA一般均出现于山顶附近, 60°倾角逆断层情况下山顶PGA可达山脚平坦位置的5倍左右, 而垂直断层情况下则放大2~3倍, 同时山体表面多处产生竖向峰值大于水平向峰值的现象; 加速度反应谱显示场地山顶处卓越周期明显长于其他位置。(2)速度方面, 山体表面各观察点位在时程上表现出单向和双向长周期大脉冲特性, 反映出明显的方向性效应。

关键词: 谱元法; 隐伏断层; 有限断层; 动力学模型; 山体; 地震动

中图分类号: O347.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)04-0778-10

Analysis on the 3-D Ground Motion Amplification of Mountain Topography near the Fault Using SEM

FENG Guangjun¹, LIU Zhongxian^{1,2}, CHEN Di^{1,2}, HUANG Lei¹, LI Chengcheng¹, LIU Guorui¹
(1. Tianjin Chengjian University, Tianjin Key Laboratory of Civil Structure Protection and Reinforcement, Tianjin 300384, China; 2. China Energy Engineering Group Tianjin Electric Power Design Institute Co., Ltd., Tianjin 300372, China)

Abstract: By using Legendre spectral element method (SEM) and combining finite fault theory, seismic response of a mountain near a buried seismogenic fault was analyzed. The response time-history and acceleration response spectrum of acceleration, velocity, displacement at observation points on the mountain were obtained. For the spatial position relationship of the fault and mountain in the presented example, the results show that under the action of 60° dip-slip thrust faults, the peak ground acceleration (PGA) on the side of the mountain which is far from the fault is obviously larger than that near the fault. And under the action of 90° vertical faults, the horizontal PGA distribution is similar to that in the former case, but for the vertical PGA distribution, this phenomenon is not obvious. Under the action of dip-slip faults, the maximum PGA usually occurs near the top of the mountain. For 60° dip-slip thrust faults, the maximum PGA that appears at the top of the mountain can reach about 5

* 收稿日期:2020-12-18;修回日期:2021-02-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51878434)、天津市杰出青年基金项目(19JCJQC62900)、天津市科技重大专项与工程(18ZXAQSF00110)资助

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

通讯作者:刘国瑞(1981—),男,副教授,博士。主要从事并行计算和机器学习等研究。E-mail: lgr@tcu.edu.cn

times that at the foot of the mountain, while under the action of vertical faults, the maximum PGA can be magnified 2-3 times. Meanwhile, there are several places where the vertical peak value is larger than the horizontal peak value. And the acceleration response spectrum shows that the predominant period at top of the mountain is obviously longer than that at other places. In terms of velocity, the time histories at the observation points on the mountain show the characteristics of unidirectional and bidirectional long-period large pulses, reflecting an obvious directivity effect.

Keywords: spectral element method (SEM); buried fault; finite fault; dynamic model; mountain; ground motion

引 言

近断层地震动具有速度脉冲、上盘效应、方向性效应等复杂特征,往往对建筑物和构筑物造成严重破坏。近年来,随着近断层地震记录逐渐增多,各国学者对近场地震动研究越发深入。对于一般远场地震动模拟,往往把断层震源简化为点源,对震源破裂滑动的过程细节忽略不计。但对于近断层地震动模拟,场地断层距较小,受震源破裂过程影响强烈,所体现的地震动特点同远场地震动差异显著,该情况下点源模型无法描述实际震源的复杂性,需要建立有限断层震源模型。此时需对断层的构造形态、断层面初始应力状况以及断层错动过程等进行精细的考量和分析。刘启方等^[1]对近断层地震动基本特征进行了详细阐述,指出近断层发震特征及其成因,对关于隐伏和出露断层所造成的地面运动特性及国际上常见理论模型作了总结分析。罗全波等^[2]对近断层速度脉冲特性与震源机制关系作了论述。于生生等^[3]讨论了影响地震动效应的典型参数,同时指出了地震激发方式对场地效应的重要影响。

近断层地震动研究可采用实际观测、模型实验^[4]、随机模拟法^[5]以及数值模拟等。其中数值模拟方法包括有限元法^[6-7]、离散波数有限元法^[8]、有限差分法、间接边界积分方程法^[9]、谱元法^[10-20]等。各类方法均有其自身独特优势和不足。其中谱元法在近年来应用广泛,该方法在应对复杂大尺度场地、不均匀土质情况下地震波传播问题具有很高的适用性,相较于一般低阶有限元法降低了高频频散,同时消除高阶有限元法可能产生的伪波,具有快速收敛特性且易于并行化,其计算效率与精度已得到认可。苏欣等^[11]建立了二维地裂缝场地模型,模拟点源激发的地震波传播。丁志华等^[12]利用谱元法对不同形状

三维台阶地形模型进行地震动效应研究。贺春晖等^[13]建立三维“震源-传播介质-坝址峡谷场地”数值模型,采用谱元法模拟地震波传播,生成坝址区的三维地震动参数。刘中宪等^[14]采用二维谱元法研究了沉积盆地对地震动的影响。F. Magnoni等^[15]对2016意大利中部6.0兆瓦地震的运动学有限断层和三维地震波传播进行了研究。P. Galvez等^[16]将有限断层理论与谱元法相结合,建立2011年东日本大地震动力学有限断层模型进行实例应用分析。X. Wang等^[17]也同样通过建立南非某煤矿运动学断层模型研究近断层地震动特征。巴振宁等^[18]通过动力学断层场地模型研究了地震动的地形效应。万子轩^[19]基于高精度DEM模型考察了四川青川县区域的地震动放大效应。山体-盆地耦合放大效应方面,高严等^[20]最近进行了深入的参数分析。

综合近年来文献,目前国内利用谱元法进行场地地震动模拟大多以矩张量点源来描述震源,场地集中于二维场地或三维自由场的远场地震动,对于三维复杂场地的近断层地震动研究相对较少。另外,多次地震观测和理论研究表明山体(凸起)地形对地震动有显著的放大效应,我国西部有很多城镇和重要工程位于山区,亟需对近断层山体场地地震动空间分布特征和放大效应进行分析研究。本文采用谱元法,结合动力学有限断层理论,基于开源SPECFEM3D程序建立有限断层-邻近山体整体地震反应分析模型,对某高斯形山体场地在倾滑断层作用下地震动响应进行模拟分析,研究结果可为近断层山区地震区划、城市规划、工程抗震等提供科学依据。

1 模拟方法

1.1 勒让德谱元法

谱元法类似于高阶有限元法,根据其插值节点和基函数选取的不同,主要分为勒让德谱元法和切

比雪夫谱元法。本文所采用的 SPEC FEM3D 程序基于勒让德谱元法理论编写,其质量矩阵具对角化特征,便于并行化计算,整体计算采用显式积分算法。对一个三维六面体谱单元进行等参坐标变换,设原始坐标系为 x, y, z ; 参考坐标系为 ϵ, η, ζ 。以参考坐标系 ϵ 轴为例,拉格朗日插值基函数可表达为:

$$l_k^n(\epsilon) = \frac{(\epsilon - \epsilon_0) \cdots (\epsilon - \epsilon_{k-1})(\epsilon - \epsilon_{k+1}) \cdots (\epsilon - \epsilon_n)}{(\epsilon_k - \epsilon_0) \cdots (\epsilon_k - \epsilon_{k-1})(\epsilon_k - \epsilon_{k+1}) \cdots (\epsilon_k - \epsilon_n)} \quad (1)$$

其中插值点与积分点 ϵ_i 均设为下式的根:

$$(1 - \epsilon^2) P_n'(\epsilon) = 0 \quad (2)$$

式中, $P_n'(\xi)$ 为 n 阶勒让德多项式的一阶导函数。即将 GLL(Gauss-Lobatto-Legendre) 分布节点作为单元插值点与积分点。

各节点的形函数可由式(1)基函数构建而得:

$$N_{ijk} = l(\epsilon_i) \cdot l(\eta_j) \cdot l(\zeta_k) \quad (3)$$

式中, i, j, k 决定了某一结点在参考坐标系中的位置。由此获得谱单元各节点的形函数。

坐标场与位移场采用同样的形函数插值。则以 x 方向的坐标场为例表达式为:

$$x(i, j, k) = \sum_{\epsilon_1}^{\epsilon_{n+1}} \sum_{\eta_1}^{\eta_{n+1}} \sum_{\zeta_1}^{\zeta_{n+1}} N_{ijk}(\epsilon_i, \eta_j, \zeta_k) \cdot x_i \quad (4)$$

其余两个维度以此类推,位移场 $u(i, j, k)$, $v(i, j, k)$, $w(i, j, k)$ 同理可得。在计算单元刚度矩阵和质量矩阵的数值积分时,选取单元插值节点(GLL点)为积分节点,可以获得刚度矩阵和对角化的质量矩阵,后者有利于并行化展开,这也是与一般高阶有限元法的区别之处,可参见文献[21]以获得更多相关信息。

1.2 动力学有限断层模型

地震由沿着断层面传播的破裂产生,在近场强地震动模拟中通常将震源简化为矩形破裂面。运动学(kinematic)和动力学(dynamic)模型是两种常用的有限断层震源模型^[22],本文采用动力学模型。断层面破裂过程受界面摩擦准则和背景初始应力控制。在计算程序中由两个匹配的接触面,即 Γ_+ 和 Γ_- 来描述,如图1所示,滑移定义为断层面的位移不连续,即 $U = U^+ - U^-$,其中 U^+ 和 U^- 分别为 Γ_+ 和 Γ_- 面上的位移。断层的错动可以由断层面 Γ_+ 的一组点和断层面 Γ_- 上相对应的一组点间的相对关系来表达,这两组点称为分裂节点(split nodes),每个分裂节点可近似视为子断层。震源的复杂性可以通过每个子源的错动模式、破裂在断面上的传

播以及子源滑动时间函数(震源时间函数)的随机性来体现。从有限断层源激发的地震波可以作为强地震动数值模拟输入波。

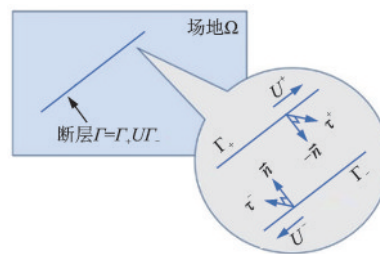


图1 断层面滑动示意

Fig.1 Schematic diagram of finite fault principle

1.3 SPEC FEM3D 程序

SPEC FEM3D 程序是基于勒让德谱元法理论构建而成,需在 Linux 环境下运行。计算平台选用 64 位 Ubuntu 操作系统并配置 OpenMP 并行环境。硬件配置上 CPU 为 2 颗至强 Xeon Gold 5118,共 24 核;运行内存 128 G。

首先利用有限元前处理软件(例如 Trelis)建立研究模型,并以六面体单元对其切分,将单元导入 SPEC FEM3D 中转化为谱单元,自动计算 GLL(Gauss-Lobatto-Legendre)插值节点,这类似于高阶拉格朗日族单元。值得注意的是这种不等间距 GLL 节点有效避免了高次插值容易引发的 Runge 现象。模型导入至 SPEC FEM3D 后会利用 SCOTCH 库,根据用户设定的处理器核心数对模型进行自动分区,将各分区模型的计算任务分配给各核心,实现并行处理。

2 动力学有限断层山体模型

利用 Trelis(Cubit 商业化版本)建立一近断层高斯型山体场地模型,如图2所示。其平面尺寸 $X \times Y = 50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$;深度 $Z = 28 \text{ km}$;高斯山体长轴向(X)长度为 5 km;短轴向(Y)长度为 2.5 km;高度 1 km。对于有限断层震源,本文将详细研究 60° 倾滑逆断层这一情况,另以一垂直断层作对比算例分析。假设断层埋置在山体右下侧,且山体处于断层上盘, 60° 倾滑逆断层情况如图3所示。其中,断层尺寸为 $10 \text{ km} \times 4 \text{ km}$,山顶处震中距为 7 km,震源深度 9 km。模型采用六面体单元划分网格,单元插值设为 4 阶,此时每个谱单元含 125 个节点,模型共划分为 154 万

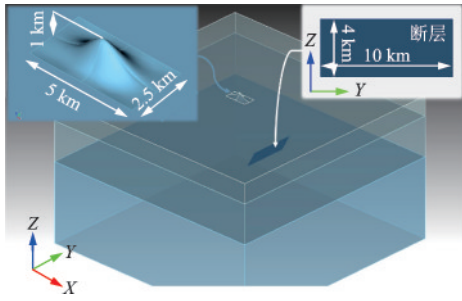


图2 模型场地与断层的特征示意

Fig.2 Model site and fault feature schematic

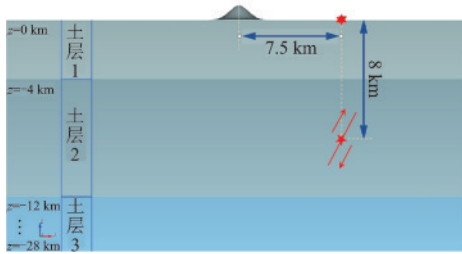


图3 有限断层位置及地层划分

Fig.3 Locations of finite faults and stratigraphic division

个单元。在 $Z = -4$ km 处和 $Z = -12$ km 处设置单元密度过渡层,如图4所示,从3号土层到1号土层单元增密两次,每次单元线密度增加3倍,使单元尺寸与单元所处土层内波速保持协调^[23],达到计算稳定性和效率的平衡。王加锐等^[24]通过对不同覆盖层的定量讨论,指出覆盖层性状主要影响地震动反应谱的短周期分量。本例主要讨论近断层山体宏观上的地震响应规律,为简化讨论,覆盖层设定为硬岩波速,土层划分及物理参数见表1。

对于倾滑断层面上初始应力分布,我们在断层几何中心下方1 km处设置一个正方形 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的成核区A,破裂点处于成核区A的中央,断层面上其余设为W区。断层上所有位置的倾角向初始应力以及法向初始应力均考虑为沿断层倾角向距离增加而线性变化的变量,而沿走向初始应力各处均设为

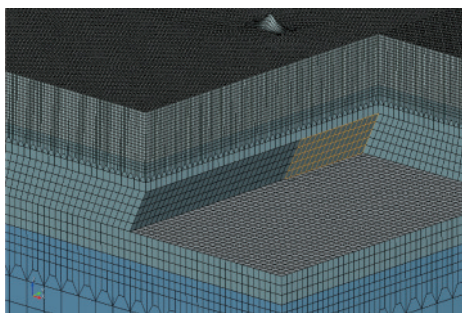


图4 模型网格离散方案

Fig.4 Local mesh segmentation scheme of model

表1 算例地层物理参数

Table 1 The soil parameters in the example

土层号	范围/ km	P波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	S波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
1	$\pm 0 \sim -4$	2 800	1 500	2 300
2	$-4 \sim -12$	4 500	2 500	3 200
3	$-12 \sim -28$	6 000	3 500	4 000

0。断层各区域初始应力以及摩擦系数见表2。

表2 算例断层面物理参数

Table 2 The physical parameters of the fault

位置	μ_s	μ_d	$\tau_{\text{strike}} /$ MPa	$\tau_{\text{dip}} /$ MPa	$\sigma /$ MPa	滑移弱化 临界距离/ m
成核区 A	0.76	0.448	0	渐变	渐变	0.5
断层面 W	0.76	0.448	0	渐变	渐变	0.5
断层面 外S	10 000	0.448	--	--	--	--

断层面初始应力 σ 、 τ_{strike} 和 τ_{dip} 分布按如下假定:

对于正应力:设断层上边缘处正应力 σ 为 42 MPa,所处土层内聚力 c 为 2×10^5 Pa。设沿倾角向距离为 $\text{dis}(\text{m})$,考虑正应力沿倾向延伸而线性增加,每延米增加 7 000 Pa,则断层面上所有区域的正应力 $\sigma(\text{MPa})$ 设定为:

$$\sigma = 42 + 7\,000 \times \text{dis} \times 10^{-6} \quad (5)$$

对于切应力:沿倾角向切应力 τ_{dip} ,在断层面内成核区外(即W)中:

$$\tau_{\text{dip}} = 0.55 \times \sigma \quad (6)$$

在成核区A内:

$$\tau_{\text{dip}} = c + (\mu_s + 0.0057) \quad (7)$$

所有区域的沿走向切应力 $\tau_{\text{strike}} = 0$ 。

经以上线性函数插值,可计算断层面上应力渐变分布如图5所示。

对该断层-场地模型四周以及底面均施加 Clayton-Enquist 吸收边界。对于两种断层情况,考虑到计算稳定性,积分步长分别取 0.001 s(垂直断层)和 0.000 5 s(60°倾滑断层),时间步数分别为 60 000 步和 120 000 步,模拟时程总长均为 60 s,地震波有效频率最高可达 6 Hz。对 60°倾滑断层工况计算山体接收点位移、速度、加速度时程及反应谱,观察时程特性;并提取时程峰值绘

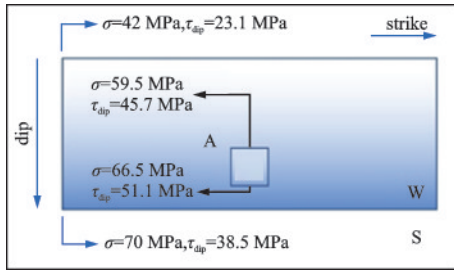


图5 断层面初始应力参数

Fig.5 Initial stress parameter of fault plane

制云图,观察地震动峰值分布情况,进行定量分析。

以上两例模型均采用2颗至强Xeon Gold 5118处理器进行并行计算,分别耗时约为28.5 h和60 h。计算耗时与计算步数大致呈正相关。且本文中60°倾滑断层模型的网格几何质量较垂直断层模型的规则网格的质量相对来说较低,计算耗时也有所增加。

3 模拟结果

3.1 时程结果

如图6所示,对于时程图仅选取60°倾滑断层工况,沿山体长轴向取5个观测点(1-5号点位),分别

对应左右山脚、山腰与山顶处。其中加速度反应谱是在单自由度体系阻尼比为0.05下得出。

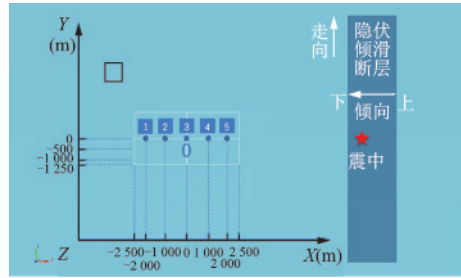


图6 山顶投影为原点的观测点位置(顶视图)

Fig.6 Location of the observation points taking the projection of the mountain top as the origin(Top view)

从图7、8时程结果可以看出,该倾滑断层算例中山体表面各接收点在速度时程上表现出单向或双向大脉冲的特征,体现了方向性效应。在长轴向 $X=2000$ m处的岩面上水平向(垂直断层上边缘在地表的投影方向,即X向,下文同样)和竖向均发生永久位移,与速度时程上的单向大脉冲相对应。但是由于本算例断层为隐伏未出露状态,断层上覆层厚度6 km,以及山体与断层较远的空间位置关系,所以这一现象并未十分显著,其值为20~30 cm;同时山体长轴向,残余位移随着震源距的增加而逐渐降低,例如5号至1号观测

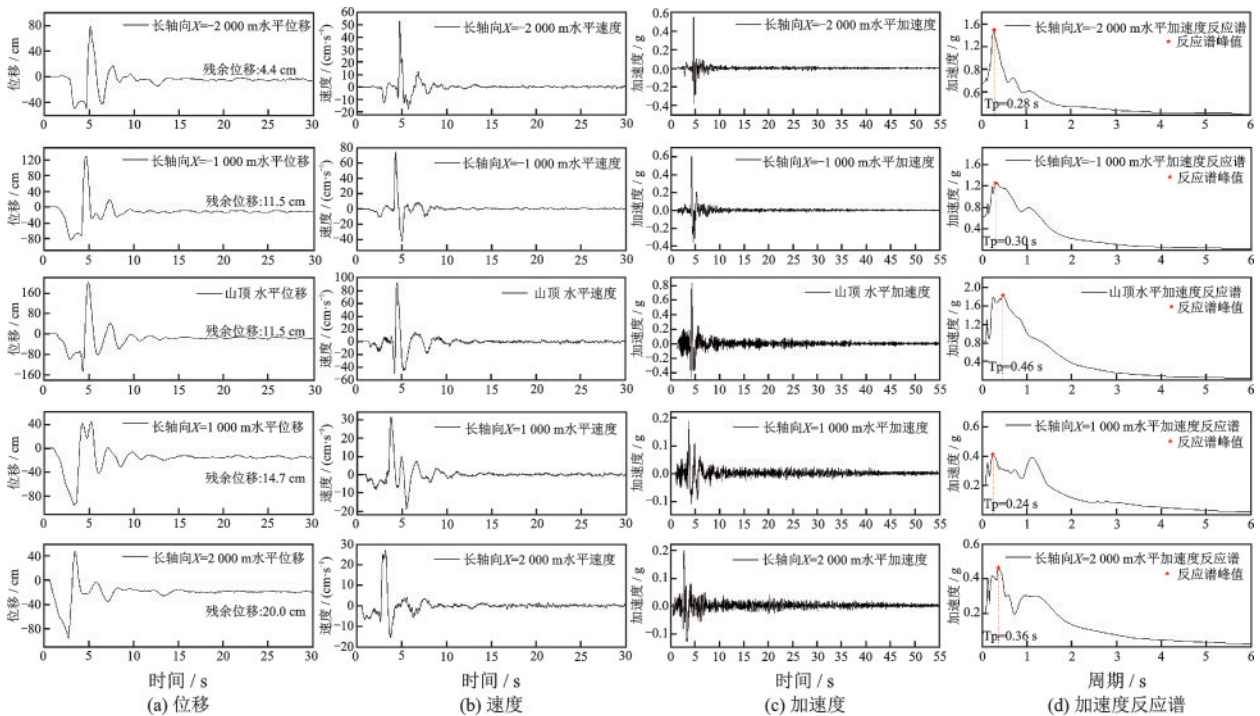


图7 观测点水平X向时程

Fig.7 The horizontal X-direction time history at the observation points

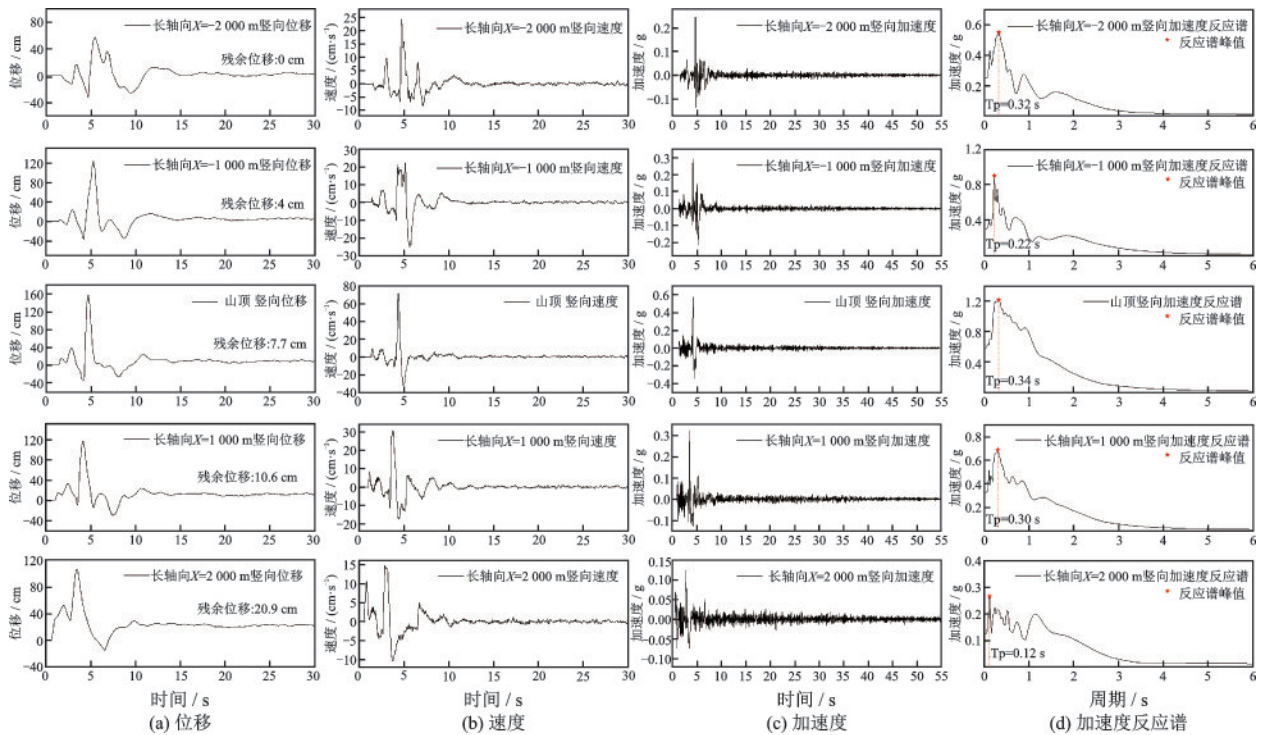


图8 观测点竖直Z向时程

Fig.8 The vertical Z-direction time history at the observation points

点的竖向残余位移分别为 20.9、10.6、7.7、4、0 cm。山顶附近加速度峰值大于其他位置,从山体场地接收点的加速度反应谱结果上看,山体靠近断层一侧的点位加速度反应谱较山体远离断层一侧的加速度反应谱有变宽趋向。另外,山顶处水平和竖向加速度反应谱卓越周期分别为 0.46 s 和 0.34 s,明显大于山顶两侧。

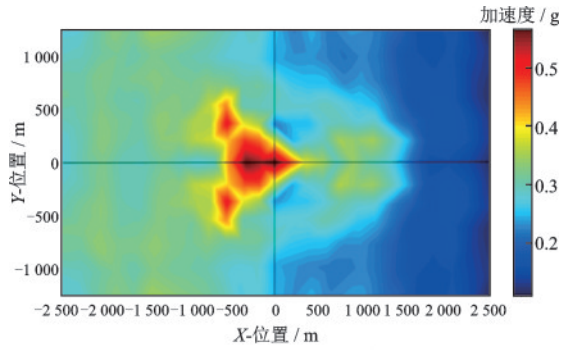
3.2 云图结果

分别对 60°倾滑断层与 90°直立型断层两工况模型提取山体表面各节点时程峰值结果,绘制了 PGA (地面峰值加速度),PGV(地面峰值速度),PGD(地面峰值位移)云图(图 9~11)。

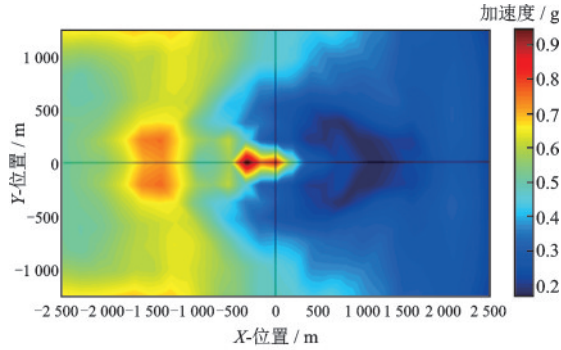
从图 9~11 云图结果看,由于断层位于山体正右下侧,且为纯倾滑过程,图像分布关于山体长轴对称。对于 PGA 分布,由于山体地形的存在,地震波在此发生散射,使得加速度峰值在空间内的分布变得复杂。观察云图结果可发现山体表面地震动幅值分布并不完全随着震中距的增加而逐渐衰减。倾滑断层情况,山体背向断层一侧的 PGA 明显大于迎向断层一侧,因为地震波在到达地表(自由表面)时,会发生波的散射和反射,且由于山体背向断层一侧的地表与地震波到达方向的夹角

大于山体迎向断层的一侧,波的反射现象更加显著,增强了波的叠加效应,从而使山体背向断层一侧的 PGA 峰值明显大于迎向断层一侧;垂直断层情况,山体水平向 PGA 分布也与之相似,但对于竖向 PGA 分布该现象不明显。两种断层工况作用下最大 PGA 均出现于山顶附近,其中倾滑断层情况下,山顶处最大 PGA(水平向 $PGA_{max}=0.93g$, 竖向 $PGA_{max}=0.54g$)较迎向断层一侧的山脚平坦位置放大 5 倍左右,如图 9(a、b)所示;而垂直断层情况下,放大 2~3 倍,如图 9(c、d)所示。这体现了山体地形对地震动的放大效应,这一规律与陈学良等^[25]在山西龙祠地震台毗邻的麦圪岭小山地形上观测到的山顶放大效应一致。在 60°倾滑断层工况下,大多位置水平向 PGA 大于竖向 PGA,但在山体右侧可见一些竖向 PGA 接近或大于水平向 PGA 的区域;而在极端的直立型倾滑断层工况下,场地的竖向地震动占主导地位。表明针对近断层场地中建/构筑物抗震设计,如仍简单假定竖向加速度为水平向的 2/3 可能存在一定的安全隐患。

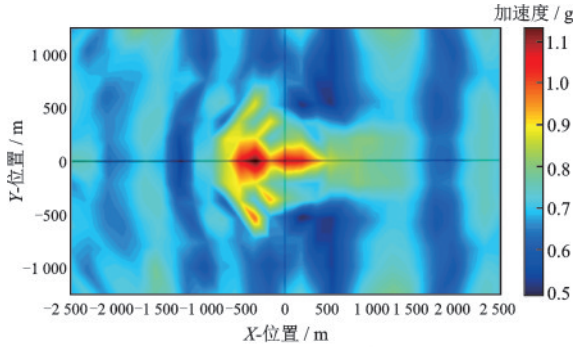
对于 PGD 分布(图 10),两种断层倾角工况下最大竖向 PGD 均出现在山顶左侧 500 m 处,而最大水平向 PGD 则均出现在山顶。山体迎向



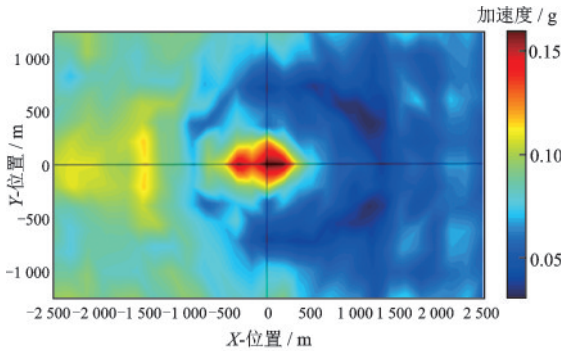
(a) 60°倾滑断层, 山体表面竖向PGA



(b) 60°倾滑断层, 山体表面水平向PGA



(c) 竖直断层, 山体表面竖向PGA



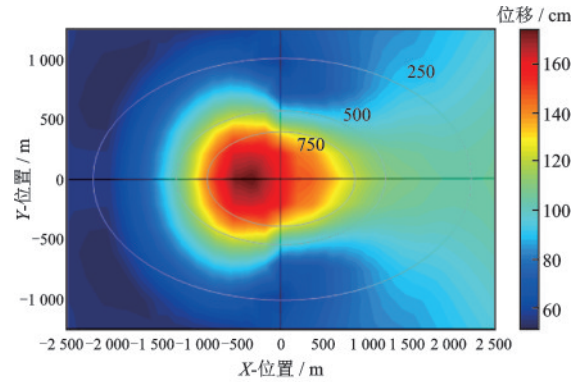
(d) 竖直断层, 山体表面水平向PGA

图9 山体表面竖向与水平向PGA分布云图

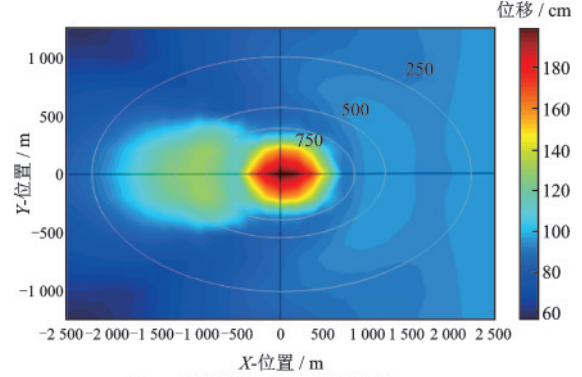
Fig.9 Vertical and horizontal PGA contour on mountain surface

断层一侧的竖向PGD均明显小于山体背向断层一侧,而水平向PGD均从山顶处向四周逐渐递减。

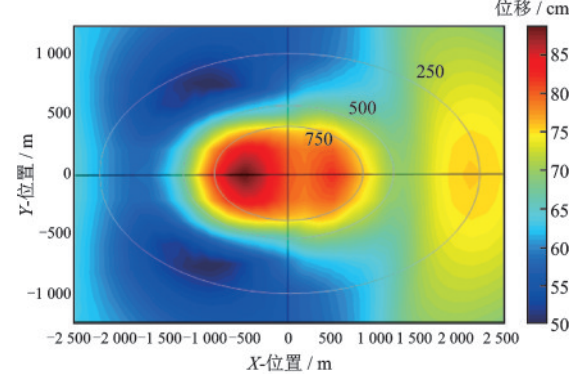
对于PGV分布(图11),竖向PGV在两种断层



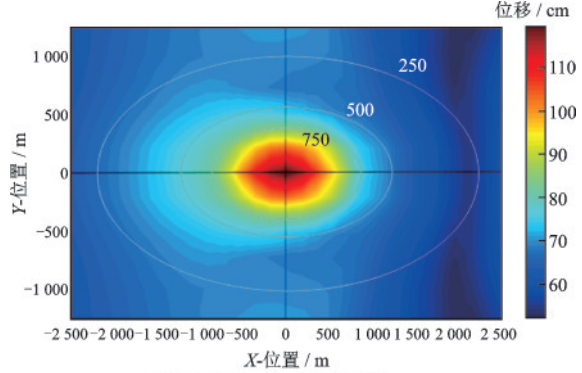
(a) 60°倾滑断层, 山体表面竖向PGD



(b) 60°倾滑断层, 山体表面水平向PGD



(c) 竖直断层, 山体表面竖向PGD



(d) 竖直断层, 山体表面水平向PGD

图10 山体表面竖向与水平向PGD分布云图

Fig.10 Vertical and horizontal PGD contour on mountain surface

倾角下的分布较为近似,而水平向PGV分布则随着断层倾角的改变发生明显的差异。

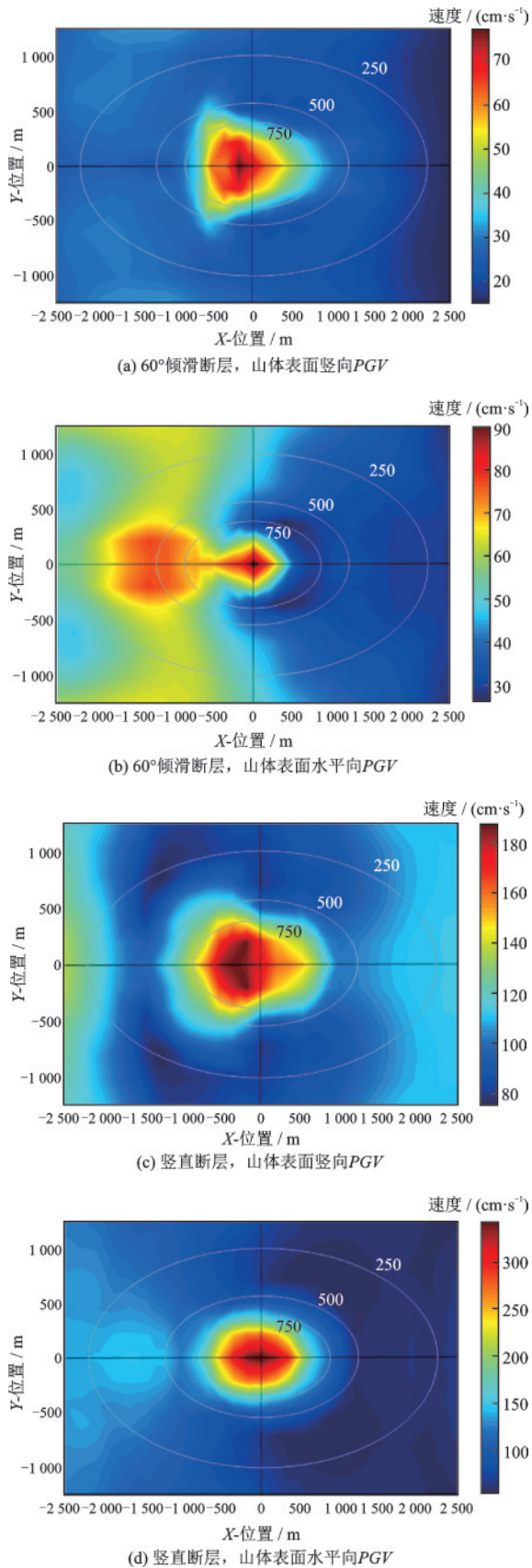


图 11 山体表面竖向与水平向 PGV 分布云图

Fig.11 Vertical and horizontal PGV contour on mountain surface

4 结论与展望

通过采用谱元法,结合动力学有限断层理论,建立隐伏倾滑断层动力学模型,对近断层某高斯形山体进行三维地震动模拟分析。针对本文算例断层-山体空间位置关系,所得主要结论如下:

(1) 本文模型下,山体背向断层一侧的水平方向 PGA 大多明显高于迎向断层一侧;而对于垂直断层情况的竖向 PGA 分布,该现象不明显,最大 PGA 常出现在山顶处以及山体背向断层一侧山肩处。

(2) 由于山体对地震波的散射效应和局部聚焦,地震动不完全遵循一般场地条件下随震中距增加而衰减的规律。另外,山体场地多处出现竖向 PGA 接近或大于水平向 PGA 的现象。

(3) 加速度与速度时程均可观察到长周期大脉冲特性。由隐伏倾滑逆断层造成的地面永久位移不明显。

(4) 山顶处加速度反应谱的卓越周期明显长于山顶两侧。60度倾角倾滑断层情况下山体表面最大 PGA 较山脚平坦场地 PGA 放大约 5 倍,直立型倾滑断层情况下则放大 2~3 倍。

(5) 水平向 PGV 分布对于断层倾角较为敏感,竖向 PGV 分布在两种断层倾角下分布较为近似。

需指出的是,以上结论仅针对隐伏逆断层埋置在山体右侧下方的情况。由于断层在空间位置上分布的不确定性、断层滑动方向的多样性以及实际山体复杂几何形态,后续研究仍需进行更多复杂情景模拟分析,以期获得更具一般性的近断层地震响应规律。

致谢 Dimitri Komatitsch 教授和他的科研团队为本文提供了 SPEC-FEM3D 谱元法计算程序包, Jean Paul Ampureo 教授和 HuiHui-Weng 对程序代码及使用步骤给予了热情解答,在此一并表示感谢!

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 Q F, Yuan Y F, Jin X, et al. Basic characteristics of nearfault ground motion[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2006, 26(1): 1-10. (in Chinese)

- [2] 罗全波,陈学良,高孟潭,等.近断层速度脉冲与震源机制的关系浅析[J].震灾防御技术,2018,13(3):646-661.
Luo Q B, Chen X L, Gao M T, et al. Analysis of the relationship between nearfault velocity pulse and focal mechanism [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2018,13(3): 646-661. (in Chinese)
- [3] 于生生,张熙胤,陈兴冲,等.场地地震反应分析研究现状及展望[J].防灾减灾工程学报,2021,41(1):181-192.
Yu S S, Zhang X Y, Chen X C, et al. Research status and prospect of seismic response analysis on site [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021,41(1): 181-192.(in Chinese)
- [4] 陈宇龙,黄栋.正断层与逆断层错动引起的上覆黏土变形特性离心试验[J].岩土力学,2017,38(增1):189-194.
Chen Y L, Huang D. Centrifuge test of deformation characteristics of overburden clay subjected to normal and reverse fault rupture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017,38(Sup1):189-194.(in Chinese)
- [5] 杨泽,盛俭,金显廷,等.精河 $M_s6.6$ 地震近断层地震动模拟[J].防灾减灾工程学报,2020,40(6):1024-1036,1052.
Yang Z, Sheng J, Jin X T, et al. Simulation of near-fault ground motion of Jinghe $M_s6.6$ Earthquake [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(6): 1024-1036,1052.(in Chinese)
- [6] 赵由佳,张国宏,单新建,等.考虑地形起伏和障碍体破裂的汶川地震强地面运动数值模拟[J].地球物理学报,2018,61(5):1853-1862.
Zhao Y J, Zhang G H, Shan X J, et al. Numerical simulation of the strong ground motion of the 2008 Weichuan Earthquake incorporated with topography and barrier rupture model [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018,61(5):1853-1862.(in Chinese)
- [7] 刘启方,李家祥,温瑞智.SV波入射下斜坡地形对上覆土层地震动放大的影响研究[J].防灾减灾工程学报,2022,42(1):92-99.
Liu Q F, Li J X, Wen R Z. Study on the effect of ground motion amplification of slope topography to overlying soil layer under incident SV waves [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022,42(1):92-99.(in Chinese)
- [8] 于彦彦,丁海平,陈澎军,等.断层埋深对近断层PGV的影响[J].世界地震工程,2013,29(3):83-89.
Yu Y Y, Ding H P, Chen P J, et al. Effect of fault depth on near-fault PGV [J]. World Earthquake Engineering, 2013,29(3):83-89. (in Chinese)
- [9] 刘中宪,刘佳乔,黄磊.近断层场地中衬砌隧道对平面SH波的散射[J].防灾减灾工程学报,2020,40(4):556-565,605.
Liu Z X, Liu J Q, Huang L. Scattering of plane SH wave by lining tunnel in near fault site [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(4): 556-565,605.(in Chinese)
- [10] 李孝波,薄景山,齐文浩,等.地震动模拟中的谱元法[J].地球物理学进展,2014,29(5):2029-2039.
Li X B, Bo J S, Qi W H, et al. Spectral element method in seismic ground motion simulation [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(5): 2029-2039.(in Chinese)
- [11] 苏欣,杨笑梅.谱元法模拟地裂缝场地地表地震波传播[J].地震工程与工程振动,2014,34(增1):206-211.
Su X, Yang X M. The numerical simulation for surface seismic wave propagation near the crack in fault site using the spectral element method [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(Sup1): 206-211.(in Chinese)
- [12] 丁志华,周红,蒋涵.三维台阶地形地震动效应研究[J].地震学报,2014,36(2):184-199.
Ding Z H, Zhou H, Jiang H. Effect of 3-D step topography on ground motion [J]. Acta Seismologica Sinica, 2014, 36(2):184-199. (in Chinese)
- [13] 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 Y, 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)
- [14] 刘中宪,刘明珍,韩建斌.近断层沉积盆地强地震动谱元模拟[J].世界地震工程,2017,33(4):76-86.
Liu Z X, Liu M Z, Han J B. Spectral element simulation of strong ground motion in the near-fault alluvial basin [J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(4): 76-86. (in Chinese)
- [15] Magnoni F, Casarotti E. Kinematic finite fault and 3D seismic wave propagation of the 24 August, 2016, M_w 6.0 central Italy earthquake [J]. Annals of Geophysics, 2016, 59(5):1-7.
- [16] Galvez P, Ampuero J P, Dalguer L A, et al. Dynamic earthquake rupture modelled with an unstructured 3-D spectral element method applied to the 2011 $M9$ Tohoku earthquake [J]. Geophysical Journal International, 2014,198(2): 1222-1240.
- [17] Wang X, Cai M. Numerical analysis of ground motion

- in a South African mine using SPEC-FEM3D [C] // First International Conference on Underground Mining Technology. Sudbury: [s.n.], 2017: 255-268.
- [18] 巴振宁, 赵靖轩, 吴孟桃, 等. 逆断层地震作用下三维沉积盆地地震动谱元法模拟[J]. 地震科学进展, 2020, 50(10): 15-24.
- Ba Z N, Zhao J X, Wu M T, et al. Seismic simulation of three-dimensional sedimentary basin under reverse fault earthquake by spectral element method [J]. Progress in Earthquake Sciences, 2020, 50(10): 15-24. (in Chinese)
- [19] 万子轩. 基于谱元法的地震动放大效应研究——以青川县斜坡为例[J]. 四川地震, 2020(1): 10-15.
- Wan Z X. Amplification effect of ground motion based on spectral element method: a case study of Qingchuan slope [J]. Earthquake Research in Sichuan, 2020(1): 10-15. (in Chinese)
- [20] 高严, 于彦彦. SV波垂直入射盆山耦合场地对地面运动的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(1): 100-110.
- Gao Y, Yu Y Y. Effects of coupled basin-mountain terrain on seismic ground motion under vertical incident SV waves [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(1): 100-110. (in Chinese)
- [21] Komatitsch D, Vilotte J P. The spectral element method: an efficient tool to simulate the seismic response of 2D and 3D geological structures [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1998, 88(2): 368-392.
- [22] 刘启方. 基于运动学和动力学震源模型的近断层地震动研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2005.
- Liu Q F. Study on near-fault ground motion based on kinematics and dynamics source model [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2005. (in Chinese)
- [23] 廖树超. 基于谱元法网格划分对模拟精度的影响[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2018.
- Liao S C. Influence of mesh division based on spectrum element method on simulation accuracy [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [24] 王加锐, 李鸿晶, 孙广俊. SH波入射下阶跃基岩覆盖土层场地地面运动特征分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(5): 712-717.
- Wang J R, Li H J, Sun G J. Analysis of ground motion characteristics of bedrock overburden soil under SH wave incidence [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(5): 712-717. (in Chinese)
- [25] 陈学良, 高孟潭, 孙为国, 等. 龙祠地震台毗邻的麦圪岭小山地形对背景噪声的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(2): 331-348.
- Chen X L, Gao M T, Sun W G, et al. The influence of the hill topography on the background noise in Maichuang Ridge adjacent to the Longci seismostation [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(2): 331-348. (in Chinese)

(本文责编: 池营营)