

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20241005001

# 甘肃文县城关镇山体-沉积河谷三维地震动IBEM模拟\*

刘中宪<sup>1,2</sup>, 卢飞龙<sup>1</sup>, 边煜凯<sup>4</sup>, 黄振恩<sup>3</sup>

(1. 天津城建大学土木工程学院, 天津 300384; 2. 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384;  
3. 天津大学建筑工程学院, 天津 300354; 4. 北京构力科技有限公司, 北京 100013)

**摘要:** 针对镇域尺度甘肃文县城关镇山体-沉积河谷三维地震动模拟问题, 利用边界元法求解无限域弹性波动问题时降维和自动满足弹性波无限远辐射的优势, 将间接边界元法拓展到城关镇山间河谷场地三维地震动模拟。根据钻孔资料及高精度地形数据建立三维精细化模型, 以平面P波和SV波作为输入, 在频域内分析了城关镇山间河谷地形对地震动的放大效应。为提高计算效率, 在计算耗时严重的散射波场构造和虚拟荷载求解部分采用OpenMP (Open Multi-Processing) 并行编程, 并通过与半解析解对比验证了方法的准确性。城关镇的模拟结果表明: (1) 沉积河谷和山体均会放大地震动, 但沉积河谷的放大效应更为明显, 在P波入射下, 沉积河谷和山体观测点的位移放大系数(地震动位移与入射波位移幅值的比值)最大值分别为19.64和3.66, SV波入射下则为14.13和3.48; (2) 两侧山体对地震波的反射会加剧山间河谷的边缘效应, 河谷边缘的地震动放大系数最大可达19.64; (3) 沉积河谷地震动的空间分布随频率变化明显, 随着频率的升高, 强震区从河谷中心逐渐往边缘转变。研究可为此类场地的地震区划和抗震设防提供一定参考。

**关键词:** 间接边界元方法; 山间河谷地形; 放大效应; OpenMP 并行

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)01-0001-12

## Three-Dimensional Seismic Ground Motion IBEM Simulation of Mountain-Sedimentary River Valley in Chengguan Town, Wen County, Gansu Province

LIU Zhongxian<sup>1,2</sup>, LU Feilong<sup>1</sup>, BIAN Yukai<sup>4</sup>, HUANG Zhenen<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin 300384, China; 3. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China; 4. Beijing Glory PKPM Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China)

**Abstract:** This study aims to address the issue of the three-dimensional seismic motion simulation for the mountain-sedimentary river valley in Chengguan Town, Wen County, Gansu Province, at the town scale. By leveraging the advantages of boundary element method in reducing dimensionality and automatically satisfying far-field radiation condition for elastic waves when solving elastic wave propagation problems in an infinite domain, the indirect boundary element method (IBEM) was extended to

\* 收稿日期: 2024-10-05; 修回日期: 2024-12-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2139208, 52278516)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、工程波动方面的研究。

E-mail: zhongxian1212@163.com

通信作者: 黄振恩(1994—), 男, 博士研究生。主要从事工程抗震方面的研究。E-mail: huangzhenenv587@163.com

simulate the three-dimensional seismic ground motion in the mountainous and river valley sites of Chengguan Town. Based on the drilling data and high-precision terrain data, a three-dimensional refined model was established. Plane P waves and SV waves were used as inputs to analyze the amplification effect of the mountain river valley terrain in Chengguan Town on the seismic motion in the frequency domain. In order to improve calculation efficiency, OpenMP (Open Multi-Processing) parallel programming was used in the time-consuming processes of constructing the scattered wavefield and solving virtual loads. The accuracy of the method was verified by comparison with the semi-analytical solutions. The simulation results of Chengguan Town showed that: (1) both the sedimentary river valleys and the mountains amplified seismic motion, but the amplification effect in the sedimentary river valleys was more pronounced. Under P wave incidence, the maximum displacement amplification coefficients (the ratio of seismic motion displacement to incident wave displacement amplitude) at observation points in the sedimentary river valleys and the mountains were 19.64 and 3.66, respectively, while under SV wave incidence, they were 14.13 and 3.48, respectively. (2) The reflection of the seismic waves by the mountains on both sides would aggravate the edge effect of the mountain river valley, with the maximum seismic motion amplification coefficient at the edge of the river valley reaching 19.64. (3) The spatial distribution of seismic motion in the sedimentary river valleys varied significantly with frequency. As the frequency increased, the strong seismic zone gradually shifted from the river valley center to the edge. The findings can provide certain reference for seismic zoning and earthquake-resistant design for such sites.

**Keywords:** indirect boundary element method; mountain river valley terrain; amplification effect; OpenMP parallel

## 0 引言

“5·12”汶川 $M_s$ 8.0级特大地震是新中国成立以来破坏性最强、波及范围最广、灾害损失最大的一次地震。此次地震的烈度分布总体上随着与震中(汶川县映秀镇:103.4°E, 31.0°N)的距离增大而减小。然而震后的许多研究表明,由于地震的场地效应,此次地震存在多个局部烈度异常区域,例如汉源县Ⅷ度异常区、康县Ⅸ度异常区和中江Ⅷ度异常区等<sup>[1-2]</sup>。这些烈度异常的区域在此次地震中遭受了尤为严重的破坏,导致人员伤亡和经济损失显著增加。因此,研究复杂场地对地震动分布的影响规律对于地震区划、城市防震减灾和重要工程抗震设防等意义重大。

从以往的地震记录来看,场地效应导致地震动局部放大进而加剧震害的案例屡见不鲜。由于沉积盆地对地震动的放大效应,距离震中约400 km的墨西哥城在1985年墨西哥 $M_s$ 7.8级地震中表现出超过震级的震害<sup>[3]</sup>;台湾集集地震中,距离震中150 km的台北地区由于盆地效应导致建筑物严重损坏<sup>[4]</sup>;自贡西山公园山脊地形在2008年汶川 $M_s$ 8.0级地震中表

现出放大效应,且随着观测点高度增大,场地放大效应也逐步增强<sup>[5]</sup>。许多数值模拟也表明,盆地和山体等复杂场地对地震动有显著的放大作用。高玉峰<sup>[6]</sup>采用波函数展开法研究了弹性半空间SH波入射下V形和U形河谷对地震动的放大作用,揭示了不同形状河谷的差异放大效应;刘启方等<sup>[7]</sup>采用谱元法模拟了施甸盆地在地形影响下对地震波传播的影响,结果表明盆地内地震动持时明显增加、放大作用明显,是盆地地震害严重的主要原因之一;基于谱元法,巴振宁等<sup>[8]</sup>研究了动力学断层地震作用下三维山体场地的动力响应,结果表明山体对近断层地震动放大效应对比无山体情况显著;采用间接边界元法,刘中宪等<sup>[9]</sup>采用高精度的有限元-边界元耦合法探讨了沉积盆地及其邻近山体对地震波的多次散射作用,结果表明山体的存在显著改变了沉积盆地的位移幅值和频谱特性,实际盆地的地震动确定需考虑邻近山体的影响。

“5·12”汶川地震中,甘肃省的受灾程度仅次于四川省,其中陇南市文县的震中距约200 km,但在受灾评估中却是仅次于极重灾区的较重灾区县(市)之一。文县地处甘肃省最南端,是陕甘川交界处,该区域地震活跃,地质构造复杂,山地约占总面

积的90%，在地表水流地冲击下易形成常见的盆地、峡谷、山间河谷等单一或复合的局部复杂场地。震后的一些研究表明，文县在汶川地震中表现出的烈度异常很大程度是由于局部场地效应导致的。汶川地震后，位于文县城关镇的文县地形台阵捕获了多条高质量的余震记录，并且相关部门在文县台阵所在区域开展了钻探和地震勘探等场地调查<sup>[10]</sup>。因此，关于文县城关镇的震后资料是较为全面的，基于已有资料，可以建立起较为真实的地震动模拟模型，进而将实际和理论相结合，全面地分析此类复杂(山间河谷)场地对地震动分布的影响。

城关镇(104°38'~104°43'E, 32°55'~32°59'N)位于文县中部，东西横跨15公里，南北绵延16公里，地形如图1所示。受区域内最大的河流白水江的冲刷，城关镇中心区域呈现出一定坡度的深切“V”形河谷<sup>[11]</sup>，两侧由山体环绕，整体上属于典型的山间河谷地形。城关镇的人员和设施主要位于河谷区域内，以往的研究表明，此类地形对地震动有显著的放大效应<sup>[12]</sup>，一旦遭遇地震，可能受到超出震级的震害。本文根据钻孔资料及高精度地形数据建立了文县城关镇的精细化三维地震动多域耦合间接边界元法模拟模型，以平面P波和SV波作为输入，分析场地效应对地震动分布的影响，以期为此类场地的地震区划和抗震设防提供科学参考。

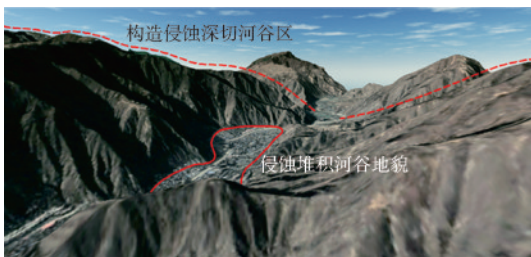


图1 城关镇地形图

Fig.1 Topographic map of Chengguan Town

## 1 计算方法

精确高效的地震波场正演模拟方法是研究大尺寸复杂场地地震波传播与成像的关键手段。常见的地震动模拟方法通常可以分为域方法(如有限元法<sup>[13]</sup>、有限差分法<sup>[14]</sup>和谱元法<sup>[15]</sup>等)和边界方法(边界元法<sup>[16]</sup>和边界积分方程法<sup>[17]</sup>等)。域方法在处理非线性问题上具有优势，但其需要对整个计算模型进行离散，故在处理大尺寸的复杂模型时，计算成本随频率增高呈指数形式增长，在模拟大尺寸

复杂场地宽频地震动时，通常需要在超算上进行。相比于域方法，边界元法仅需对计算模型的连续边界进行离散，降低了问题的计算维度，进而大幅降低计算成本。作为一种半解析方法，边界元法的计算精度高于常规的域方法，其在一个波长内所需要离散的单元数相对更少，使得计算成本进一步下降。此外，边界元法在处理无限域波动问题时，自动满足波的无限远辐射，故无需如域方法那般引入复杂的人工边界。考虑到城关镇的三维模型尺寸较大，且包含需要精细化离散的低波速层，本文采用间接边界元法对其进行地震动模拟。本节首先介绍间接边界元方法的基本原理，然后将此方法拓展到三维山体-沉积河谷耦合场地地震动模拟。为了降低计算耗时，采用OpenMP(Open Multi-Processing)技术并行化构造散射波场。

### 1.1 间接边界元方法基本原理

假设在三维欧几里得空间中存在一个均匀且各向同性的弹性固体 $\Omega$ ，这个固体既可以是无限大的，也可以是有限的，定义 $S$ 为 $\Omega$ 的连续边界。在不考虑体力的情况下，弹性固体 $\Omega$ 受简谐荷载作用时，基于单层位势理论，弹性固体 $\Omega$ 上任何位置的位移场可以表示为边界面 $S$ 上积分<sup>[18]</sup>：

$$u_i(x) = \int_S G_{ij}(x, \xi) \varphi_j(\xi) ds_\xi \quad (1)$$

式中， $i, j=1, 2, 3$ ，对应三维笛卡尔坐标系中的三条有向坐标轴； $G_{ij}(x, \xi)$ 为全空间位移格林函数，表示在 $\xi$ 处 $j$ 方向上作用一个单位力，在 $x$ 处产生的 $i$ 方向上的位移； $\varphi_j(\xi)$ 表示在 $\xi$ 处 $j$ 方向上的荷载密度。

由简谐荷载引起的弹性固体 $\Omega$ 上的应力场可以在位移场的基础上使用胡克定律得到，表示如下：

$$\sigma_i(x) = c\varphi_j(\xi) + \int_S T_{ij}(x, \xi) \varphi_i(\xi) ds_\xi \quad (2)$$

式中， $T_{ij}(x, \xi)$ 为全空间应力格林函数，表示在 $\xi$ 处 $j$ 方向上作用一单位力，在 $x$ 处产生的 $i$ 方向上的应力；非积分项 $c\varphi_j(\xi)$ 是对 $\xi$ 趋于 $x$ 时积分奇异性的特殊处理，根据全空间的介质对称性， $c$ 取 $\pm 0.5$ ，符号由法向量方向决定。位移和应力格林函数的具体计算公式可参考F. J. Sánchez-Sesma和F. Luzón在1995年发表的文献<sup>[18]</sup>，此处不再赘述。

公式(1)和(2)即为本文所采用间接边界元方法的基础公式。基于这两个公式，可以构造出谐波入射下每个计算域的散射波场。散射场与自由场矢量叠加即可得到总的地震波场，自由场的推导在之前的研究中已给出<sup>[19]</sup>。结合多域耦合的边界条



件,可以建立起以波源点虚拟荷载 $\varphi_j(\xi)$ 为未知量的边界积分方程。为充分发挥当今计算机的多线程优势,本文采用并行 GMRES(Generalized Minimum Residual)算法<sup>[20]</sup>对边界积分方程进行求解。

### 1.2 三维山体-沉积河谷耦合场地地震动求解

为了便于理解,以图2模型示意图为例,系统地介绍间接边界元方法在求解平面P波、SV波入射时山体-沉积河谷耦合场地地震动的方案。图2中参数 $\Omega_e$ 、 $\Omega_r$ 的含义分别为半空间域和沉积河谷域。山体与基岩介质相同,所以此模型包含半空间和沉积河谷两个计算域,基于公式(1)和(2),可以构造两域的散射波场。

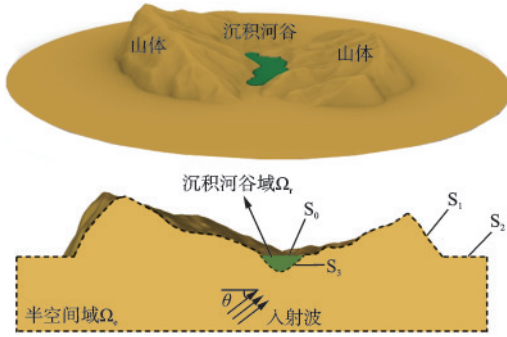


图2 三维山体-沉积河谷耦合场地模型及剖面示意

Fig.2 Schematic diagram of three-dimensional mountain-sedimentary river valley coupling site model and profile

半空间域 $\Omega_e$ 和沉积河谷域 $\Omega_r$ 的位移和应力场:

$$u_d^s(x) = \int_{S_1+S_2+S_3} G_{ij}^e(x, \xi) \varphi_j^e(\xi) ds_\xi \quad (3)$$

$$\sigma_d^s(x) = \int_{S_0+S_3} T_{ij}^e(x, \xi) \varphi_i^e(\xi) ds_\xi \quad (4)$$

$d=1, 2$ 分别表示半空间计算域 $\Omega_e$ 和沉积河谷计算域 $\Omega_r$ 。假设不同计算域的交界面上没有发生相对滑移,则图2所示计算模型的边界条件为:自由表面(包含半空间地表 $S_1$ 、 $S_2$ 和沉积河谷地表 $S_0$ )应力为零;半空间和沉积河谷交界面 $S_3$ 应力和位移连续。因此,可建立如下边界积分方程组:

$$\begin{cases} \sigma_r^s(x) = 0, x \in S_0 \\ \sigma^f(x) + \sigma_e^s(x) = 0, x \in S_1, S_2 \\ u^f(x) + u_e^s(x) = u_r^s(x), x \in S_3 \\ \sigma^f(x) + \sigma_e^s(x) = \sigma_r^s(x), x \in S_3 \end{cases} \quad (5)$$

式中,上标 $s$ 代表散射场; $f$ 代表自由场。

将公式(3)、(4)代入方程组(5),并对积分进行离散化,可得到以波源点上虚拟荷载密度为未知量的线性方程组:

$$\begin{cases} 0.5\varphi_i^r(x_m) + \sum_{n=1}^{N_1+N_2} \varphi_j^r(y_n) T_{ij}^r(x_m, y_n) = 0 \\ 0.5\varphi_i^e(x_m) + \sum_{n=1}^{N_1+N_2+N_3} \varphi_j^e(y_n) T_{ij}^e(x_m, y_n) = -\sigma_i^f(x_m) \\ \sum_{n=1}^{N_1+N_2+N_3} \varphi_j^e(y_n) G_{ij}^e(x_m, y_n) - \sum_{n=1}^{N_0+N_3} \varphi_j^r(y_n) G_{ij}^r(x_m, y_n) = -u_i^f(x_m) \\ 0.5[\varphi_i^e(x_m) - \varphi_i^r(x_m)] + \sum_{n=1}^{N_1+N_2+N_3} \varphi_j^e(y_n) T_{ij}^e(x_m, y_n) - \sum_{n=1}^{N_0+N_3} \varphi_j^r(y_n) T_{ij}^r(x_m, y_n) = -\sigma_i^f(x_m) \end{cases} \quad (6)$$

采用并行 GMRES 求解上述线性方程组,即得到波源点上虚拟荷载密度 $\varphi_j(\xi)$ 的唯一解,结合公式(1)和(2)就可求出散射场引起的地震动。将散射场和自由场的响应矢量叠加,即可得到平面波入射引起的实际地震动。

### 1.3 OpenMP 并行算法模型

为了节约计算的时间成本,本文采用 OpenMP 技术并行化构造散射场,使散射场的构造时间由 $O(N^2)$ 减少至 $O(N^2/n)$ ,其中 $N$ 和 $n$ 分别为模型的计算自由度和参与并行计算的线程数(本文采用的工作站线程数为128)。OpenMP 编程模型以线程为基础,当串程序在各个循环之间无数据相关性时,通过在循环前添加编译制导指令制导并行化。OpenMP 采用 Fork/Join 并行执行模式,当并行代码全部执行完成之后,分支线程退出并把控制权交还给主线程<sup>[21]</sup>。如图3所示,采用 OpenMP 并行计算之后,散射场的构造模式由逐点计算转化为多点并行计算,程序执行效率大幅提升。类似的,在使用 GMRES 迭代求解波源点虚拟荷载密度的过程中,同样采用 OpenMP 并行计算。

## 2 精度验证

为了验证间接边界元方法求解地震动的准确性,采用本文方法与半解析解<sup>[22]</sup>求解同一模型并进行对比。验证模型如图4所示,参数见表1。半球形盆地半径 $r$ 为1,无量纲频率 $\eta$ 取0.75,P波、SV波沿垂直自由地表方向入射沉积盆地模型。地表沿 $y$ 轴处( $x=0$ 截面)径向标准化位移幅值(实际位移幅值除以入射波幅值)验证如图5所示,可以看出本文方

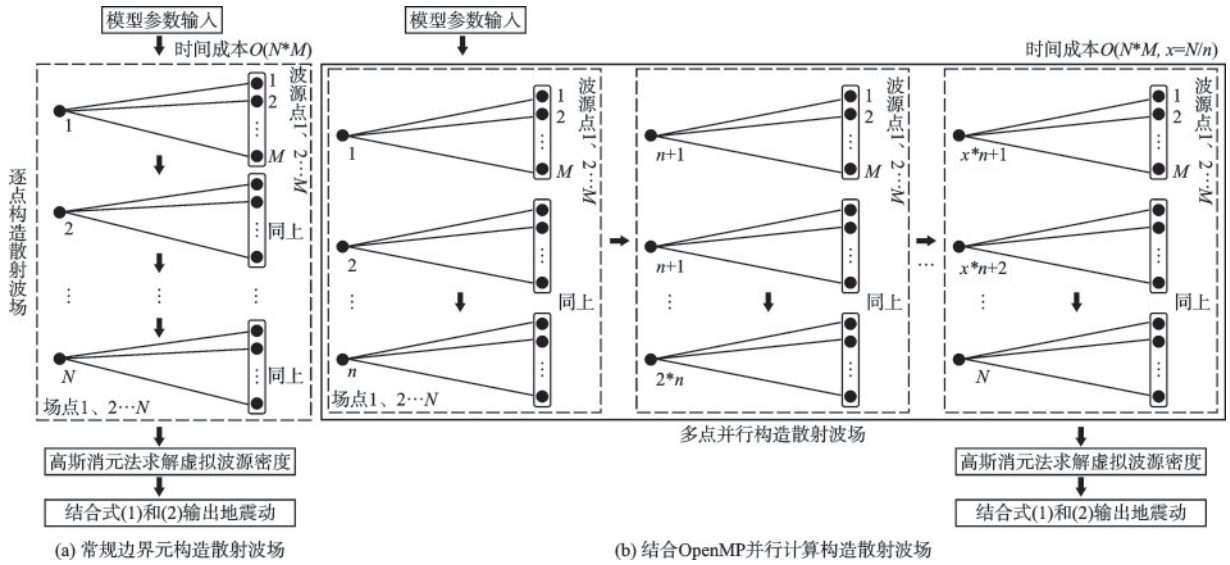


图3 常规边界元与结合 OpenMP 并行计算构造散射波场示意

Fig.3 Schematic diagrams of constructing scattered wavefields using conventional boundary element method and OpenMP parallel computing

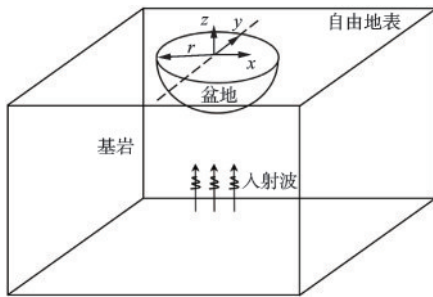


图4 三维半球形沉积盆地模型示意

Fig.4 Schematic diagram of three-dimensional hemispherical sedimentary basin model

表1 半空间和沉积盆地计算参数

Table 1 Calculation parameters of half-space and sedimentary basin

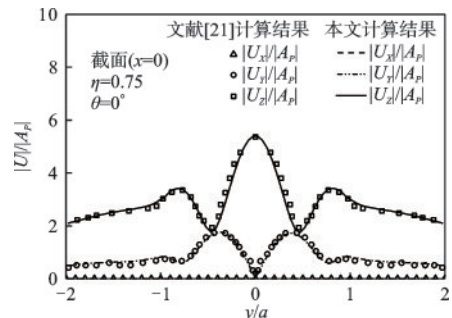
	剪切模量 $\mu$	泊松比 $\nu$	剪切波速 $\beta$	密度 $\rho$
半空间	1	1/3	1	1
沉积河谷	1/6	1/3	1/2	2/3

法的计算结果与文献[22]的半解析解具有良好的一致性,由此验证了本文方法的准确性。

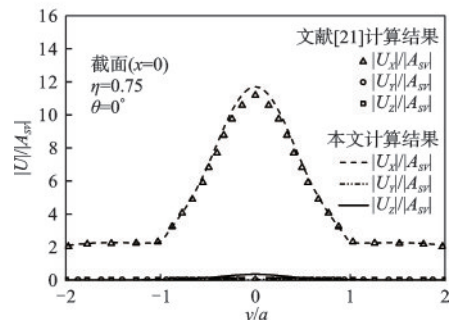
### 3 算例分析

#### 3.1 计算模型与参数

图6为文县城关镇高程图,海拔在819~2 599 m,整体上呈现两边高中间低的山间河谷地形。由于弹性波的空间衰减效应,与沉积河谷距离越大,地



(a) P波入射时地表位移幅值结果对比



(b) SV波入射时地表位移幅值结果对比

图5 P波与SV波入射时地表位移幅值与半解析解对比  
Fig.5 Comparisons of surface displacement amplitudes at P wave and SV wave incidence with semi-analytical solution

震波的散射效应越小<sup>[23]</sup>,鉴于此,为了简化计算,本文只保留两侧山体及沉积河谷的主要地形特征,对外围的场地进行平整处理,最终的计算模型及网格划分如图7所示。网格划分最小尺寸为10 m,模拟频率为0~3 Hz,模型直径为13 000 m,总计算自由度达到44.3万。

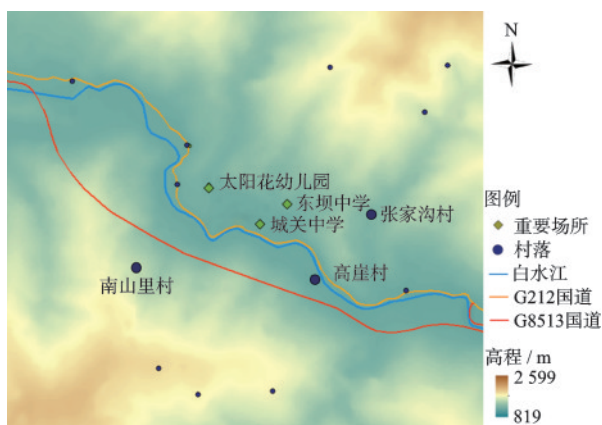


图6 城关镇高程图

Fig.6 Elevation map of Chengguan Town

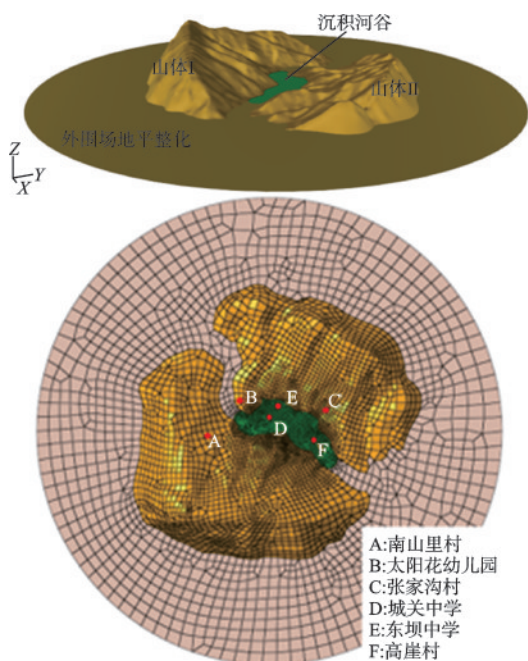


图7 城关镇模拟区域计算模型及网格划分

Fig.7 Calculation model and mesh division diagrams of the simulation areas in Chengguan

如图8所示,文县地形台阵作为临时流动台阵被布设在研究区域中的沉积河谷内,台阵有4个强震记录台站,记录了许多汶川地震的余震数据。台站T1位于城关镇北部山脚下的山洞里,台站T2位于上城山东侧的平地上,台站T3位于上城山斜坡上,台站T4位于上城山山顶。根据台站及附近地勘资料,该场地土层从上到下依次为填土、淤泥、粗砂、淤泥质沙土和板岩,计算可得板岩以上覆土层的等效剪切波速约为 $350\text{ m/s}^{[10]}$ 。为了简化计算,本文将板岩以上的层状覆土层等效为具有等效剪切波速的均质土层,剪切波速取 $1000\text{ m/s}$ ,具体计算参数统计见表2。



图8 文县地形台阵位置

Fig.8 Location of terrain station array in Wen County

表2 半空间和沉积河谷计算参数

Table 2 Calculation parameters of half-space and sedimentary river valley

	粘滞系数 $\xi$	泊松比 $\nu$	剪切波速 $\beta/$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	密度 $\rho/$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
半空间	0.01	0.25	1 000	2 500
沉积河谷	0.03	0.33	350	1 600

为评估模型简化土层参数后的计算可行性,利用DEEPSOIL软件对T2台站所在软土地带进行一维场地地震反应分析,通过对比简化土层和实际土层模型的地表响应,验证简化的合理性。将经过调幅的Northridge波作为输入地震动,其中Northridge波的峰值加速度调整为 $10\text{ gal}$ ,如图9所示。简化土层和实际土层的参数见表3。两种模型计算所得地表加速度时程、反应谱对比如图10所示,可以看出简化土层和实际土层模型的计算结果具有良好的一致性。简化土层与实际土层计算结果存在一些差异的主要原因是实际土层中的层间反射与折射在简化土层中被忽略了。然而,实际工程中通常对地表的震动更为关心,因此在地表震动差异不大的情况下,采用简化土层替代实际土层可以大幅降低计算成本,故本文采用简化土层方案。

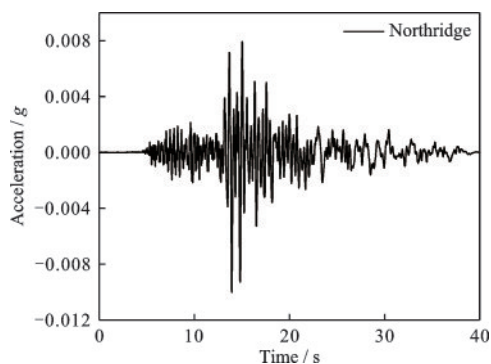


图9 Northridge  $M_w 6.7$ 地震输入时程

Fig.9 Northridge  $M_w 6.7$  earthquake input time history



表3 T2台站土层模型计算参数

Table 3 Calculation parameters of soil layer model at station T2

土层模型	序号	层厚/m	剪切波速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )
简化土层	1	14.3	350	15.686
	1	1	136	15.043
实际土层	2	8.9	355	15.778
	3	2.4	555	21.07
	4	2	487	18.326

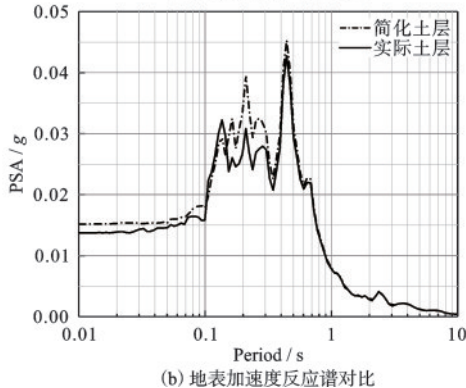
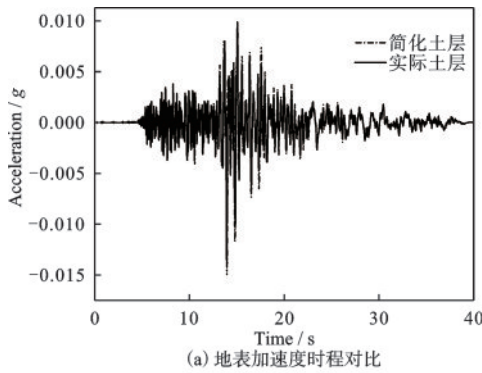


图10 地表加速度时程、反应谱对比

Fig.10 Comparison of surface acceleration time history and response spectra

### 3.2 与场地监测结论对比

文县台阵记录到12次 $M_s \geq 4.0$ 地震事件,选取其中的 $E_{11}$ 地震作为场地监测数据进行对比,该地震于2008年8月1日发震并被文县台阵的4个台站记录到。卢育霞等<sup>[10]</sup>基于 $E_{11}$ 地震实测记录使用参考场地谱比法(RSSR)得到了各台站相对于T1台站的放大效应曲线。本文以间接边界元法模拟平面SH波垂直入射下城关镇的地震动,并计算了频域内T2和T4台站加速度响应相对于T1台站的放大系数。本文模拟结果和参考场地谱比法(RSSR)计算的结果对比如图11所示。可以看出,间接边界元

法与参考场地谱比法的结果不论在数值还是整体趋势上差异都不大。模拟结果与参考场地谱比法的差异主要是由于本文模型在介质和几何方面进行了适当的简化所导致的。介质方面,本文模型将层状土层简化成了均质土层;几何方面,对模型中山体外围的起伏地形进行了平整处理。

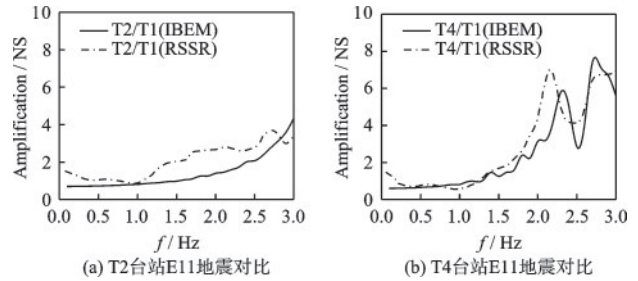


图11 T2/T4台站E11地震NS方向参考场地谱比法与间接边界元法模拟对比

Fig.11 Comparisons of reference site spectral ratio method with indirect boundary element method for simulating E11 earthquake in NS direction at stations T2 and T4

### 3.3 山体-河谷场地地震动放大效应频域求解

本节以间接边界元法模拟平面P波、SV波沿 $z$ 轴垂直入射文县城关镇时的全域地震动。选取研究区域内位于山体I上的南山里村、山体II上的张家沟村和太阳花幼儿园及位于河谷内的城关中学、东坝中学、高崖村6个具有代表性的观测点进行分析,观测点位置及标记如图6、图7所示。

P波入射下6个观测点三向地表标准化位移(总场位移除以入射波位移幅值,本质上是地震动位移相对入射波幅值的放大系数)如图12所示,下文所有量化的位移均指标准化位移。

由图12可知,山体上南山里村、张家沟村和太阳花幼儿园三个观测点的地震动在计算频段内较为稳定,三者的位移最大值出现在位于山体I山腰位置处的南山里村,主方向(P波和SV波的震动主方向分别是 $z$ 轴和 $x$ 轴方向)的位移幅值达到了3.66(2.2 Hz),高于山体II上张家沟村的3.19(1.9 Hz)、太阳花幼儿园的2.74(0.7 Hz)。

位于沉积河谷中的城关中学、东坝中学、高崖村观测点地震动放大效应显然强于山体上的观测点。城关中学邻近沉积河谷的中心区域,两侧较开阔,在中低频段(0.7~1.6 Hz)内表现出显著的放大,主方向位移的频谱曲线呈明显的双主峰特征,峰值分别为12.49(1.14 Hz)和12.21(1.4 Hz),且 $x$ 方向

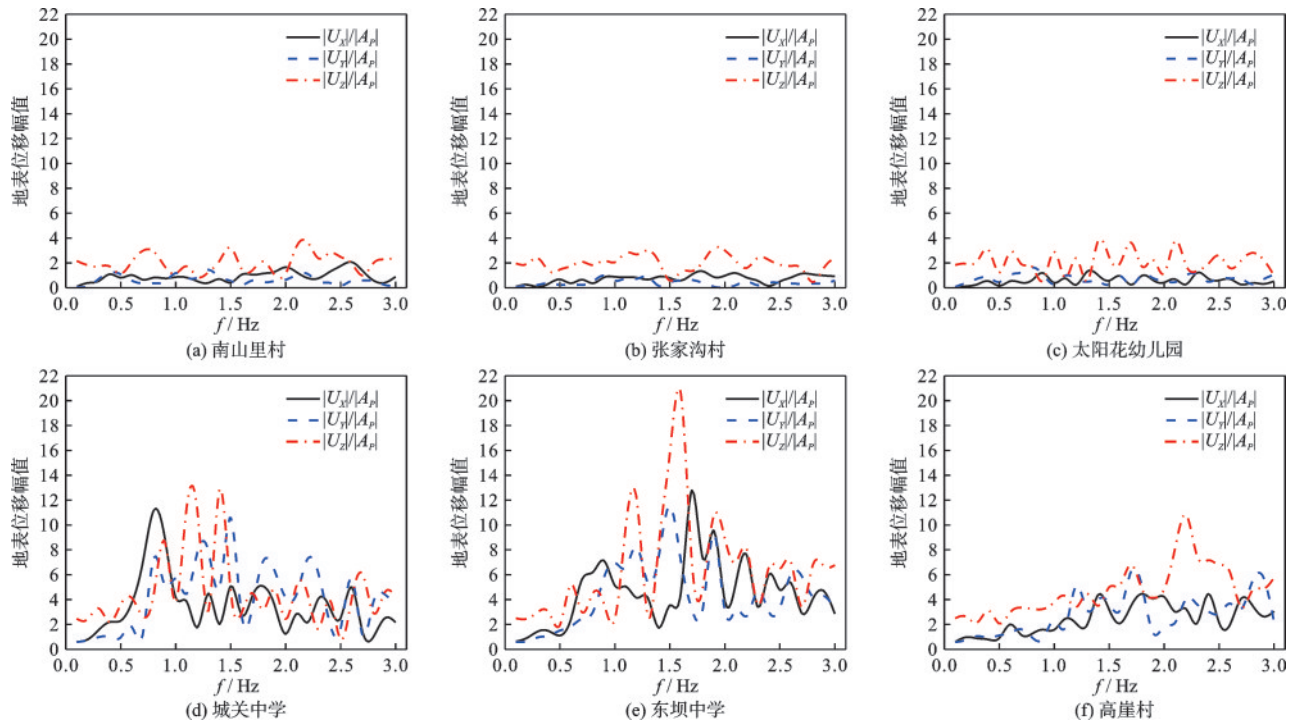


图 12 P 波入射下观测点标准化地表位移幅值

Fig.12 Normalized surface displacement amplitude maps at observation points under P wave incidence

的位移分量在低频段的最大位移也达到了 10.71 (0.83 Hz), 接近主方向最大位移。该现象的原因可能是观测点所处位置较厚的软土层对地震波低频分量有显著的放大效应。东坝中学位于河谷相对边缘区域, 位移在中频段(1.0~2.0 Hz)放大效应明显, 主方向的地震动放大系数最大达到了 19.64 (1.6 Hz), 是所有观测点中最大的。这可能是河谷的边缘效应和地震波在山体间来回反射叠加共同作用的结果。位于沉积河谷东南方向的高崖村, 主方向地震动放大最显著的频带是 1.7~2.6 Hz, 放大系数峰值为 10.16 (2.2 Hz)。其地震动放大的频带较高的原因可能是该观测点两侧空间相对狭窄, 易与高频波产生共振, 使得放大效应在高频段更为显著。

图 13 给出了 SV 波垂直入射下 6 个观测点的三向地表位移频谱。与 P 波入射的情况类似, 位于沉积河谷中的观测点地震动放大明显高于山体上的。南山里村、张家沟村和太阳花幼儿园观测点的地震动位移在模拟频带内相对稳定, 主方向位移的最大值分别为 3.48 (2.7 Hz)、3.1 (0.3 Hz)、2.97 (0.8 Hz)。

沉积河谷内的观测点地震动位移最大值出现的频率相对 P 波入射时小, 城关中学、东坝中学、高崖村的最大位移分别为 14.13 (0.9 Hz)、12.01 (1.0 Hz)、9.39 (1.7 Hz)。靠近河谷中心的城关中

学位移频谱震荡剧烈, 地震动放大效应最为明显。由于山体的反射作用, 地震波在两山之间来回反射, 导致邻近山体的东坝中学的中频段地震动放大效应加强, 且 y 方向的位移分量达到了 11.7 (0.98 Hz), 已接近最大的主方向位移。狭窄河谷内的高崖村在 1.3~1.8 Hz 频带地震动位移稳定在 6 以上, 这在抗震设防工作中应予以重视。

图 14 给出了城关镇在 P 波入射下 0.5~3 Hz 不同频率的主方向地表位移幅值云图。由图 14 可知, 在 0.5 Hz 时, 沉积河谷中心偏左和山体 I 半山腰附近均存在面积较大的地震动聚焦区, 沉积河谷和山体的主方向位移放大系数最大值分别为 4.63 和 3.92, 山脊和山腰位置放大效应较为明显。在 0.5~1.5 Hz, 随频率增加地震动聚焦区域面积逐渐减小且河谷区域地震动放大系数迅速增大。随着频率进一步增大, 河谷区域的地震动位移逐渐减小, 但其空间变异性增强。整体来看, 中高频段内沉积河谷的地震动放大效应比较显著, 最大位移达到了 23.12, 对应频率为 1.5 Hz。

SV 波垂直入射时, 城关镇不同频率下的主方向地表位移幅值如图 15 所示。当入射波频率为 0.5 Hz 时, 沉积河谷的地震动放大效应显著强于两侧山体, 强震区位于河谷的中心区域, 最大位移达



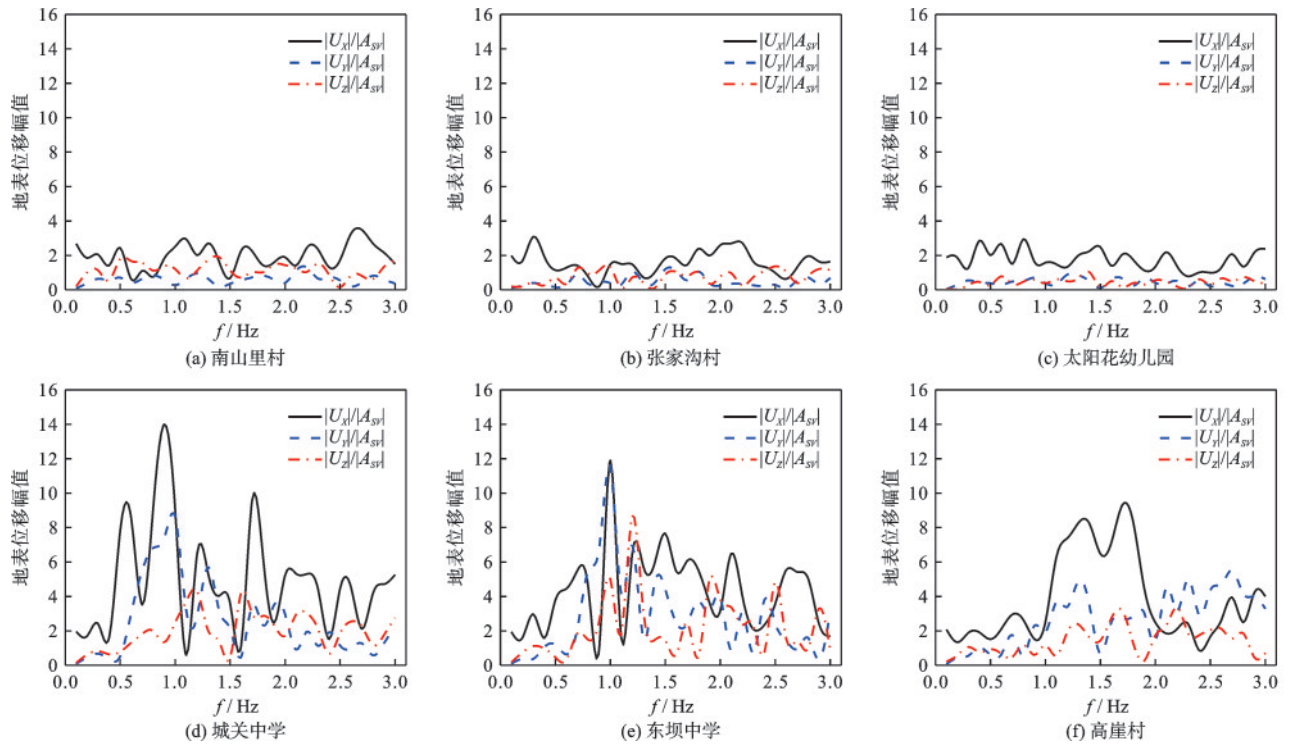


图 13 SV波入射下观测点标准化地表位移幅值

Fig.13 Normalized surface displacement amplitude maps at observation points under SV wave incidence

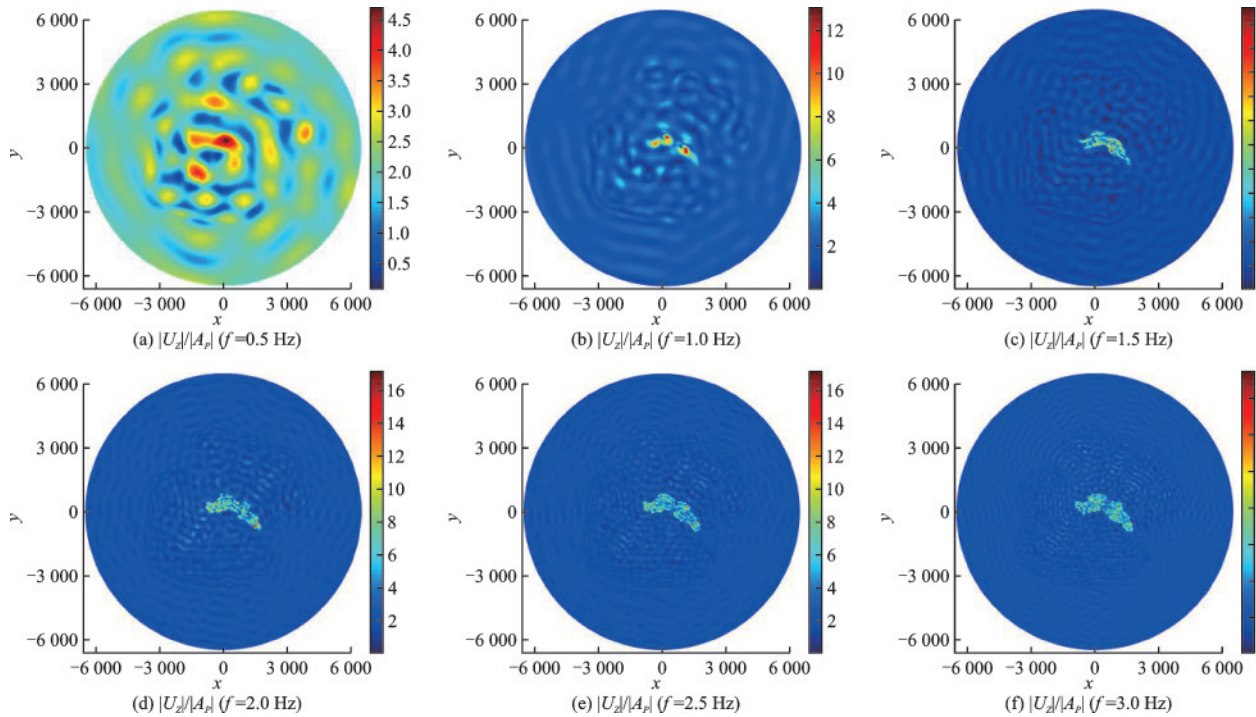


图 14 P波入射下不同频率标准化地表位移幅值云图

Fig.14 Normalized surface displacement amplitude cloud maps at different frequencies under P wave incidence

到10.44,远高于该频率P波入射时的4.63。山体的最大位移为5.59,且多处存在聚焦效应。两侧山体的位移聚焦区多沿着山体I和山体II山脊线分布,随着频率增高,该分布规律依然明显。在频率为

1.0 Hz时,河谷内的位移聚焦区以离散式分布在河谷边缘,最大位移达到19.72,比P波入射时的最大位移小17.24%。随着频率的进一步增加,沉积河谷内地震动的空间变异性逐渐增强。

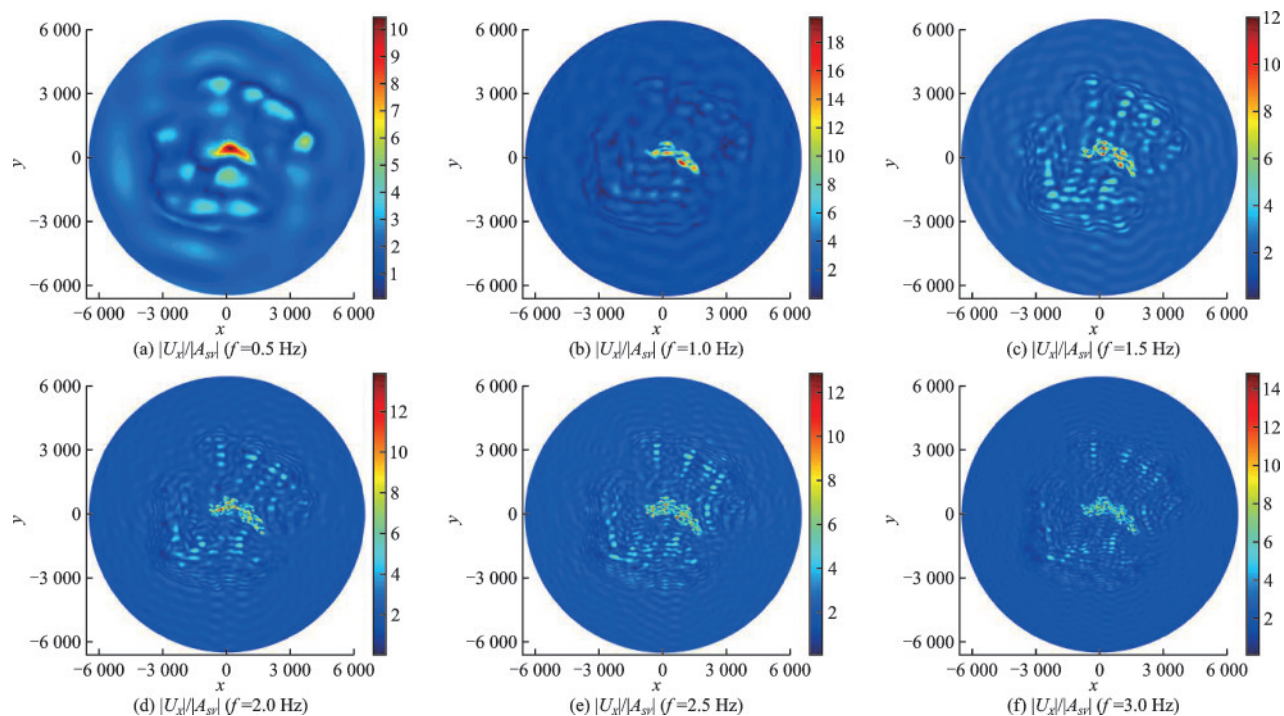


图 15 SV 波入射不同频率下标准化地表位移幅值云图

Fig.15 Normalized surface displacement amplitude cloud maps at different frequencies under SV wave incidence

## 4 结 论

本文根据钻孔资料及高精度地形数据建立甘肃省文县城关镇精细化三维山体-沉积河谷场地模型,采用间接边界元法分析了P波、SV波垂直入射下山间河谷地形的地震动放大效应,考虑到模拟区域尺寸较大,在耗时严重的散射波场构造和虚拟荷载求解部分引入OpenMP并行技术提高计算效率。研究结果表明:

(1) 结合OpenMP并行算法技术的间接边界元方法,大幅提高了计算效率,可在一台常规的工作站上实现镇域尺度的大规模复杂场地地震动高效模拟。

(2) P波、SV波入射下,沉积河谷和山体均会放大地震动,但沉积河谷的放大效应更为明显。P波入射下,沉积河谷和山体观测点位移放大系数最大值分别为19.64和3.66,SV波入射下则为14.13和3.48。

(3) 地震动放大效应及放大频带受众多因素影响。靠近沉积河谷中心区域的城关中学,由于软土层较厚、两侧相对开阔,对地震波的低频分量放大显著;而远离河谷中心、周围空间较狭窄的高崖村地震动放大频带相对较高,放大效应较城关中学

弱;位于河谷边缘、邻近山体的东坝中学,因河谷的边缘效应及地震波在山体间的反射叠加,整体放大效应更加地显著,地震动放大系数最大可达19.64。

(4) 城关镇山间河谷地形对于P波的地震动放大效应要强于SV波。虽然P波入射下放大系数最大为23.12,比SV波的19.72高出17.24%,但水平地震动对建筑物的破坏性通常更强,所以SV波的放大效应可能更需要引起重视。

## 参考文献:

- [1] 薄景山,齐文浩,刘红帅,等.汶川特大地震汉源烈度异常原因的初步分析[J].地震工程与工程振动,2009,29(6):53-64.  
Bo J S, Qi W H, Liu H S, et al. Abnormality of seismic intensity in Hanyuan during Wenchuan earthquake [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(6): 53-64. (in Chinese)
- [2] 齐文浩,王振清,薄景山,等.汶川地震汉源县城震害分布与场地反应分析[J].哈尔滨工程大学学报,2020,41(3):383-389.  
Qi W H, Wang Z Q, Bo J S, et al. Study on earthquake disaster distribution and site response of Hanyuan abnormal intensity during the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41

- (3): 383-389. (in Chinese)
- [3] 袁丽侠. 场地土对地震波的放大效应[J]. 世界地震工程, 2003, 19(1): 113-120.  
Yuan L X. The amplifying effect of ground soil to earthquake wave[J]. World Earthquake Engineering, 2003, 19(1): 113-120. (in Chinese)
- [4] 王亚勇, 皮声援. 台湾9·21大地震特点及震害经验[J]. 工程抗震, 2000(2): 42-46, 2.  
Wang Y Y, Pi S Y. The Sep.21 of 1999 great Taiwan earthquake: main features and building damages[J]. Engineering Seismic, 2000(2): 42-46, 2. (in Chinese)
- [5] 唐晖, 李小军, 李亚琦. 自贡西山公园山脊地形场地效应分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(8): 74-79.  
Tang H, Li X J, Li Y Q. Site effect of topography on ground motions of Xishan park of Zigong city[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(8): 74-79. (in Chinese)
- [6] 高玉峰. 河谷场地地震波传播解析模型及放大效应[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(1): 1-25.  
Gao Y F. Analytical models and amplification effects of seismic wave propagation in canyon sites[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(1): 1-25. (in Chinese)
- [7] 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]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(4): 54-60. (in Chinese)
- [8] 巴振宁, 赵靖轩, 吴孟桃, 等. 基于逆断层动力学模型的三维山体地震动谱元法模拟[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(3): 32-42.  
Ba Z N, Zhao J X, Wu M T, et al. Three-dimensional ground motion spectral element method simulation based on inverse fault dynamics model[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(3): 32-42. (in Chinese)
- [9] 刘中宪, 武凤娇, 王冬. 沉积盆地-山体耦合场地对平面P波、SV波和Rayleigh波的二维散射分析[J]. 工程力学, 2016, 33(2): 160-171.  
Liu Z X, Wu F J, Wang D. Two dimensional scattering analysis of plane P, SV, and Rayleigh waves by coupled alluvial basin-mountain terrain[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(2): 160-171. (in Chinese)
- [10] 卢育霞, 刘琨, 王良, 等. 基于台阵记录的土层山体场地效应分析[J]. 地震学报, 2017, 39(6): 941-954.  
Lu Y X, Liu K, Wang L, et al. Site effect of unconsolidated soil hill based on seismic array records[J]. Acta Seismologica Sinica, 2017, 39(6): 941-954. (in Chinese)
- [11] 梁瑞锋. 白水江流域滑坡地质灾害危险性评价研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.  
Liang R F. Hazard assessment of landslide geological disaster in Baishui river basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [12] Liu Z X, Zhou T, Meng S B, et al. 2-D FM-IBEM Simulation of broadband ground motions on near-fault mountain-valley coupling site[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2022, 145: 224-241.
- [13] 章小龙, 李小军, 周正华, 等. 武都盆地效应三维有限元数值模拟[J]. 振动工程学报, 2018, 31(5): 811-820.  
Zhang X L, Li X J, Zhou Z H, et al. Three-dimensional simulations of seismic-wave propagation in the Wudu basin with realistic topography based upon the finite-element method [J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(5): 811-820. (in Chinese)
- [14] Zhang W, Shen Y, Chen X. Numerical simulation of strong ground motion for the  $M_s$  8.0 Wenchuan earthquake of 12 May 2008 with realistic surface topography [J]. American Geophysical Union, 2008, 36(3): 424-427.
- [15] 于彦彦, 芮志良, 丁海平. 三维局部场地地震波散射问题谱元并行模拟方法[J]. 力学学报, 2023, 55(6): 1342-1354.  
Yu Y Y, Rui Z L, Ding H P. Parallel spectral element method for 3D local-site ground motion simulation of wave scattering problem [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2023, 55(6): 1342-1354. (in Chinese)
- [16] Sánchez-Sesma F J, Campillo M. Topographic effects for incident P, SV and Rayleigh waves [J]. Tectonophysics, 1993, 218(1-3): 113-125.
- [17] Wong H L. Effect of surface topography on the diffraction of P, SV, and Rayleigh waves [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1982, 72(4): 1167-1183.
- [18] Sanchez-Sesma F J, Luzon F. Seismic response of three-dimensional alluvial valleys for incident P, S, and Rayleigh waves [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1995, 85(1): 269-284.
- [19] 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)
- [20] 张健飞,姜弘道. 适合于求解边界元方程组的 GMRES 算法的实用化和并行化研究[J]. 计算力学学报, 2004, 21(5):620-624.  
Zhang J F, Jiang H D. Study on the utilization and parallelization of the GMRES algorithm for BEM systems solution[J]. Computational Mechanics, 2004, 21(5): 620-624. (in Chinese)
- [21] 严成增,郑宏,孙冠华,等. 基于 OpenMP 的二维有限元-离散元并行分析方法[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2717-2724.  
Yan C Z, Zheng H, Sun G H, et al. Parallel analysis of two-dimensional finite-discrete element method based on OpenMP[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2717-2724. (in Chinese)
- [22] Mossesian T K, Dravinski M. Amplification of elastic waves by a three dimensional valley. Part 1: Steady state response[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1990, 19(5): 667-680.
- [23] 刘中宪,尚策,王小燕,等. 三维沉积盆地对地震动的放大效应——间接边界元法模拟[J]. 地震学报, 2017, 39(1): 111-131,155.  
Liu Z X, Shang C, Wang X Y, et al. Simulation on the amplification effect of a three-dimensional alluvial basin on the earthquake ground motion using the indirect boundary element method[J]. Acta Seismologica Sinica, 2017, 39(1): 111-131,155. (in Chinese)

(本文编辑:池莹莹)