•复杂艰险山区重大工程与环境•

DOI:10.12454/j.jsuese.202400702

本刊网刊

考虑“震源–介质–场地”的山脊河谷地形地震动放大效应研究

罗麒锐[1],赵仕兴[1*],熊　峰[2],吴启红[3,4],张　敏[5]

(1.四川省建筑设计研究院有限公司,四川 成都 610017;2.四川大学 建筑与环境学院,四川 成都 610065;3.非饱和土力学特性及工程技术四川省高校工程研究中心,四川 成都 610106;4.四川省城市固废能源与建材转化技术工程研究中心,四川 成都 610106;
5.西南石油大学 土木工程与测绘学院,四川 成都 610500)

摘　要: 现有研究往往忽视震源特性和传播路径在地震成灾中的重要作用,导致对复杂地形条件下地震动放大效应的分析不够全面。为此,本文提出一种综合考虑“震源–介质–场地”地震动放大效应的数值分析方法。该方法将“震源–介质–场地”整体模型精细划分为“震源–介质”模型和“介质–场地”模型。采用有限差分法求解“震源–介质”模型,再将其分析结果作为“介质—场地”模型的入射地震波,并结合图像识别技术、黏弹性人工边界和等效节点荷载法,实现地震波在局部场地中的传播研究。最后,分别以山脊、河谷及组合地形为例,开展复杂地形条件下地震动放大效应研究。研究结果表明,该方法能够有效模拟地震波从震源到场地的传播全过程,揭示地震波在复杂地形中的传播规律。该研究将震源机制、传播路径与局部地形效应纳入统一分析框架,弥补了传统方法侧重单一场地效应、对“震源–介质–场地”耦合作用考虑不足的局限,形成了可复现、可推广的复杂地形地震动放大效应数值分析流程,可为复杂山区地震危险性评估由单一地形分析向全过程模拟转变提供方法支撑,也可为川藏铁路、梯级水电站等重大工程的抗震设计和灾害防护提供科学指导,对提升复杂艰险山区重大工程的地震风险防控能力具有重要意义。

关键词:复杂地形;放大效应;“震源–介质”模型;“介质–场地”模型;频谱分析

中图分类号:P511.2　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-3246(2026)06-0092-15

地震作为一种破坏性极强的自然灾害,能在短时间内释放出巨大的能量,导致地面剧烈震动,从而对人类社会造成巨大的破坏和影响[1–2]。现有调研显示,当地震发生在地形复杂的山区,尤其是山脊与河谷相互交错区域时,地面震动情况更加剧烈,这一现象被统称为地震动放大效应[3–5]。当下,中国正处于经济发展的关键时期,川藏铁路、梯级水电站、油气管线等重大工程大多建在地形条件复杂的山区中。在这种地形起伏多变、地震活跃的区域进行大规模工程项目建设,研究地震动放大效应具有重要意义。

针对地震动放大效应的研究方法主要包括观测法[6–7]、试验法[8–9]、解析法[10–11]及数值法[12–13]。李平等[14]基于汉源县城震害考察及场地勘察资料对流沙河谷地形进行研究,指出地表的地震动放大系数远大于抗震规定的建议值。张中杰等[15]设计了3组圆形河谷地形试件进行振动台试验研究,结果显示,河谷地形效应导致地表峰值加速度放大超4倍。张宁等[16]通过理论对V形峡谷的地形效应进行研究,结果显示,峭壁峡谷较无峭壁峡谷的地表位移幅值放大超2倍。章小龙等[17]采用有限元法分别对二维及三维复杂山谷地形进行研究,指出地震波在山峰处呈现出明显的“鞭鞘效应”,但并非所有峰顶的峰值位移均会呈现放大现象。可见,作者针对山地河谷地形已进行了大量研究,且取得了丰硕成果,但主要集中在场地地形对地震动的影响。

事实上,地震成灾的程度不仅取决于场地条件,还深受震源本身特性及传播路径的影响[18–19]。地震波是地震发生时能量传播的主要形式,其特性直接

收稿日期:2024 – 09 – 03　　**修回日期:**2025 – 03 – 04　　**网络出版日期:**2025 – 03 – 14

基金项目:四川省科技厅项目(2024JDRC0101);四川省住房和城乡建设厅“揭榜挂帅”科技项目(KJ25002;KJ25006);四川省建筑设计研究院院内科研项目(KYYN2025018;KYYN2025020);西南石油大学自然科学“启航计划”项目(2023QHZ005)

作者简介:罗麒锐(1993—),男,高级工程师,博士. 研究方向:结构抗震研究. E-mail:luoqiruilqr@126.com

* **通信作者:**赵仕兴,教授级高级工程师, E-mail:316458931@qq.com

受震源机制、震源深度、震级等因素的影响。同时，地震波在传播过程中，还会遇到不同类型的介质界面，如地壳与地幔的分界面、岩石与沉积物的接触面等，这些界面会对地震波产生反射、折射、散射等效应，进而改变地震波的传播路径和能量分布[20–21]。因此，地震成灾需要从震源机制、传播路径以及场地效应3个方面进行理解[22]。

针对地震动放大效应的研究是一个复杂且多维度的课题，需综合考虑震源特性、地震波传播路径以及场地条件等多个因素。然而，现有相关研究侧重场地地形的影响，忽略了震源及传播路径重要性，导致在不同震源下，地震动放大系数的取值难以反映真实的地形效应。

在山脊与河谷等复杂多变的地形条件下，地震波的传播路径与响应机制展现出复杂性与独特性，尤为显著的是其地震动放大效应，这一现象极大挑战了研究者对地震行为的传统理解。在地震工程和地震地质学中，“震源–介质–场地”模型是一个重要的概念，涉及地震波从震源产生、介质传播，以及到达地表时与特定场地条件相互作用的完整过程。本文旨在基于这一框架，深入解析山脊、河谷等特殊地形中地震动放大效应的精细机制。研究结果不仅能够更加清晰地揭示地震波在复杂地形环境中的传播规律，还能够显著提升地震灾害预测与评估的精度与可靠性，对于指导工程结构的抗震设计、优化防灾减灾策略以及制定科学的灾害防护规划均具有重要价值。

1　“震源–介质–场地”数值模型

地震波的传播过程极其复杂，涉及震源机制的多样性、传播介质的非均匀性以及地表场地条件的多变性。这些因素的综合影响使得建立一个全面的数值模型较为困难。现有研究更多集中在震源模型、地震波传播模型或场地响应模型的单独部分，而不是将三者整合在一起进行整体分析。但实际上，震源、传播及场地均是影响地震动放大效应的重要因素，如图1所示。在一次地震作用下，地表不同区域地震波的入射角及地震动幅值会随震源、介质及地形的变化而发生变化，致使地震动在水平与竖向方向上的分量有所差异。

目前，针对“震源–介质”的分析多以理论推导为主，通常采用有限差分法进行求解。该方法建立在经典的数学逼近理论基础上，具有较高的计算效率和便捷的介质建模，但在处理曲线或不规则形状求解区域时效果较差，难以准确反映曲线边界或复杂几何形状对解的影响。相反，对于“介质–场地”的分析方法，则多以有限元分析为主，该方法具有较高的几何适应性和计算精度，但计算效率受模型尺寸的影响，同时对于非均匀传播介质，有限元模型的边界处理较为烦琐。

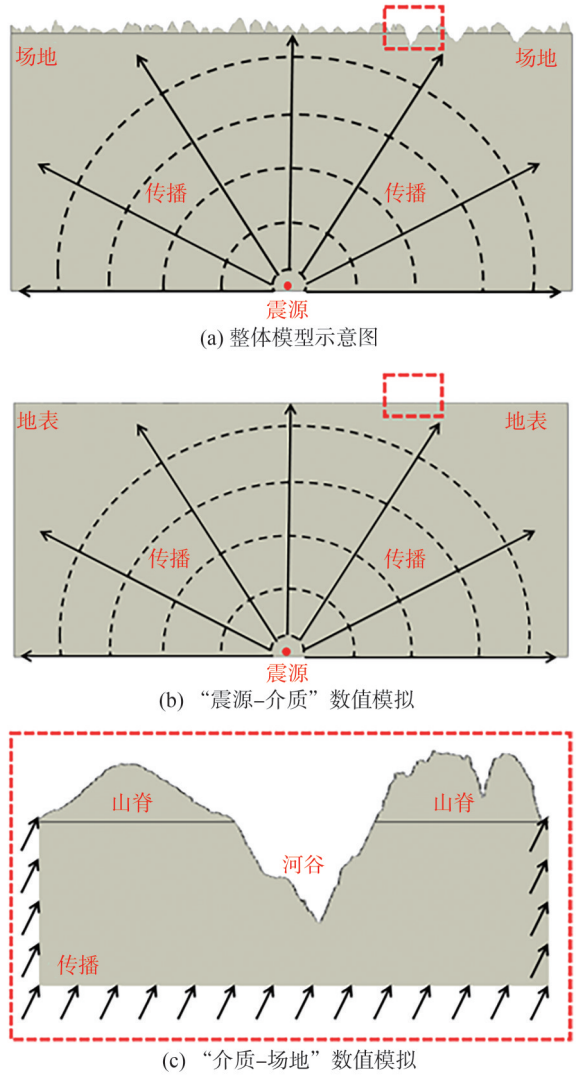


图1　考虑“震源–介质–场地”地形效应分析方法

Fig. 1　Topographic effect analysis method considering “focus–medium–site”

鉴于此，本文在综合现有地震分析技术特点的基础上，提出了一种考虑“震源–介质–场地”复杂地形地震动放大效应的分析方法，其主要步骤如下：

1）针对“震源–介质–场地”整体模型，结合分析需求精细划分为“震源–介质”模型和“介质–场地”模型，以便进行更为深入且有针对性的独立分析；

2）针对“震源–介质”模型，构建精确的波动方程，并引入Reynolds边界条件以模拟真实传播环境。随后，运用成熟的有限差分法，模拟不同参数震源激发的地震波传播过程，精确提取出目标地表区域的位移、速度及加速度时程曲线，为后续分析奠定坚实

基础；

3）针对“介质–场地”模型，采用图像识别法高效构建真实地形的几何模型。进而，借助黏弹性人工边界及等效节点荷载法，实现对局部地形中地震波传播路径的精准模拟，确保波场传播特性的真实反映。需特别指出的是，此步骤中所需的地震波时程曲线及其入射角度数据直接来源于步骤2）中的精细计算结果，确保了分析过程的一致性与准确性。

2 “震源–介质”数值模型

2.1 波动方程

建立“震源–介质”数值模型的方法主要包含几何射线法、积分方程法和波动方程法3类[23]。几何射线法因较少利用动力学信息，从而导致在模拟复杂介质时精度不高[24]。积分方程法则需求解大型矩阵方程，受限于计算效率[25]。相反，波动方程法不仅可以提供丰富的波场信息，还具有较高的数值精度，故被广泛应用于模拟地震波的传播过程[26]。二维波动方程可表示为：

$$\frac{\partial^2 u(t,x,y)}{\partial^2 t}=c^2\left(\frac{\partial^2 u(t,x,y)}{\partial^2 x}+\frac{\partial^2 u(t,x,y)}{\partial^2 y}\right)+\frac{\partial^2 f(t,x,y)}{\partial^2 t} \tag{1}$$

式中，$u(t,x,y)$表示二维空间下地震波传播的波动函数，$f(t,x,y)$表示震源的强迫振动函数，t、c、x和y分别表示波动时间、波速在x、y方向上的坐标值。采用泰勒公式进行展开，可得到其差分格式，表示如下：

$$u_{i,j}^{n+1}=2u_{i,j}^{n}-u_{i,j}^{n-1}+c_{i,j}^2\frac{\Delta t^2}{\Delta y^2}\sum_{m=1}^{L}(u_{i+m,j}^{n}-u_{i-m,j}^{n})+$$
$$c_{i,j}^2\frac{\Delta t^2}{\Delta y^2}\sum_{m=1}^{L}(u_{i,j+m}^{n}-u_{i,j-m}^{n})+\sum_{m=1}^{L}(f_{i,j}^{n+m}+f_{i,j}^{n-m}-2f_{i,j}^{n}) \tag{2}$$

式中，i和j分别表示二维空间x和y方向上的网格位置，Δt、Δx和Δy表示时间在x、y方向上的差分间隔，n为时间步长，m为差分模板的空间/时间偏移步长，L为差分精度参数，u为位移。为保证波场模拟的精确性和稳定性，还需满足如下稳定准则：

$$\frac{4c^2\Delta t^2}{\Delta x^2+\Delta y^2}\le 1 \tag{3}$$

2.2 边界条件

在用有限差分法求解波动方程时，需将无限空间域转化为有限空间域，故设置适当边界条件是正确求解的重要前提。对于自由边界，应具有初始速度和应力均为0的特征，其表达式如下：

$$u_{x,y}^{0}=f_{x,y}^{0} \tag{4}$$

$$\frac{\partial u_{x,y}^{0}}{\partial t}=0 \tag{5}$$

对于截断边界，为防止产生虚假反射，本文采用Reynolds边界条件[27]，其表达式如下：

左边界：

$$\frac{1}{c}\cdot\frac{\partial u_{x,y}^{t}}{\partial t}+\frac{\partial u_{x,y}^{t}}{\partial t}-\frac{1}{c}\cdot\frac{\partial u_{x+\Delta x,y}^{t-\Delta t}}{\partial t}-\frac{\partial u_{x+\Delta x,y}^{t-\Delta t}}{\partial t}=0 \tag{6}$$

右边界：

$$\frac{1}{c}\cdot\frac{\partial u_{x,y}^{t}}{\partial t}+\frac{\partial u_{x,y}^{t}}{\partial t}-\frac{1}{c}\cdot\frac{\partial u_{x-\Delta x,y}^{t-\Delta t}}{\partial t}-\frac{\partial u_{x-\Delta x,y}^{t-\Delta t}}{\partial t}=0 \tag{7}$$

下边界：

$$\frac{1}{c}\cdot\frac{\partial u_{x,y}^{t}}{\partial t}+\frac{\partial u_{x,y}^{t}}{\partial t}-\frac{1}{c}\cdot\frac{\partial u_{x,y-\Delta y}^{t-\Delta t}}{\partial t}-\frac{\partial u_{x,y-\Delta y}^{t-\Delta t}}{\partial t}=0 \tag{8}$$

2.3 震源函数

地震波是由于震源振动而产生的波动，在地震传播数值模拟中，对震源的处理是较为重要的环节。通常震源函数$f(t,i,j)$为时间函数与空间函数的乘积，表示如下：

$$f(t,i,j)=\delta(i,j)\cdot w(t) \tag{9}$$

式中，$w(t)$为时间函数，$\delta(i,j)$为空间衰减函数。在二维空间中，衰减函数的表达式通常如下：

$$\delta(i,j)=\exp(-\alpha^2((x-x_0)^2+(y-y_0)^2)) \tag{10}$$

式中：α为空间衰减因子，建议取值范围为0.1～1.0，本文取1.0；x_0和y_0为震源坐标，以震源为原点建立坐标系。

2.4 网格敏感性分析

尽管波动方程有限差分计算的发展较为成熟，但网格尺寸对其计算结果仍有较大影响。因此，将以雷克子波作为震源函数进行网格敏感性分析。雷克子波数学模型是目前地震勘探中普遍认可和采用的地震子波之一，其数学表达式如下：

$$w(t)=(1-2\pi^2 f_{\text{avg}}^2(t-t_0)^2)\exp(-\pi^2 f_{\text{avg}}^2(t-t_0)^2) \tag{11}$$

式中，f_{avg}为子波频率，t_0为延迟时间。以尺寸为2 000 m×2 000 m的均匀介质模型为分析对象，地震波传播速度为2 500 m/s，子波频率40 Hz。分别采用网格间距为1、2、5和10 m对模型进行剖分。总时间步为2 000，时间间距为0.000 2。图2给出了不同网格尺寸下0.3 s时的波场快照与高度500 m处的地震记录。从图2可见，当网格尺度为10 m时，数值模型产生了明显的频散现象，而在网格尺寸不大于5 m的模型中，波场特征与地表地震记录保持基本一致。

根据有限差分法的计算原理可知，网格尺寸对计算结果有较明显影响，因此，需对单道地震记录进行比对分析。图3为不同网格尺寸下均匀介质模型在(1 000 m，500 m)处地震波记录曲线对比及误差分析。

从图3可以看出，在不同网格尺寸下，观测点均在0.2 s附近产生波动，但4组模型观测点地震波的形状有所差别。以网格尺寸为1 m的记录曲线为基础，获得各曲线误差的变化情况，进一步对计算误差进行分析。网格尺寸为2、5及10 m的记录曲线最大误差分别为0.008，0.030及0.030。由此可以推断，网格尺寸的变化会对计算结果产生误差，因此需要尽量减小网格尺寸以降低误差。

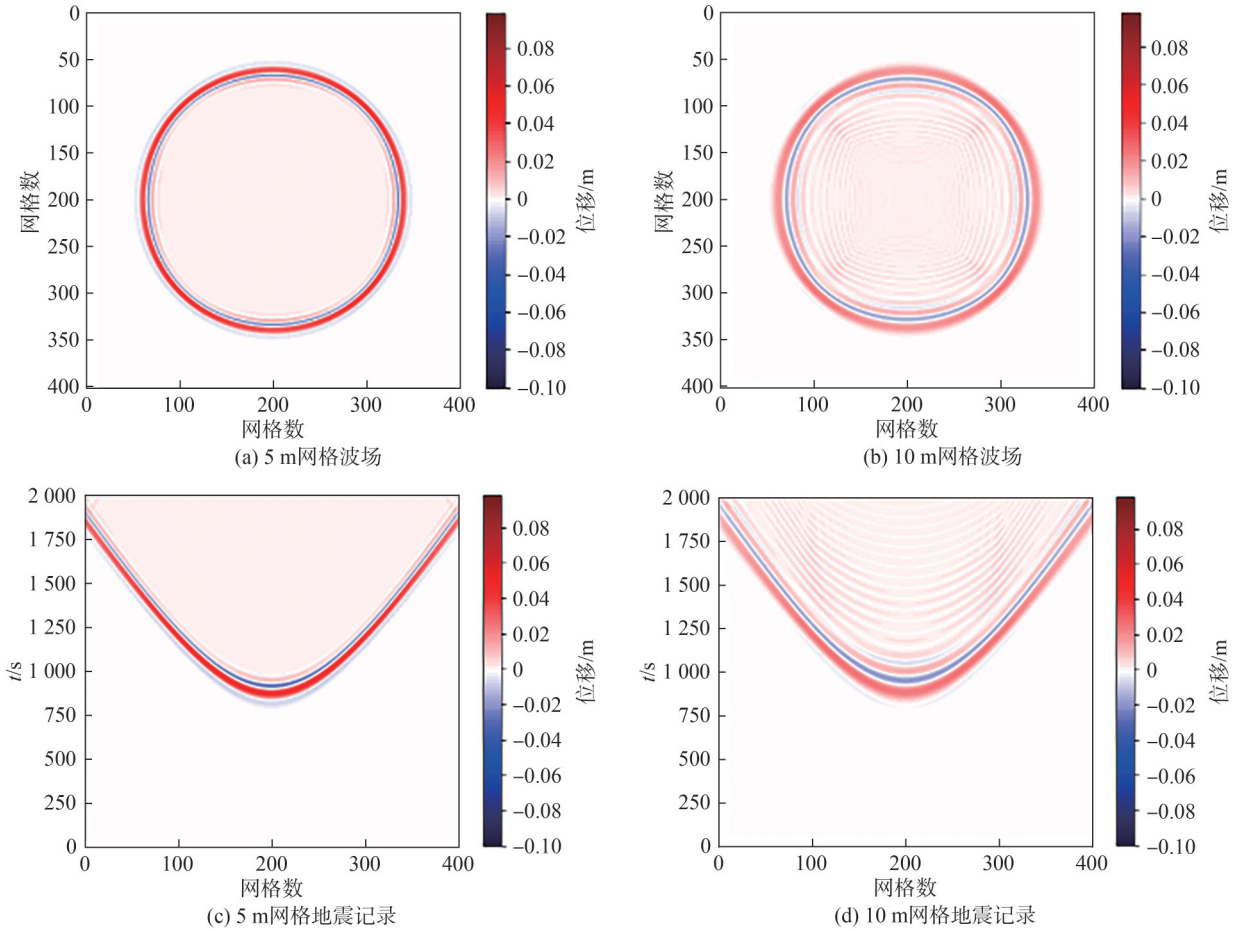


图2　不同网格尺寸下0.3 s时的波场快照与高度500 m处地震记录

Fig. 2　Wave field snapshots at 0.3 s with different mesh sizes and seismic records at 500 m height

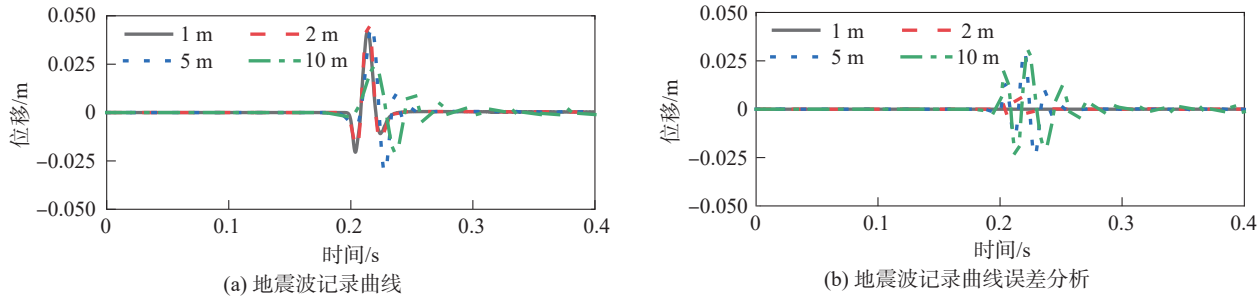


图3　不同网格尺寸下均匀介质模型在(1 000 m, 500 m)处结果对比

Fig. 3　Comparison of results at (1 000 m, 500 m) for a homogeneous medium model under different mesh sizes

3　“介质–场地”数值模型

3.1　场地模型

在有限元模型中，复现真实地形是地震动放大效应研究的重要前提。然而，真实地形往往具有复杂的局部特征，如山脊、河谷等地形。人为建模不仅耗时，还难以捕捉到这些局部特征，导致分析结果存在误差。图像识别技术可以自动分析和处理大量地形图像数据，提高地形建模的效率。地形识别的关键在于边界识别，如图4所示。首先，需将真实地形图像转化为黑白地形图，其中黑色为地形区域，白色为非地形区域。再对黑白地形图的所有像素点从左至右进行遍历，并判断读取点周围24个像素点的颜色。当白色像素数范围为8～15时，判定读取点为地形

边界。遍历结束后，需先根据图像尺寸对边界坐标进行归一化处理，再以地形真实高宽转换归一化处理后的边界点坐标，最终获得真实地形边界点坐标集合。

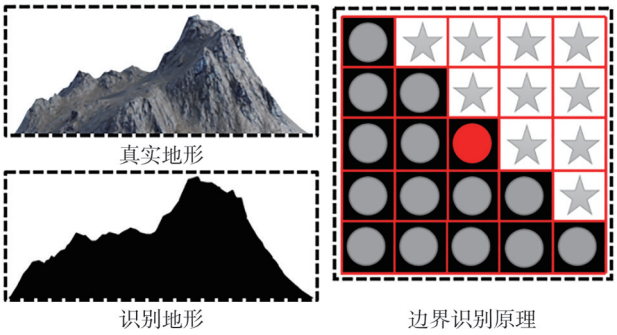


图4 地形识别原理

Fig. 4 Topography recognition principle

3.2 边界条件

在有限计算区域内模拟无限大的域，这在地形模拟中特别重要，因为地形可能延伸到无限远，但实际上仿真模型只能模拟有限大小的区域，故而对截断边界的处理至关重要。黏弹性人工边界法是一种在数值模拟中常用的技术，其本质是通过在模型截断边界建立刚度弹簧和阻尼弹簧，来消除边界反射问题。刚度系数和阻尼系数计算式如下：

$$k_{\mathrm{n}}=\frac{1}{1+A}\cdot\frac{\lambda+2G}{2R} \tag{12}$$

$$d_{\mathrm{n}}=B\rho C_{\mathrm{P}} \tag{13}$$

$$k_{\mathrm{t}}=\frac{1}{1+A}\cdot\frac{G}{2R} \tag{14}$$

$$d_{\mathrm{t}}=B\rho C_{\mathrm{S}} \tag{15}$$

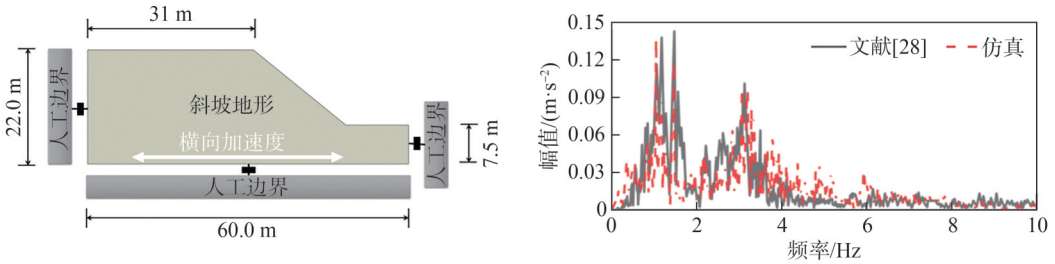
式(12)～(15)中，k_{n}和k_{t}为法向和切向刚度系数，d_{n}和d_{t}为法向和切向阻尼系数，C_{P}和C_{S}为P波和S波的波速，G和ρ为传播介质的剪切模量和密度，R为波源到人工边界的距离，参数A和B的建议取值分别为0.8和1.1。同时，采用等效节点荷载法将地震波转化为边界节点集中荷载，以此实现地震动的输入，边界节点的集中荷载如下：

$$F_{lk}=A_l(K_{lk}u_{lk}+C_{lk}\dot{u}_{lk}+\sigma_{lk}) \tag{16}$$

式中，A_l为在截断边界上节点l的控制面积，K_{lk}、C_{lk}、u_{lk}、$\dot{u}_{lk}$和σ_{lk}为截断边界节点l在方向k上的刚度系数、阻尼系数、位移分量、速度分量和作用应力。

3.3 数值验证

“介质–场地”数值模型的验证以文献[28]中的斜坡模型为参照，单元采用CPS4R，网格尺寸为5 m×5 m。传播介质参数参考文献[28]取值，密度为1 800 kg/m^3，弹性模量为2.391×10^8 N/m^2，泊松比为0.25。地震波采用加速度峰值为0.086g的El-centro波，模型尺寸如图5(a)所示，加速度傅里叶频谱对比曲线如图5(b)所示。结果显示，仿真曲线与试验曲线具有较高的吻合度，且仿真和试验的最大幅值分别为0.143 m/s^{2}和0.137 m/s^2，误差为4.2%，表明该方法可以有效实现“介质–场地”数值模拟。



(a) 验证模型 (b) 傅里叶频谱对比曲线

图5 “介质–场地”数值模拟验证案例

Fig. 5 Numerical simulation verification case of “medium–site”

4 实例分析

4.1 不同地表区域内山脊地形地震动放大效应研究

4.1.1 山脊地形分析模型

山脊是山区最为典型的凸出地形之一，通常由地壳运动和岩石的抬升而形成，且呈现出长而窄的形状，两边为陡立的斜坡地形。本节重点研究不同地表区域内山脊地形的地震响应，模型示意图如图6所示。震源深度为10 km(近场假设)，网格尺寸为20 m，分析模型为均匀介质，介质参数与第3.3节保持一致，其中“震源–介质”模型的衰减特性依旧采用式(8)描述。震源地震波采用El-centro波(设定为SV波)，峰值加速度设定为2.0g。震源采用El-centro波的SV分量，其初始振动方向仅反映的是断层的滑动方向，但实际上地震波还存在P和SH波，需在后续研究中进行深入分析，探讨不同地震波类型的影响。地表区域$\mathrm{L_{r0}}$为震中区域，地表区域$\mathrm{L_{r\text{-}40}}$、$\mathrm{L_{r\text{-}20}}$、$\mathrm{L_{r20}}$和$\mathrm{L_{r40}}$分别位于震中左侧8.39 km、左侧3.64 km、右侧3.64 km和右侧8.39 km。在5处地表区域内设置高60 m、宽100 m的山脊地形。由于“震源–介质”分析模型为均匀介质，可根据地震波射线理论[29–30]判定地表各区域的地震波入射角。区域$\mathrm{L_{r\text{-}40}}$和$\mathrm{L_{r40}}$地震波的入射角为40°，区域$\mathrm{L_{r\text{-}20}}$和$\mathrm{L_{r20}}$地震波的入射角为20°，区域

L_{r0}地震波的入射角为0°。

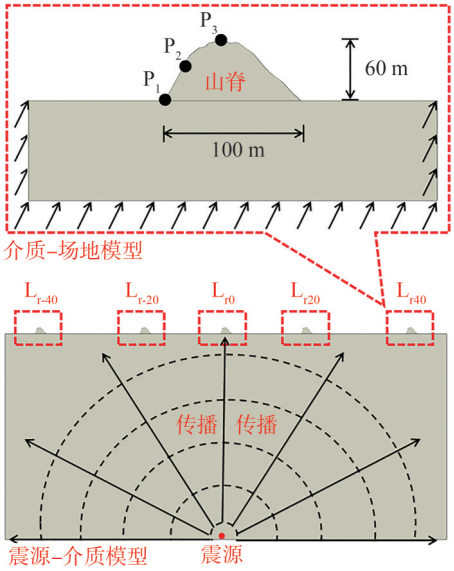


图6　考虑“震源–介质–场地”的山脊地形分析模型示意图

Fig. 6　Schematic diagram of ridge topography analysis model considering “focus–medium–site”

4.1.2　地震动放大系数空间分布

图7给出了不同地表区域内山脊地形地震动放大系数的空间分布图，其中，灰色部分表示超出了颜色柱最大值，后文同。地震动放大系数A_F定义为山脊地形各观测点加速度绝对值的最大值与平坦地形对应点加速度绝对值的最大值之比，表达式如下：

$$A_F = \frac{P_{GAr}}{P_{GAp}} \tag{17}$$

式中：P_{GAr}和P_{GAp}分别为山脊地形观测点与平坦地形对应点加速度绝对值的最大值。从图7中可以看到，山脊地形的水平地震动放大系数最大值均出现在顶部，即表明山脊顶部产生了明显的鞭稍效应。其原因可能为尽管地震波在山脊地形中发生了散射，但最终汇集于山脊顶部，从而导致顶部震动最为剧烈。

另一方面，不同地表区域会改变“介质–场地”模型地震波的入射角，从而影响山脊地形地震动放大系数的取值，如L_{r-40}的水平地震动放大系数最大值为2.80，L_{r0}的水平地震动放大系数最大值为1.14。主要缘由可能为当震中距越小时，平坦地形的水平振动更加剧烈，从而地震动放大系数的分母值会越大，导致地震动放大系数的值更低，故呈现震中距越大地震动放大系数越大的趋势。对于山脊地形的竖向地震动放大系数，其表现出的规律与水平地震动放大系数相反，如L_{r-40}的竖直地震动放大系数最大值为1.38，L_{r0}的竖直地震动放大系数最大值为13.12。此外，竖向地震动放大系数的最大值分布于山脊顶峰的两侧，而非山脊顶部。因此，两个方向上的地震动放大效应应独立研究。

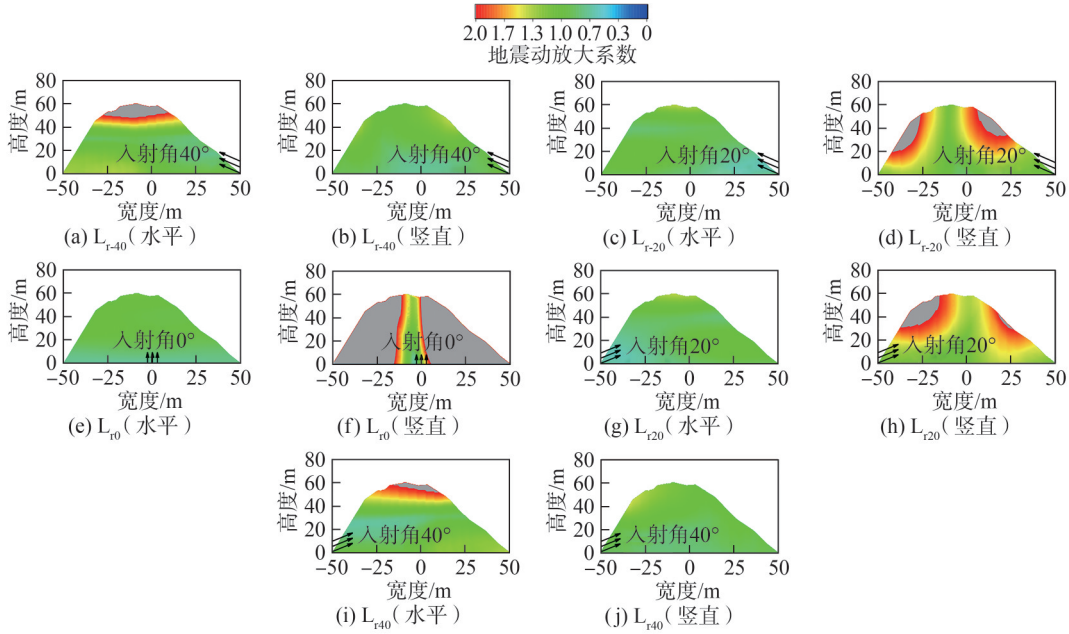


图7　不同区域内山脊地形地震动放大系数空间分布

Fig. 7　Spatial distribution of ground motion amplification coefficient of ridge topography in different regions

4.1.3　频谱分析

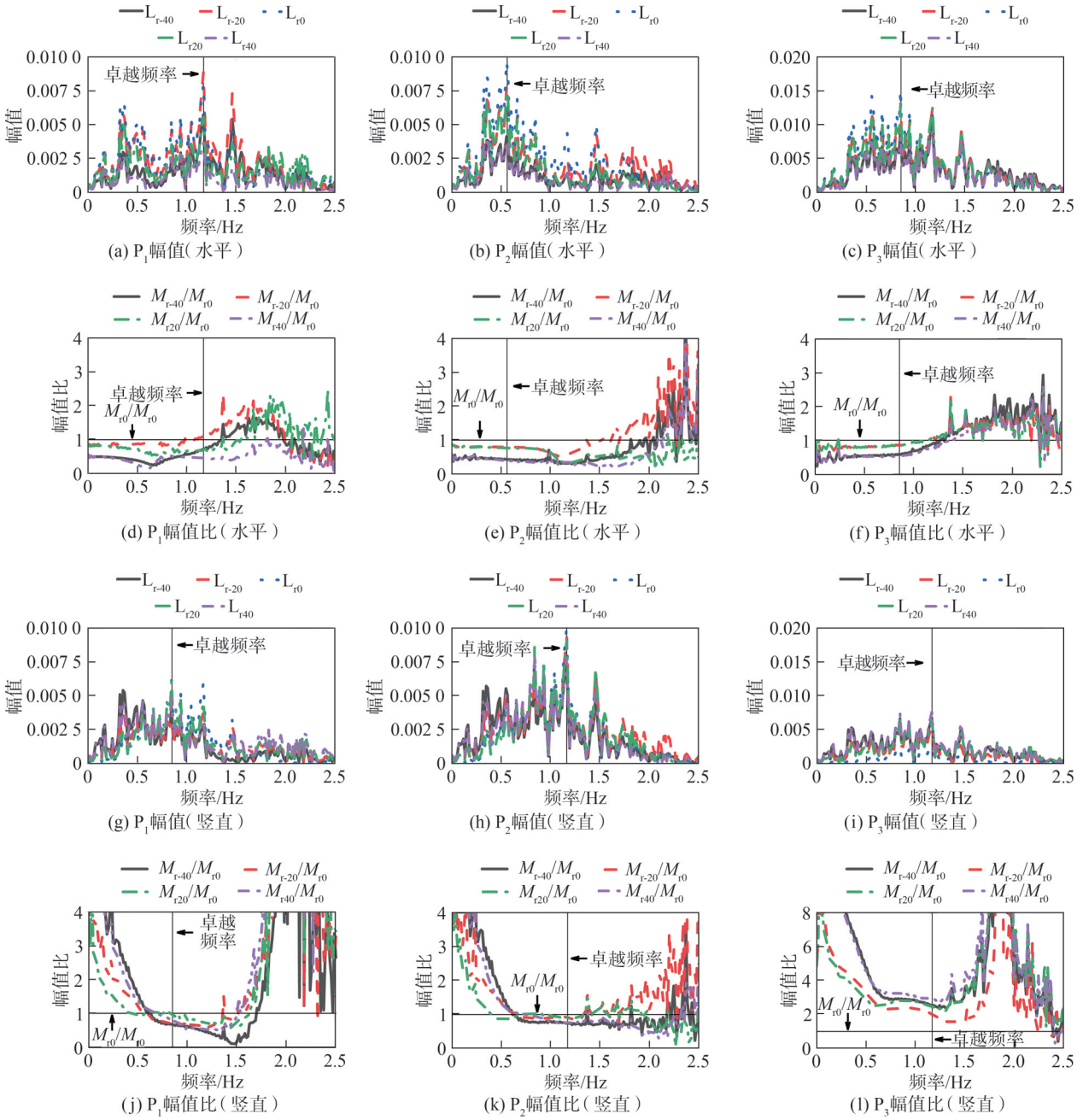
图8为不同地表区域内山脊地形上观测点P_1、P_2及P_3的地震动傅里叶谱及傅里叶谱比，其中傅里叶谱比定义为不同地表区域山脊观测点傅里叶谱与震中山脊观测点傅里叶谱之比，记为M，如下式所示：

$$M = \frac{A_{MPr}}{A_{MPo}} \tag{18}$$

式中，A_{MPr}和A_{MPo}分别为其余地表区域内观测点与区域L_{r0}对应点的傅里叶幅值。

图8中，区域L_{r-40}、L_{r-20}、L_{r0}、L_{r20}和L_{r40}的幅值比分别

记为$M_{r\text{-}40}$、$M_{r\text{-}20}$、M_{r0}、M_{r20}和M_{r40}。从图 8 中可以看到：1）不同地表区域观测点卓越频率（为便于对比，取 5 个场地地震波频谱最大幅值对应的频率）处的幅值与地表区域到震源的距离有关，主要因为地震波的传播会随着距离的增加逐渐降低；2）山脊底部观测点P_1和山脊顶部观测点P_3的水平震动强于竖直震动，但山脊中部观测点P_2的现象相反，呈现出竖直震动强于水平震动的特点；3）观测点幅值比的变化现象表明，不同地表区域内观测点的地震动放大效应与地震波的频率相关，如区域$L_{r\text{-}20}$内观测点P_1在 0～1.2 Hz 及 2.0～2.5 Hz 频段内水平震动呈现减小现象，幅值比的最小值为 0.23。而在 1.2～2.0 Hz 频段内水平地震动呈现放大现象，幅值比的最大值为 2.39。



注：图（h）、（j）、（k）、（l）中部分曲线在个别频段超出纵坐标范围，超出部分非本文关注重点，故未完整显示，不影响分析。图 11（j）、（k）、（l），图 14（j）、（k）、（l）同理。

图 8 不同区域内山脊地形上不同观测点地震动傅里叶谱及傅里叶谱比

Fig. 8 Fourier spectra and Fourier spectral ratios of ground motion at different observation points on ridge topography across various regions

4.2 不同地表区域内河谷地形地震动放大效应研究

4.2.1 河谷地形分析模型

河谷地形由谷顶、谷坡及谷底三部分组成，是一种复杂而有序的凹形地形。这种复杂性主要体现在水平及垂直方向上的变化性（如河谷的宽窄、曲直、深浅等）。本节重点研究不同地表区域内河谷地形的地震响应，模型

示意图如图 9 所示。震源深度为 10 km，网格尺寸为 20 m，分析模型为均匀介质，介质参数与地震波参数同第 4.1 节。地表区域 $L_{c\text{-}40}$、$L_{c\text{-}20}$、L_{c0}、L_{c20} 和 L_{c40} 分别位于震中左侧 8.39 km、左侧 3.64 km、震中、震中右侧 3.64 km 和右侧 8.39 km，并设置深 60 m、宽 100 m 的河谷地形。

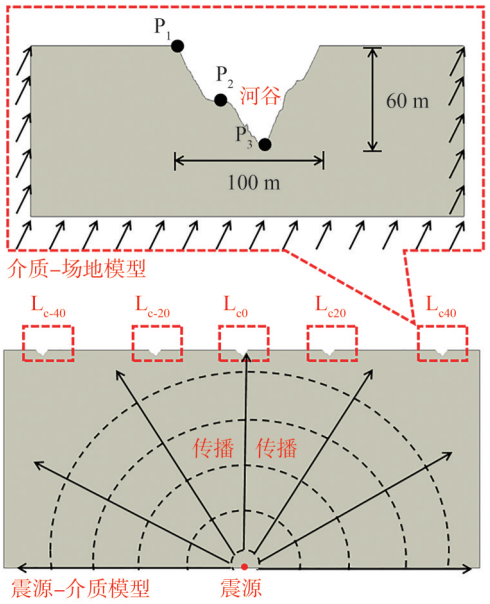


图 9　考虑“震源–介质–场地”的河谷地形分析模型示意图

Fig. 9　Schematic diagram of valley topography analysis model considering “focus–medium–site”

4.2.2　地震动放大系数空间分布

河谷地形地震动放大系数的空间分布规律是一个复杂的地震学问题，涉及地震波在河谷地形中的传播特性，包括地震波的散射、反射、叠加对地震波的放大或衰减作用。图 10 为不同地表区域河谷地形地震动放大系数空间分布。下凹河谷地形可阻隔地震波的正常传播，使得河谷两侧地表地震动特征不同。以地表区域 $L_{c\text{-}40}$ 为例，地震波从右侧射入，入射角为 40°，如图 10(a)和(b)所示。该区域迎波侧和背波侧的峰值水平地震动放大系数分别为 2.80 和 1.80，表明迎波侧的水平地震动放大效应更加明显。相反，该区域迎波侧和背波侧的峰值竖直地震动放大系数分别为 1.14 和 1.26，表明背波侧的竖向地震动放大效应强于迎波侧。由此可以推测，地表区域与震源的相对位置关系对地表地震动放大效应有直接关系。

值得说明，在地表区域 L_{c0}，尽管地震波是垂直入射，但右侧和左侧的峰值水平地震动放大系数仍存在差异，分别为 1.14 和 1.27（均出现在谷顶）。主要缘由可能为河谷地形局部特征对地表地震动产生了影响。

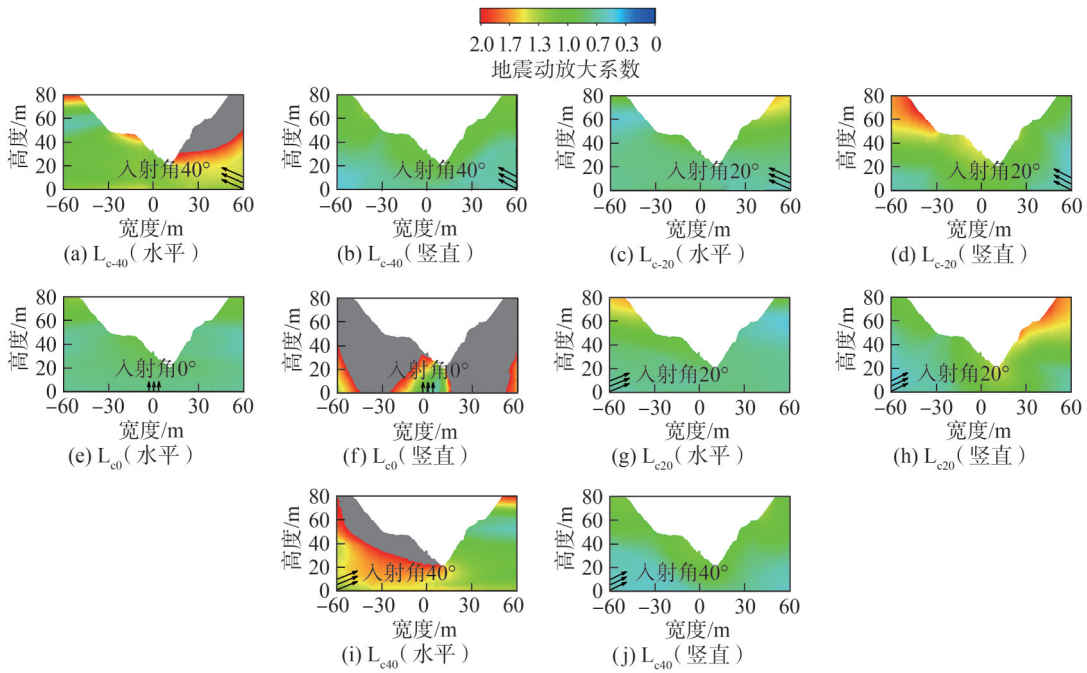


图 10　不同区域河谷地形地震动放大系数空间分布

Fig. 10　Spatial distribution of ground motion amplification coefficients of valley topography in different regions

4.2.3　频谱分析

图 11 为不同地表区域内河谷地形观测点 P_1、P_2 和 P_3 的地震动傅里叶谱及傅里叶谱比。从傅里叶频谱图可以看出，观测点 P_1、P_2 及 P_3 的频谱幅值逐渐减小，表明河谷的震动随深度的增加而降低。

对于频谱幅值比，由于在地表区域 $L_{c\text{-}40}$ 和 $L_{c\text{-}20}$ 内观测点 P_1 和 P_2 均位于背波侧，故而水平幅值比 $M_{c\text{-}40}/M_{c0}$ 和 $M_{c\text{-}20}/M_{c0}$ 低于 M_{c40}/M_{c0} 和 M_{c20}/M_{c0}，例如对于观测点 P_2，在 0～2.5 Hz 频段范围内，$M_{c\text{-}40}/M_{c0}$ 和 $M_{c\text{-}20}/M_{c0}$ 的峰值水平幅值比分别为 1.30 和 1.58，M_{c40}/M_{c0} 和 $M_{c20}/$

M_{c0}的峰值分别为2.12和2.50。此外，与震中区域(L_{c0})地震动相比，其余地表内观测点的震动强弱还与地震波的频率相关，如在地表区域L_{c40}内，当地震波频率为0.5 Hz时，观测点P_3幅值比为0.67，呈现减小趋势，而当地震波频率为1.09 Hz时，观测点P_3幅值比为2.06，呈现放大趋势。

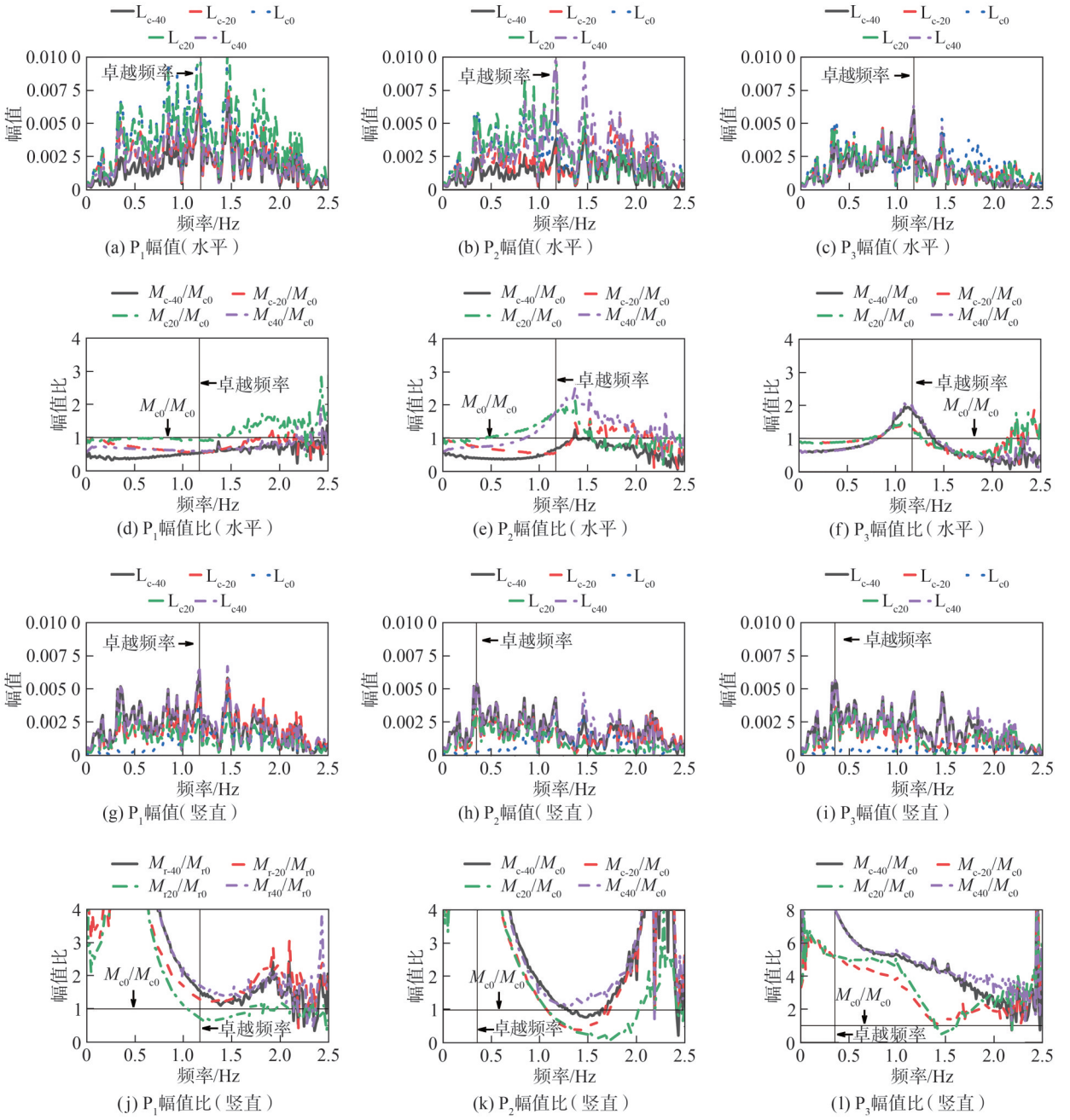


图11 不同区域内河谷地形上不同观测点地震动傅里叶谱及傅里叶谱比

Fig. 11 Fourier spectra and Fourier spectral ratios of ground motion at different observation points on valley topography across various regions

4.3 不同地表区域内组合地形地震动放大效应研究

4.3.1 组合地形分析模型

地形地貌是地球表面自然形态的综合体现，而山脊和河谷作为典型地貌，往往不是孤立存在的。它们相互依存、相互影响，共同构成了复杂多变的山区地形。因此，单独研究山脊或河谷，难以全面揭示其在地形地貌中的真正作用和相互关系。本文重点研究不同地表区域内山脊河谷组合地形的地震响应，模型示意图如图12所示。震源及介质参数同第4.1节。地表划分5个区域，每个区域内均设置山脊河谷组合地形(高60 m、宽100 m的山脊与深60 m、宽100 m的河谷)，其中L_{com-40}、L_{com-20}、L_{com0}、L_{com20}和L_{com40}分别位于震中左侧8.39 km、左侧3.64 km、震中、震中右侧3.64 km和右侧8.39 km。

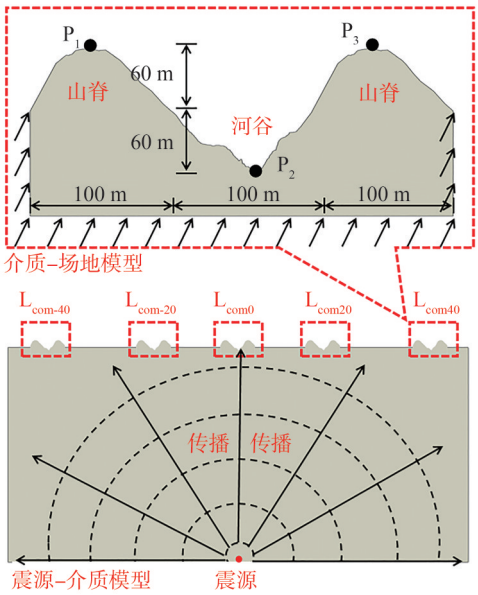


图 12　考虑“震源–介质–场地”的山脊河谷组合地形分析模型示意图

Fig. 12　Schematic diagram of ridge-valley topography analysis model considering “focus–medium–site”

4.3.2　地震动放大系数空间分布

图 13 为不同地表区域内组合地形的地震动放大系数空间分布。对于山脊与河谷的组合地形，其地震动放大系数空间分布特征为山脊地形和河谷地形各自地震动放大系数空间分布特征的结合，即水平地震动放大系数较大值出现在迎波侧与山脊顶部，而竖向地震动较大值出现在山脊顶部的两侧。事实上，这一分布特征反映出组合地形的地震动放大效应与震源的位置存在相关性。

另一方面，由于不同地形之间存在相互影响，从而会改变地表地震动放大系数的取值。以区域 $L_{com\text{-}40}$ 的组合地形为例（图 13（a）），在水平方向上，左侧山脊和右侧山脊顶部的峰值地震动放大系数有所不同，分别为 3.50 和 2.70。此外，根据第 4.1.2 节可知，独立的山脊地形峰值水平地震动放大系数为 2.80。由此可知，河谷地形的存在加剧了右侧山脊地形的地震动放大效应，同时削弱了右侧山脊地形的地震动放大效应。

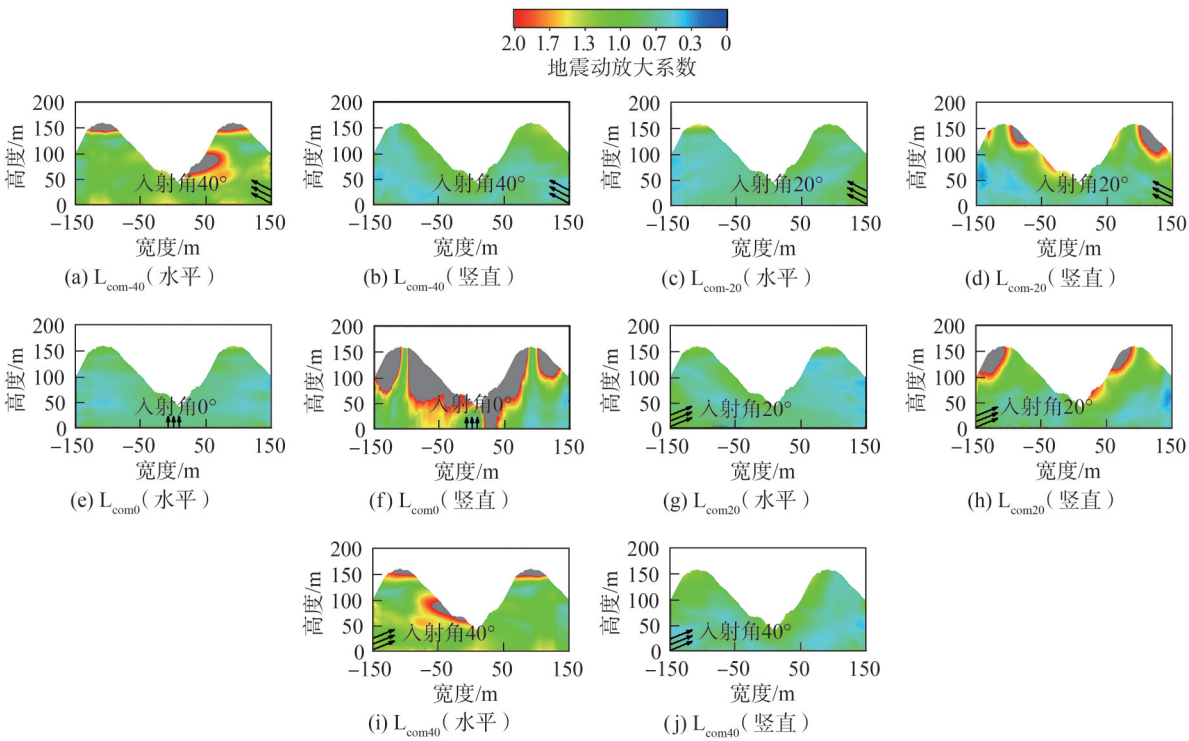


图 13　不同区域内组合地形地震动放大系数空间分布

Fig. 13　Spatial distribution of ground motion amplification coefficients for combined topography in different regions

4.3.3　频谱分析

图 14 为不同区域内组合地形观测点 P_1、P_2 和 P_3 的地震动傅里叶谱及傅里叶谱幅值比。从图 14 可以看出，在 0～2.5 Hz 频段范围内，不同地表区域观测点的地震动频谱曲线趋势基本保持一致，但幅值有所差别。这是由于不同地表区域接收到的地震波及入射角有所差异，从而改变了各观测点的频谱曲线。

从竖直幅值比曲线来看，尽管在 5 个地表区域内，震中区域接收到的地震波最强，但区域 L_{com0} 内地震波（SV 波）为垂直入射，地震动的竖直分量幅值较低，其余地表区域与地表区域 L_{com0} 的幅值比主要呈现放大现象。对于水平幅值比曲线，在 0～2.5 Hz 频段内同时存在放大和削弱现象，且削弱现象主要集中在频率低于 0.5 Hz 范围内。

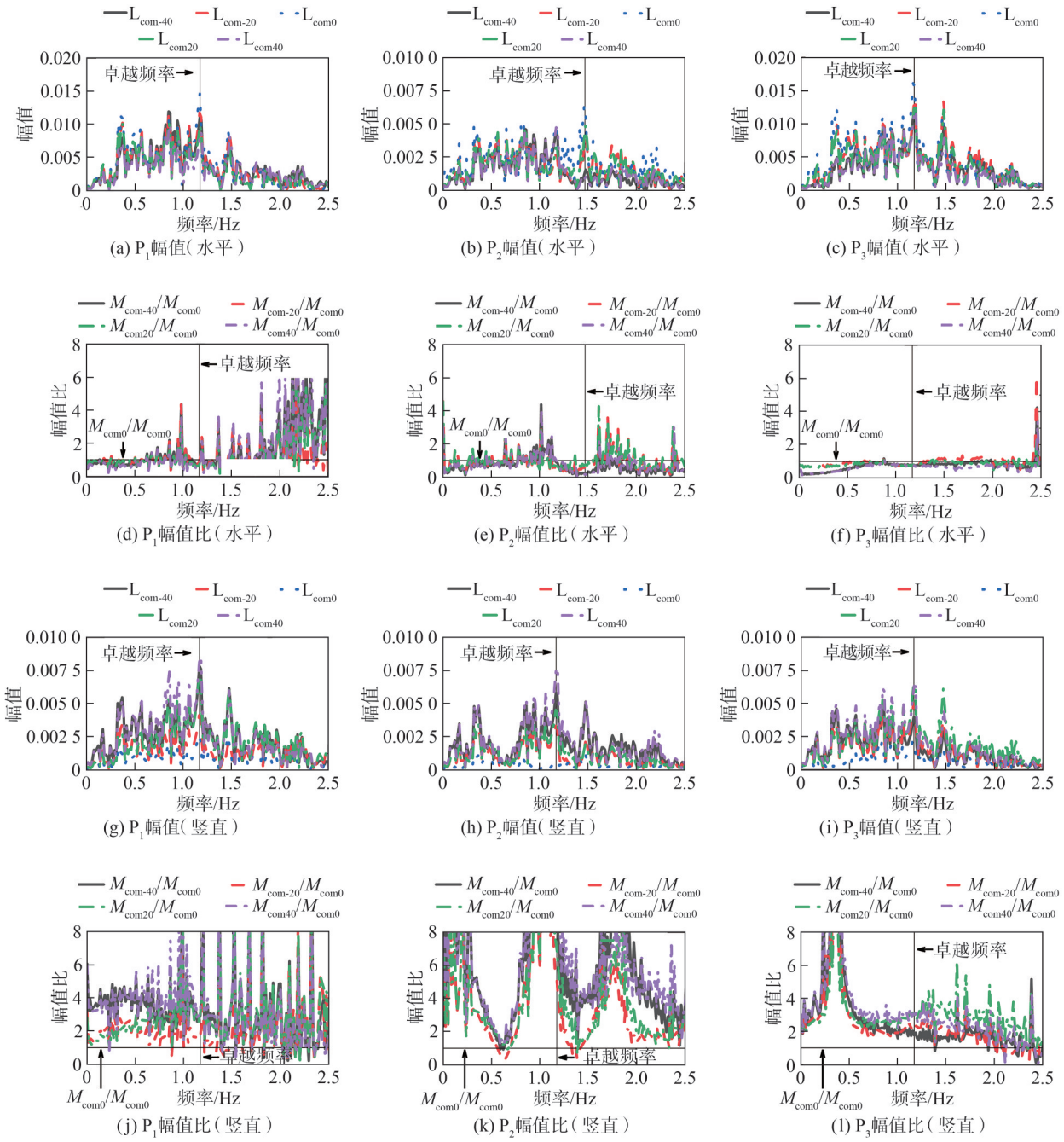


图14 不同区域内组合地形上不同观测点地震动傅里叶谱及傅里叶谱比

Fig. 14 Fourier spectra and Fourier spectral ratios of ground motion at different observation points on combined topography across various regions

5 结 论

地震波传播是一个复杂的过程,其复杂性主要源于震源机制的多样性、传播介质的非均匀性以及地表场地条件的多变性。鉴于此,本文提出了一种考虑“震源–介质–场地”多维度的复杂地形地震动放大效应分析方法,深入探究了山脊、河谷及其组合地形下的地震动放大效应,得出了以下结论:

1)通过将“震源–介质–场地”整体模型拆分为“震源–介质”与“介质–场地”两个独立模型进行精细化分析,可以有效克服整体模型在计算效率上的局限性和精度上的不足,实现更为高效且完善的地震动模拟与评估。

2)“震源–介质”模型与“介质 – 场地”模型捕捉地震波动行为较依赖网格尺寸,地震波频率越高需要的网格间距也将越小,应根据分析需求,确定合适的网格尺寸。

3)在地震波自震源向地表传播的过程中,能量会经

历逐步衰减，这一过程显著影响了不同地表区域所接收到的地震动输入值，进而造成地表运动强度的差异。

4）地表区域与震源的相对位置关系可以直接调控地震波的入射角度，从而显著重塑地表区域内地震动的水平和竖直分量，进一步对地震动的放大效应产生深远影响。

5）“介质–场地”模型边界各个节点的振动时程存在差异，但目前等效节点荷载法忽略了节点之间的振动差异。因此，在后续研究中应改进等效节点荷载法，以实现考虑不同地基节点振动的差异性；

6）当地震波穿越由山脊、河谷等多种地形交织而成的复杂地貌时，其地表地震动放大系数的取值将不再是单一地形条件下简单的叠加，而是多种因素综合作用下的动态调整与变化。

鉴于地震波在实际传播过程中，其介质往往展现出复杂的非均匀性，但本文出于篇幅考量，暂未进行详尽探讨。未来研究工作中，需深入分析非均匀介质对地震波传播的影响机制，以期更全面、准确地揭示地震动放大效应的变化规律。

参考文献：

[1] Hussain E,Kalaycıoğlu S,Milliner C W D,et al.Preconditioning the 2023 Kahramanmaraş(Türkiye) earthquake disaster[J].Nature Reviews Earth & Environment,2023,4(5):287–289.

[2] Yang Zhi,Xiong Feng,Yu Mingjiu,et al.Research on the earthquake disaster area of Jiuzhaigou and the reflection of reconstruction mode[J].China Civil Engineering Journal,2018,51(S2):41–47.[杨植,熊峰,余明玖,等.九寨沟地震灾区调研及重建模式的思考[J].土木工程学报,2018,51(S2):41–47.]

[3] Zhang Libao,Fu Lei,Zhou Zhenghua,et al.Impact of topographic effect on ground motion characteristics in the extreme seismic region of Yangbi M_S6.4 earthquake on May 21,2021[J].Acta Seismologica Sinica,2024,46(1):144–156.[张立宝,傅磊,周正华,等.2021年5月21日漾濞M_S6.4地震极震区地形效应对地震动特性的影响[J].地震学报,2024,46(1):144–156.]

[4] Zhang Shiliang,Ma Qiang,Tao Dongwang,et al.Analysis of site and topography effects using strong motion records of the mainshock and aftershocks from nearby stations[J].Journal of Vibration and Shock,2023,42(21):200–210.[张世亮,马强,陶冬旺,等.应用邻近强震动站点主余震记录的场地及地形效应分析[J].振动与冲击,2023,42(21):200–210.]

[5] Ba Zhenning,Zhao Jingxuan,Zhu Zhihui,et al.3D physics-based ground motion simulation and topography effects of the 05 September 2022 M $W_{6.6}$ Luding earthquake,China[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2023,172:108048.

[6] Xia Kun,Dong Lin,Pu Xiaowu,et al.Earthquake response characteristics of loess tableland[J].Rock and Soil Mechanics,2020,41(1):295–304.[夏坤,董林,蒲小武,等.黄土塬地震动响应特征分析[J].岩土力学,2020,41(1):295–304.]

[7] Xia Kun,Dong Lin,Li Lu.Dynamic response characteristics of loess slopes[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(3):694–701.[夏坤,董林,李璐.黄土斜坡动力响应特征分析[J].地震工程学报,2019,41(3):694–701.]

[8] Huang Dong,Qiao Jianping,Zhang Xiaogang,et al.Experimental research of the topographic effects of slopes in earthquake[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2017,36(3):587–598.[黄栋,乔建平,张小刚,等.堆积层斜坡地震动地形效应试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(3):587–598.]

[9] Zhang Chao,Nie Xuzhi,Xiong Zhongming,et al.Study on the effects of ground motion parameters on the dynamic response of the ground fissures site[J].Earthquake Engineering and Engineering Dynamics,2022,42(5):110–118.[张朝,聂绪致,熊仲明,等.地震动参数对地裂缝场地动力响应的影响规律研究[J].地震工程与工程振动,2022,42(5):110–118.]

[10] Gao Yufeng,Dai Denghui,Zhang Ning.Analytical study on the topographic effect on ground motion of Feitsui canyon[J].Acta Seismologica Sinica,2022,44(1):40–49.[高玉峰,代登辉,张宁.翡翠河谷地震动地形效应解析分析[J].地震学报,2022,44(1):40–49.]

[11] Yang Caihong,Hao Minghui,Zhang Yushan.Analytical solution to the transient response of arc-shaped canyon incident by plane SH wave[J].Acta Seismologica Sinica,2022,44(1):111–122.[杨彩红,郝明辉,张郁山.圆弧形凹陷在SH波入射下瞬态反应的解析解[J].地震学报,2022,44(1):111–122.]

[12] Ding Jialong,Hao Bing,Li Yuandong,et al.Analysis of ground motion characteristics of typical slope terrain[J].Technology for Earthquake Disaster Prevention,2022,17(3):473–480.[丁佳龙,郝冰,李远东,等.典型斜坡地形地震动特征分析[J].震灾防御技术,2022,17(3):473–480.]

[13] Zhao Shixing,Luo Qirui,Zhang Min,et al.Numerical analy-

sis of ground motion amplification coefficient under complex topography[J].Structures,2023,58:105353.

[14] Li Ping,Liu Hongshuai,Bo Jingshan,et al.Effects of river valley topography on anomalously high intensity in the Hanyuan town during the Wenchuan Ms 8.0 earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics,2016,59(1):174–184. [李平,刘红帅,薄景山,等.汶川Ms 8.0地震河谷地形对汉源县城高烈度异常的影响[J].地球物理学报,2016,59(1):174–184.]

[15] Zhang Zhongjie,Yu Haitao,Song Yi,et al.Shaking table tests on topographic effects of circular-arc valleys[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2024,46(5):1102–1111. [张中杰,禹海涛,宋毅,等.圆形河谷地形效应振动台模型试验研究[J].岩土工程学报,2024,46(5):1102–1111.]

[16] Zhang Ning,Pan Jiasuo,Dai Denghui,et al.An analytical solution to the scattering of plane SH waves by a V-shaped canyon with cliffs[J].Chinese Journal of Geophysics,2021,64(3):896–906.[张宁,潘家琐,代登辉,等.含峭壁V形峡谷对地震SH波散射的解析解[J].地球物理学报,2021,64(3):896–906.]

[17] Zhang Xiaolong,Li Xiaojun,Zhou Zhenghua,et al.The seismic response analysis of three-dimensional Canyon complex topography under incident SV seismic waves[J].Chinese Journal of Geophysics,2017,60(7):2779–2790.[章小龙,李小军,周正华,等.三维复杂山谷地形SV波垂直输入地震反应分析[J].地球物理学报,2017,60(7):2779–2790.]

[18] Zhang Chunli,Zhang Wei.Efficient 2D acoustic wave finite-difference numerical simulation in strongly heterogeneous media using the adaptive mesh refinement technique[J]. Geophysics,2022,87(1):T29–T42.

[19] Yin Chen,Luo Wen,Jing Longjiang,et al.Research and application of source location-velocity joint inversion of interference investigation during 3D seismic exploration[J]. Chinese Journal of Geophysics,2024,67(5):1987–1998.[尹陈,罗文,敬龙江,等.震源位置–速度模型联合反演在地震勘探野外干扰源调查中的研究及应用[J].地球物理学报,2024,67(5):1987–1998.]

[20] Zhao Boming,Zhao Tianci,Zhou Yushu.Study on the influence of dislocation unevenness of fault plane on ground co-seismic deformation[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2020,39(12):2517–2529.赵伯明,赵天次,周玉书.断层面位错不均匀性对地表同震变形的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(12):[2517–2529.]

[21] Boore D M.Finite difference methods for seismic wave propagation in heterogeneous materials[J].Methods in computational physics,1972,11:1–37.

[22] Lan Jingyan,Song Xijun,Liu Juan,et al.Study on the variation ground motion amplification effect of medium-hard free fields with depth under earthquake action[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2020,39(S2):3696–3705.[兰景岩,宋锡俊,刘娟,等.地震作用下中硬自由场放大效应随深度的变化规律研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(增刊2):3696–3705.]

[23] Pi Hongmei,Jiang Xianyi,Liu Cai,et al.Three methods of wave equation forward modeling and comparisons[J]. Progress in Geophysics,2009,24(2):391–397.[皮红梅,蒋先艺,刘财,等.波动方程数值模拟的三种方法及对比[J].地球物理学进展,2009,24(2):391–397.]

[24] Bing Qi,Sun Zhangqing,Han Fuxing,et al.Review on the seismic wave ray tracing: methods, classification,developmental present and trend[J].Progress in Geophysics,2020,35(2):536–547.[邴琦,孙章庆,韩复兴,等.地震波射线追踪方法综述:方法、分类、发展现状与趋势[J].地球物理学进展,2020,35(2):536–547.]

[25] Ouyang F,Chen L.Iterative magnetic forward modeling for high susceptibility based on integral equation and gauss fast fourier transform[J].Geophysics,2020,85(1):J1–J13.

[26] Li C, Liu J,Chen B,et al.Optimal third-order symplectic integration modeling of seismic acoustic wave propagation[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2020,110(2):754–762.

[27] Reynolds A C.Boundary conditions for the numerical solution of wave propagation problems[J].Geophysics,1978,43(6):1099–1110.

[28] Sun Zhiliang,Kong Lingwei,Guo Aiguo,et al.Experimental and numerical investigations of the seismic response of a rock-soil mixture deposit slope[J].Environmental Earth Sciences,2019,78(24):716.

[29] Xu Chuwei,Zhang Jianzhong,Li Haiyang.Ray tracing of finite frequency seismic wave based on thinly layered model[J].Progress in Exploration Geophysics,2004(3):182–185.[徐初伟,张建中,李海洋.基于薄层模型的有限频率地震波射线追踪[J].勘探地球物理进展,2004(3):182–185.]

[30] Chapman C H.Generalized ray theory for an inhomogeneous medium[J].Geophysical Journal International,1974,36(3):673–704.

Research on Ground Motion Amplification Effect of Ridge-valley Topography Considering “Focus–Medium–Site”

LUO Qirui[1], *ZHAO Shixing*[1*], *XIONG Feng*[2], *WU Qihong*[3,4], *ZHANG Min*[5]

(1.Sichuan Provincial Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China;

2.College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

3.Sichuan Engineering Research Center for Mechanical Properties and Engineering Technology of Unsaturated Soils, Chengdu 610106, China;

4.Sichuan Provincial Engineering Research Center of City Solid Waste Energy and Building Materials Conversion and Utilization Technology, Chengdu 610106, China;

5.School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract:

Objective The “focus–medium–site” comprehensive analysis method represents a pivotal advancement in the intricate and critical field of seismology, providing a more nuanced approach to understanding and mitigating seismic hazards. Traditional methods of seismic motion analysis typically rely on oversimplifications, overlooking the complex interplay between source characteristics, seismic wave propagation paths, and terrain conditions. This oversimplification can lead to inaccurate seismic hazard assessments, particularly in regions with rugged and varied landscapes, where the topographic influence on seismic waves can be substantial.

Methods The proposed methodology addresses this limitation by meticulously dividing the study of seismic amplification effects into two interconnected models: the “focus–medium” model and the “medium-site” model. This allows for a detailed, focused examination of various aspects of seismic wave behavior, thereby enhancing the accuracy and reliability of seismic hazard assessments. The “focus–medium” model employs the finite difference method (FDM) to solve the wave equation (WE) of the initial generation and propagation of seismic waves from the source. The WE represents a powerful theoretical method for simulating complex physical processes and medium properties, making it ideal for modeling seismic waves. This model captures intricate details, including waveform formation, velocity variations, and how seismic waves evolve as they traverse various geological layers and structures near the epicenter. The FDM can helped provide insights into the dynamic behavior of seismic waves as they propagate through the Earth’s crust, which is crucial for understanding the potential impacts of earthquakes on structures and infrastructure. The “medium–site” model builds upon the insights provided by the “focus–medium” model by incorporating the seismic waves as incident waves into a more localized and terrain-specific environment. This phase of the analysis focuses on the intricate interactions between seismic waves and complex terrain features, such as ridges and valleys and their combination. These interactions can significantly influence the amplification and distribution of seismic wave energy, which in turn can influence damage caused to structures and infrastructure. To accurately capture these interactions, the “medium-site” model integrates advanced technologies. Image recognition technology is utilized to meticulously map and describe terrain features, ensuring a precise representation of the local topography. This is critical for accurately simulating the impact of terrain on seismic wave propagation and amplification. Viscoelastic artificial boundaries are used to simulate the real-world behavior of seismic waves at the model boundaries, including reflection and absorption. This ensures that the simulations are as realistic as possible and therefore provide more accurate results. Furthermore, the equivalent nodal load method is applied to model wave propagation and conversion across complex interfaces.

Results and Discussions The application potential of this integrated method is demonstrated through case studies involving ridges, valleys, and composited terrain configurations. For ridge terrain, the findings reveal that the terrain’s upward slope acts as a natural amplifier, resulting in significant ground motion amplification near the summit. This amplification increases the vulnerability of structures in these areas to damage during earthquakes. Engineers and planners must therefore consider this amplification effect when designing structures in ridge terrain to ensure their resilience and safety. Conversely, valley terrain exerts a shielding effect due to its concave shape, tending to dampen seismic wave energy and reduce amplification. However, valley edge areas can still experience significant amplification due to waveform focusing, where seismic waves converge and intensify. This requires a tailored analysis based on specific terrain characteristics to accurately assess the potential impacts of earthquakes on structures and infrastructure in valley terrain. In composited terrain, the interplay between ridge and valley features produces a more complex pattern of wave propagation and amplification, requiring a more comprehensive analysis that takes into account the specific terrain characteristics and their impact on seismic wave behavior. By incorporating detailed terrain-specific analyses, engineers and planners can develop more accurate earthquake risk assessments and optimize structural designs to minimize potential damage. The “focus–medium–site” comprehensive analysis method offers substantial advantages for seismic design and disaster protection in major engineering projects. For instance, when constructing large-scale infrastructure across complex terrain, such as the Sichuan–Xizang railway and cascade hydropower stations, this method allows engineers to conduct more accurate earthquake risk assessments and optimize structural designs. However, although the vibration time his-

tory at the nodes of the “medium–site” model boundary differs, the equivalent nodal loading method currently ignores the vibration differences between nodes. Therefore, future studies should focus on improving the equivalent nodal loading method to account for the differences in vibration between different foundation nodes.

Conclusions The “focus–medium–site” comprehensive analysis method represents a significant advancement in seismology. By comprehensively accounting for source characteristics, propagation paths, and terrain complexity, this method deepens our understanding of ground motion amplification effects and brings substantial technical progress to earthquake engineering. By providing a robust scientific and technological foundation, the method can contribute to the development of a safer and more sustainable social environment, enhancing the ability to mitigate the devastating impacts of earthquake disasters. With the continued exploration and development of new methodologies in seismology, the pursuit of accuracy and precision in predicting and assessing seismic hazards remains a critical endeavor, one that holds the potential to save countless lives and protect valuable infrastructure. By integrating advanced technologies and adopting a comprehensive approach to seismic analysis, we will continue to drive progress in this critical field, ultimately leading to more resilient and sustainable communities.

Key words: complex topography; amplification effect; “focus–medium” model; “medium–site” model; spectrum analysis

（编辑　张　琼）

引用格式: Luo Qirui, Zhao Shixing, Xiong Feng, et al. Research on ground motion amplification effect of ridge-valley topography considering “focus–medium–site”[J]. Advanced Engineering Sciences, 2026, 58(6): 92–106. [罗麒锐，赵仕兴，熊峰，等. 考虑“震源–介质–场地”的山脊河谷地形地震动放大效应研究[J]. 工程科学与技术, 2026, 58(6): 92–106.]