

DOI: 10.11779/CJGE201702014

# 三维局部场地对地震波的散射 IBIEM-FEM 耦合模拟

刘中宪<sup>1</sup>, 黄磊<sup>1</sup>, 梁建文<sup>2</sup>

(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. 天津大学土木工程系, 天津 300072)

**摘要:** 针对任意三维复杂局部场地对地震波的散射问题, 发展了一种有限元-间接边界积分方程耦合方法(FEM-IBIEM)。其中 IBIEM 利用层状半空间集中荷载动力格林函数, 可精确实现半无限层状介质中波的辐射条件, 同时可大幅度降低计算内存; FEM 可方便处理近地表复杂场地的几何、材料特征。在精度检验基础上, 以三维沉积盆地和山体对地震波的散射为例, 展示了方法对复杂局部场地反应问题的适应性, 同时针对三维盆地效应和山体震动得出了一些有益结论。计算方法可应用于层状无限域中任意不均质体对弹性波的散射求解。

**关键词:** 有限元; 间接边界积分方程法; 耦合方法; 地震波散射

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)02-0301-10

作者简介: 刘中宪(1982-), 男, 教授, 主要从事地震工程和工程波动领域的教学和科研。E-mail: zhongxian1212@163.com。

## FEM -IBIEM coupled method for simulating scattering of seismic waves by 3-D complex local site

LIU Zhong-xian<sup>1,2</sup>, HUANG Lei<sup>1</sup>, LIANG Jian-wen<sup>2</sup>

(1. Tianjin Key Laboratory of Civil Structure Protection and Reinforcement, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

2. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** A hybrid technique, FEM-IBIEM is developed for studying the scattering of seismic waves by a 3-D complex local site. The indirect boundary integral equation method (IBIEM) adopts the dynamic Green's functions of concentrated loads for a layered half-space. It can accurately satisfy the radiation condition of waves in semi-infinite layered media and greatly reduce the computational memory. For the local site with complex materials and geometric features, FEM is more convenient. Based on accuracy tests and taking the seismic wave scattering resulting from 3-D sedimentary basins and mountains as the example, the adaptability of the proposed method for the seismic response in the complex local site is conformed, and several beneficial conclusions about the 3-D sedimentary basin effects and mountain vibration are drawn. This method can be used for studying the scattering of elastic waves by arbitrary inhomogeneous site in layered half-space.

**Key words:** finite element method; indirect boundary integral equation method; coupled method; seismic wave scattering

## 0 引言

国内外震害经验及理论研究表明, 局部场地(包括峡谷、陡坎、山体、河谷、盆地等)是决定地震动特性的关键因素之一。地震波在传播过程中, 局部场地作为不均匀散射体, 会使地震波发生复杂的散射(衍射)、波型转换及相干作用, 最终使地震动产生局部放大或缩幅效应。场地效应精细评估对于城市区划、地震小区划及重大工程抗震设计等均具有重要意义。计算方法可采用数值法与解析法, 其中解析法主要指波函数展开法<sup>[1-4]</sup>, 数值法包括有限元法<sup>[5-8]</sup>、有限差分法<sup>[9-10]</sup>、边界单元法<sup>[11-12]</sup>、间接边界积分方程法<sup>[13-14]</sup>、有限元-边界元(边界积分方程)耦合法<sup>[15-16]</sup>等。

数值方法中, 域离散型的有限元法和有限差分法

对于处理实际场地复杂的几何、材料特性具有优势, 但是为满足无限地基 Sommerfeld 辐射条件, 需要引入人工边界。人工边界通常可分为局部型和全局型两类, 前者包括黏性边界<sup>[17]</sup>、黏弹性边界<sup>[18]</sup>、廖氏边界<sup>[19]</sup>、旁轴近似边界<sup>[20]</sup>等, 其优势在于计算上的简易和高效, 但这些人工边界的局部解耦特性是建立在对近域波场的某种理想化假设基础之上, 如黏性边界的平面波假定、黏弹性边界条件的单源柱面波或球面波假设, 因而对于局部场地附近地震波复杂的衍射效应难以给出精确的描述。全局型边界可精确考虑不同节点间波

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278327); 天津市应用基础与前沿研究计划项目(14JCYBJC21900, 13JCZDJC35500)

收稿日期: 2015-11-27

动状态的耦合，虽然计算量较大，但目前计算机硬件的快速发展为精确型人工边界的实现铺平了道路。

相比域离散型方法，对于无限域空间波动问题，边界型方法如边界元、Treffz 方法、积分方程法等具有独特优势：降低问题求解维数、精确满足无限远辐射条件、对应力和位移具有同阶精度等。但边界型方法对于弹塑性问题一般也需进行内域离散，因此会降低其降维的优势，另外对于近地表强不均匀介质、各向异性介质波动问题的处理还不够成熟。

本文针对开放域中近地表复杂局部场地三维地震响应问题，发展一种有限元-边界积分方程法耦合方法（FEM-IBIEM），并基于 Intel-Fortran 编译平台开发了相应的计算程序。该方法可充分发挥有限元对于近地表复杂介质较强适用性，同时利用 IBIEM 实现了对远场波动状态的精确模拟。方法方面的创新性在于：IBIEM 模拟仅需在 FEM-IBIEM 交界面上进行配点离散，因此在两种方法的协调性处理上比较简易；另外采用层状半空间集中荷载动力格林函数，对于外部层状无限域可实现精确模拟，而以往耦合方法对外部介质大多基于均质半空间假定。

## 1 计算模型

如图所示，层状半无限空间中夹杂一任意形状三维局部不规则场地。考虑平面波从基岩半空间中入射，在近地表局部场地表面将发生散射。外部半空间采用 IBIEM 模拟，各土层介质假设为均匀各向同性且层内不变。局部复杂场地采用 FEM 模拟，可处理任意复杂地形和地质状态，如山谷、盆地、坡地、夹杂等，介质可采用各向同性或各向异性假定。由于本文方法是基于频域推导，采用黏弹性介质模型，并应用复阻尼理论考虑材料阻尼。设  $\lambda$ 、 $\mu$  为介质的两个拉梅常数， $\zeta$  为材料阻尼系数，则复模量取  $\bar{\lambda} = \lambda(1+2\zeta i)$  和  $\bar{\mu} = \mu(1+2\zeta i)$ ，相应的波速和波数取复波速。本文暂限于频域分析，时域结果可以由此通过简单的傅里叶变换获得。

假定入射波为平面 P、SV 波和 Rayleigh 波（如图 1）。稳态波传播的运动方程可表示为

$$(\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} + \mu \nabla^2 \mathbf{u} = -\rho \omega^2 \mathbf{u}, \quad (1)$$

式中， $\mathbf{u}$  表示位移矢量， $\rho$  为密度， $\omega$  为入射波圆频率。

## 2 计算方法

首先利用有限元法与间接边界积分方程法对局部复杂场地及外部层状半空间的波动状态进行模拟，然后利用局部场地与外部半空间在边界上的位移、应力

连续性条件，进行边界耦合。

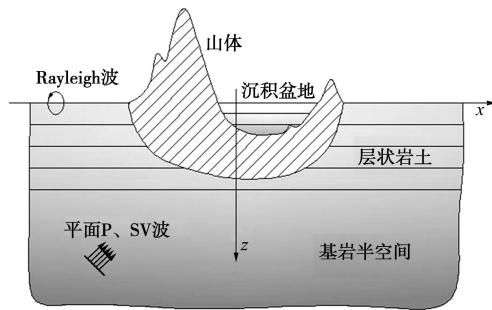


图 1 三维局部不规则场地对地震波的散射计算模型

Fig. 1 Numerical model for seismic wave scattering around 3-D alluvial basin

### 2.1 三维局部场地内部波场有限元法模拟

首先将近地表复杂局部场地区域离散化为有限元模型，可采用四面体或六面体网格进行划分，其中四面体单元对于复杂几何特征适应性更好。每个单元的运动方程可表示为

$$K_e^* u_e - \omega^2 M_e u_e = r_e \quad (x \in DI), \quad (2)$$

式中， $K_e^*$ 、 $M_e$  为三维体单元刚度矩阵和单元质量矩阵， $r_e$  表示单元表面牵引力矢量， $u_e$  为节点位移。

等效节点力  $r_e$  可表示为

$$r_e = R_e \sigma_e, \quad (3)$$

式中， $R_e$  为等效转换矩阵。

因此，运动方程可以写成如下形式：

$$K_e u_e = R_e \sigma_e \quad (x \in DI), \quad (4)$$

式中，频域刚度矩阵  $K_e$  定义为

$$K_e = K_e^* - \omega^2 M_e. \quad (5)$$

由各单元刚度、质量矩阵可组装得到总的刚度、质量矩阵，总运动方程可写为

$$Ku = R\sigma \quad (x \in DI). \quad (6)$$

近地表复杂场地域离散节点可分为内部点和交界面上的边界点，式 (6) 可写成

$$\begin{bmatrix} K_{II} & K_{IB} \\ K_{BI} & K_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{II} \\ u_{BB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{II} & R_{IB} \\ R_{BI} & R_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{II} \\ \sigma_{BB} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

由于地震波输入时， $DI$  内部的点不受外荷载牵引力，只有边界  $B$  上的点受外荷载牵引力的作用，所以  $R_{II}=R_{BI}=R_{IB}=0$ ，总运动方程可写为

$$(-K_{BI} K_{II}^{-1} K_{IB} + K_{BB}) u_{BB} = R_{BB} \sigma_{BB}. \quad (8)$$

这样通过式 (7)，即把边界  $B$  上的牵引力与节点位移联系起来<sup>[16]</sup>。

### 2.2 外部层状半空间间接边界积分方程法模拟

外部域基于层状半空间动力格林函数，采用修正刚度矩阵法进行求解。以往的边界元或积分方程法求解过程中，一个共同存在的问题是当荷载和接收点位置接近或者位于同一水平面时，格林函数收敛很慢甚

至难以收敛, 而近源反应的精确求解对很多领域的研究特别是边界元方法的实施是至关重要的。本文采用修正刚度矩阵法求解格林函数, 解决了当接收点和源点作用于水平面接近时异常积分收敛问题, 尤其适合大量不同点位集中荷载近源求解, 并且可以精确模拟层状半空间场地。

在数值计算中, 首先对交界面  $S$  离散为  $N$  个点, 虚拟波源面  $S_1$  离散为  $N_1$  个点。外部层状半空间中散射波引起的位移场和应力场可分别表示为

$$u_i^s(x_n) = \sum_{n=1}^{N_1} b_{n1} G_{i,1}^{(s)}(x_n, x_{n1}) + c_{n1} G_{i,2}^{(s)}(x_n, x_{n1}) + d_{n1} G_{i,3}^{(s)}(x_n, x_{n1}), \quad (9a)$$

$$\sigma_{ij}^s(x_n) = \sum_{n=1}^{N_1} b_{n1} T_{ij,1}^{(s)}(x_n, x_{n1}) + c_{n1} T_{ij,2}^{(s)}(x_n, x_{n1}) + d_{n1} T_{ij,3}^{(s)}(x_n, x_{n1}) \quad (9b)$$

$$(x_n \in S, x_{n1} \in S_1; n=1, \dots, N; n1=1, \dots, N1),$$

式中,  $b_{n1}$ ,  $c_{n1}$ ,  $d_{n1}$  分别为虚拟源面  $S_1$  上第  $n_1$  个离散点处  $x$ ,  $y$  和  $z$  方向的集中荷载密度。  $G_{i,l}^{(s)}(x_n, x_{n1})$ ,  $T_{ij,l}^{(s)}(x_n, x_{n1})$  分别表示外部层状半空间内位移、应力格林函数。

总的位移场与应力场可表示为

$$u = u^f + G_u A, \quad (10a)$$

$$\sigma = \sigma^f + G_t A, \quad (10b)$$

式中,  $u^f$ ,  $\sigma^f$  分别表示平面波入射下自由场位移和应力。该自由场根据外部介质状态采用均质半空间或层状半空间模型进行计算。对于后者, 可参考 Wolf<sup>[21]</sup> 或梁建文等<sup>[22]</sup>提出的方法。

采用修正刚度矩阵法求解格林函数, 基本求解思路如图 2 所示: ①首先借助波数域内径向 Hankel 变换和周向 Fourier 变换, 计算各层动力刚度矩阵, 然后集整得到整体刚度矩阵; ②进而固定荷载所在土层的上下表面, 在波数域内求解“固定端”反力。该反力可通过特解和齐解的叠加得到。这里特解表示全空间中荷载作用于土面上的反力, 齐解表示为满足土层“固定”条件在土面上反向施加特解位移所需要的外力; ③

然后放松该“固定面”, 采用刚度矩阵法即得到各层表面上的位移; ④由各层表面位移, 通过转换矩阵, 容易得到层内各点的动力响应, 荷载作用层内的反应则需叠加“固定层”内的解。具体求解过程见文献[23]。

### 2.3 边界耦合分析

由于采用层状半空间动力格林函数, 自由地表及地层交界面边界条件自动满足, 故只需考虑局部复杂场地和外部层状半空间交界面上的连续性条件。边界条件为

$$\begin{cases} u_x^s = u_x^r, \\ u_y^s = u_y^r, \\ u_z^s = u_z^r. \end{cases} \quad (11a)$$

$$\begin{cases} \sigma_x^s = \sigma_x^r, \\ \sigma_y^s = \sigma_y^r, \\ \sigma_z^s = \sigma_z^r. \end{cases} \quad (11b)$$

式中,  $u$  和  $\sigma$  由式(9)、(10)确定, 将式(11)替换后代入式(8)得

$$L(u^f + G_u A) = R_{BB}(\sigma^f + G_t A). \quad (12)$$

最后的结果可以写为

$$GA = f, \quad (13)$$

$$\text{式中, } f = R_{BB}\sigma^f - Lu^f, \quad G = LG_u - R_{BB}G_t.$$

对式(13)进行最小二乘法可得到虚拟波源密度, 进而由式(7)可得到局部任意形状场地节点位移, 由式(10a)、(10b)可得到外部层状半空间各点的位移和应力。

### 3 计算实施

本文方法通过在交界面附近的虚拟波源面上施加虚拟集中荷载来构造散射波场, 以交界面上离散点位的连续性边界条件建立方程求解。基本解采用层状半空间集中荷载动力格林函数, 相比全域格林函数, 该格林函数计算公式虽然形式较为复杂, 但求解时不需要

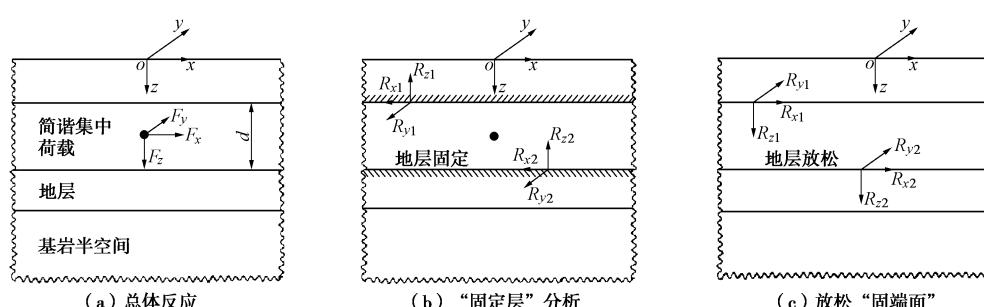


图 2 层状半空间集中荷载动力函数刚度矩阵法求解

Fig. 2 Solution of Green's function of harmonic concentrated force source by direct stiffness method

离散地表面、不均匀地层的水平交界面，因而不存在边界截断问题，同时也大幅度降低了计算自由度，提高 IBIEM 求解层状介质中弹性波散射问题的效率和精度。本文借助 ANSYS 软件建立模型，局部场地采用四面体划分网格，一个波长内划分 8~10 个单元，对于高频波入射适当增加单元数。通过 APDL 语言将节点坐标导出，单元刚度及质量矩阵通过自编程计算获得。

另外，本文 IBIEM 方法中虚拟波源面的引入，避免了波源作用在沉积边界时带来的奇异性，但是也相应产生了一个新问题，即需对虚拟波源位置进行合理的控制。研究表明，一般情况下，虚拟波源面  $S_1$  半径可取为  $0.4R_0 \sim 0.6R_0$  ( $R_0$  为散射体等效半径) 之间，波源点数可取为交界面离散点数的 0.5~0.8 倍左右，即可保证很高的计算精度。对于高频入射情况，则应适当增大虚拟波源面半径，可取值  $0.7R_0 \sim 0.9R_0$  倍左右。

对于大尺度局部场地计算，需在外部阻抗矩阵 IBIEM 求解、有限元刚度矩阵与质量矩阵求解过程中采用并行算法，可最大限度利用现在先进的计算机硬件，大幅度提高计算效率。

## 4 方法验证

为验证本文方法的数值精度，图 3 (a) 给出了本文结果与 Sánchez-Sesma<sup>[24]</sup>给出的垂直入射 P 波在均匀半球形盆地内的散射结果对比。计算参数为：沉积内外介质剪切模量比  $G_s^v/G_s^r = 3/10$ ，密度比  $\rho^v/\rho^r = 0.6$ 。半空间泊松比为 0.25，沉积内部泊松比 0.3，入射频率  $\eta = \omega a/\pi c_s = 0.5$ 。从图中可以看出本文结果与该文献结果吻合良好，从一个方面验证了本文方法的精度。图 3 (b) 给出了本文结果与 Mossenessian 等<sup>[14]</sup>给出的均匀弹性半空间中半球形沉积盆地对弹性波散射结果的对比。计算参数为：半空间泊松比为 1/3，黏滞阻尼比为 0.005，入射频率  $\omega a/\pi c_s = 0.75$ ，沉积内外介质剪切波速比  $c_s^v/c_s^r = 0.5$ ，密度比  $\rho^v/\rho^r = 2/3$ 。从图中可以看出本文结果与该文献结果吻合良好。需指出的是，文献方法适宜于求解半空间中均匀沉积盆地对地震波的散射，而本文方法对近地表任意复杂场地三维波动问题是适用的。

## 5 算例分析

### 5.1 弹性半空间三维沉积盆地对入射平面 P、SV 和 Rayleigh 波的散射

利用上述方法，针对弹性半空间沉积盆地对地震波的散射进行求解。考虑沉积介质波速沿深度线性变化，如图 4 所示， $c_{se}$  自地表到沉积底部按 300~800

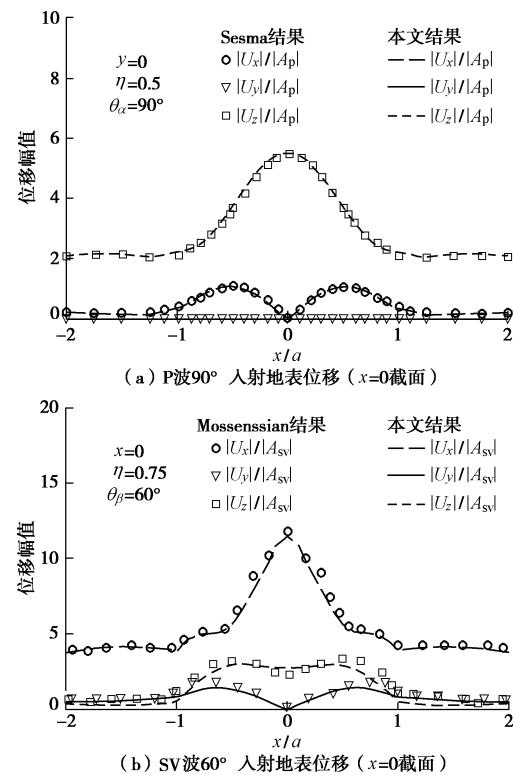
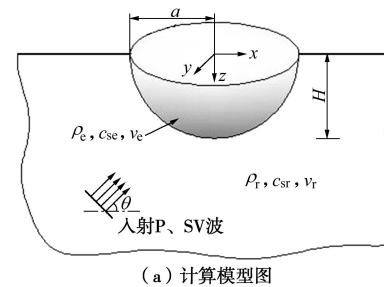


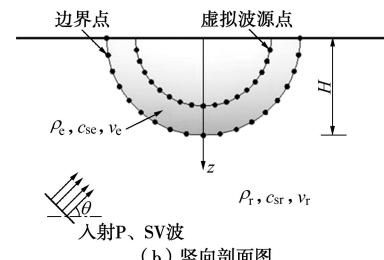
图 3 P、SV 入射半空间中半球形沉积盆地地表位移幅值

Fig. 3 Amplitudes of surface displacement of a hemisphere

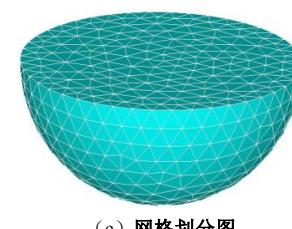
alluvial basin in homogeneous half-space for incident P and SV waves



(a) 计算模型图



(b) 坚向剖面图



(c) 网格划分图

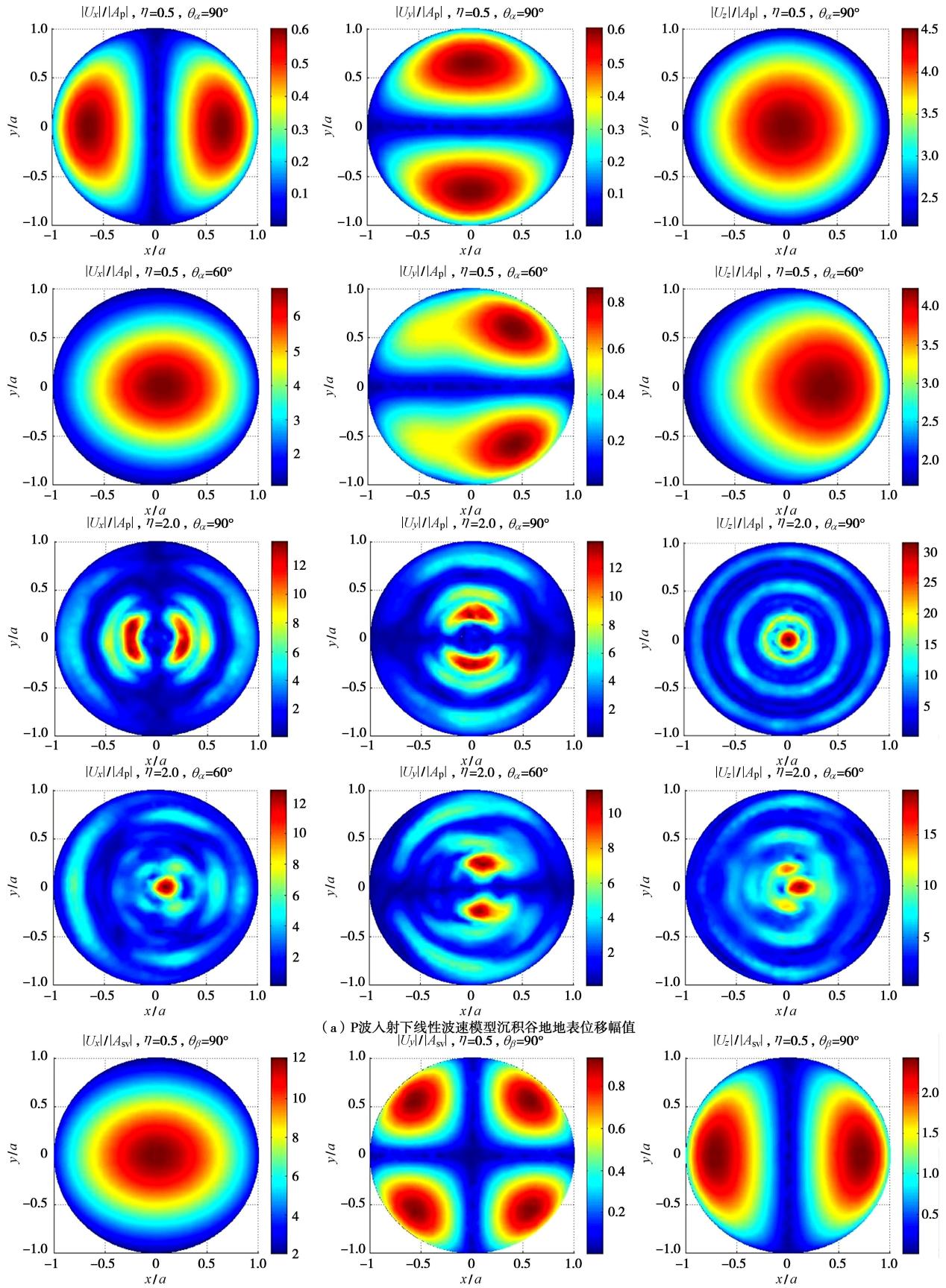
图 4 数值计算模型、竖向剖面图及半球沉积网格划分图

Fig. 4 Model for numerical stability verification, vertical section and grid of hemisphere

(m/s)递增,  $c_r$ 取1000 m/s。沉积内外密度比 $\rho_e/\rho_r=2/3$ , 介质泊松比分别为0.3和0.25, 黏滞阻尼比为0.01。设入射P, SV波和y轴的夹角余弦 $l_y=0$ , 和z轴的夹角分别取 $\theta_\alpha$ ,  $\theta_\beta=90^\circ$  (垂直),  $60^\circ$ ; 无

量纲频率取 $\eta=0.5, 2.0$ 。

图5给出了不同频率P, SV和Rayleigh波作用下, 沉积盆地内部地表三向位移幅值云图( $x, y \in [-H, H]$ )。总体结果表明, 由于面波转换现象, 盆地边缘



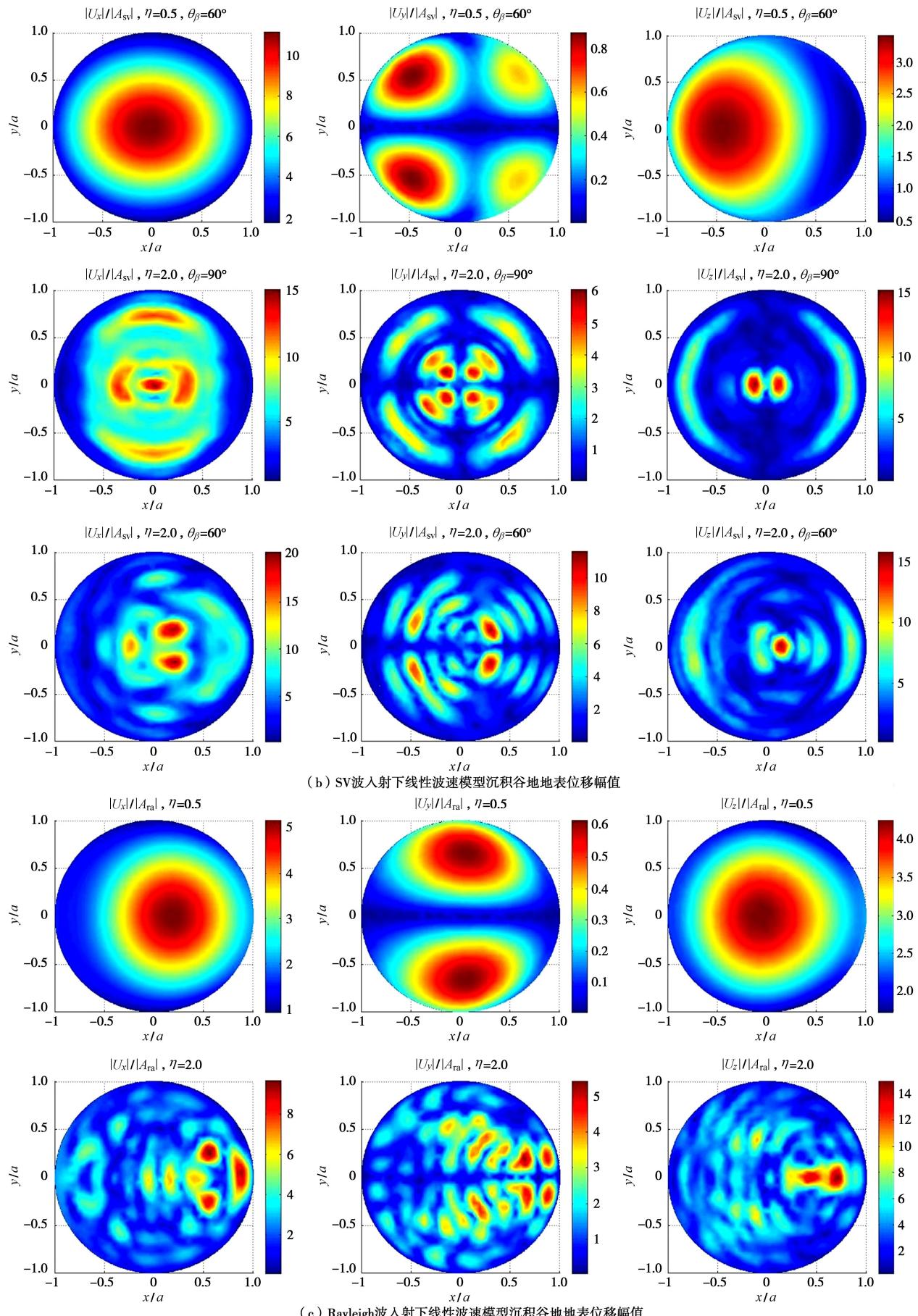


图 5 P、SV 和 Rayleigh 波入射下线性波速模型沉积谷地地表位移幅值

Fig. 5 Amplitudes of surface displacement around alluvial valley with linear wave velocity model for incident P, SV and Rayleigh waves

地震动较为强烈。与均质模型相比, 总体来说, 剪切波速线性变化的沉积盆地, 地表位移放大效应更为显著, 沉积内部位移空间变化更为剧烈。例如  $\eta=2.0$  情况, P 波垂直入射下, 沉积盆地地表水平和竖向位移幅值分别达到 13.6 和 31.0, 约为均匀沉积情况的 3.5 和 3.7 倍(限于篇幅未给出均质情况具体结果)。这一现象可能主要源于波速线性变化沉积盆地地表存在软弱层, 而下部地层阻抗较大, 更多的能量被截留在近地表软弱沉积层中。因此考虑实际场地波速结构进行建模分析是十分必要的。

考虑入射角度变化, 当 P、SV 波以  $60^\circ$  角斜入射时, 散射聚焦区域明显偏移。对于 P 波, 主方向地表最大位移峰值一般出现在垂直入射情况; 对于 SV 波, 总体来看, 斜入射时的地表位移峰值要大于垂直入射。考虑入射波频率变化, 当入射波无量纲频率较小 ( $\eta=0.5$ ) 时, 盆地的散射作用不太明显。随着入射波频率增大, 地表位移空间分布逐渐变得复杂。对于低频波, 散射波聚焦区域较大。随着频率增高, 对于 P、SV 波聚焦区域减小且集中于盆地中心区域附近。

对于 Rayleigh 波入射, 沉积盆地内部同样出现显著的放大效应。 $\eta=2.0$  较高频率波入射下, 由于高频波的相干效应更为显著, 沉积盆地内部会出现多个位移聚焦区域, 位移峰值达到 14.2, 另外在盆地内部出现多个驻波区域。因此实际工程抗震设计中, 尤需对高频地震波入射下沉积盆地位移放大效应进行科学评估。

## 5.2 弹性层状半空间中三维沉积盆地对入射平面 P、SV 波的散射

考虑实际中沉积盆地内外介质波速均沿深度变化, 计算模型如图 6 所示。图 7 给出了层状半空间中沉积盆地地表位移幅值。沉积外部参数取值: 假设为四层, 各层厚度  $h_1/H = h_4/H = 0.2$ ,  $h_2/H = h_3/H = 0.3$ , 泊松比  $\nu_1 = \nu_2 = \nu_3 = \nu_4 = \nu_r = 0.25$ ,  $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \rho_4 = \rho_r$ , 剪切波速  $c_{s1} = 600$  m/s,  $c_{s2} = 800$  m/s,  $c_{s3} = 900$  m/s,  $c_{s4} = c_{sr} = 1000$  m/s。沉积盆地内部参数取值:  $\nu_e = 0.3$ , 密度比  $\rho_e/\rho_r = 2/3$ , 剪切波速比  $c_{se}$  自上而下由  $300\sim800$  m/s 线性变化。黏滞阻尼比均为 0.01, 无量纲频率取  $\eta = \omega a/\pi c_{sr} = 0.5, 2.0$ 。

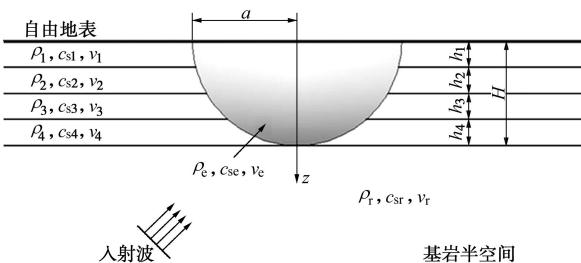


图 6 三维层状基岩中埋置半球形线性沉积盆地计算模型  
Fig. 6 Numerical model for a layered hemispherical alluvial basin in 3-D layered rock

从图 7 可以看出, 低频  $\eta=0.5$  时, 外部采用层状半空间模型和均匀半空间模型, 对盆地内部位移幅值影响不大。随频率增大, 当  $\eta=2.0$  时, 两种模型位移反应差异变大, 如 P 波入射, 竖向位移幅值在均匀土层中约为 32.0, 而在层状土层中为 22.0, 如 SV 波入射, 水平位移幅值在均匀土层中约为 14.6, 而在层状土层中为 9.9, 即外部波速模型对高频位移反应的影响不可忽略。这是由于低频情况, 波长较长, 外部近地表层的刚度变化对散射效应影响较小; 而高频情况, 波长较短, 地震波对局部土层波速变化更为敏感。本算例层状模型与单一土层相比, 沉积内外刚度比有所增大, 地表位移幅值有所降低。另外, 还可发现, 外部为层状介质时, 盆地外部地表位移空间振荡更为剧烈, 位移幅值同样有一定的放大效应。因此, 盆地外部半空间中的介质波速如果沿深度变化明显, 则宜采用层状半空间模型来更好地模拟盆地内外高频波散射状态。而本文耦合方法容易精细地实现该模型。

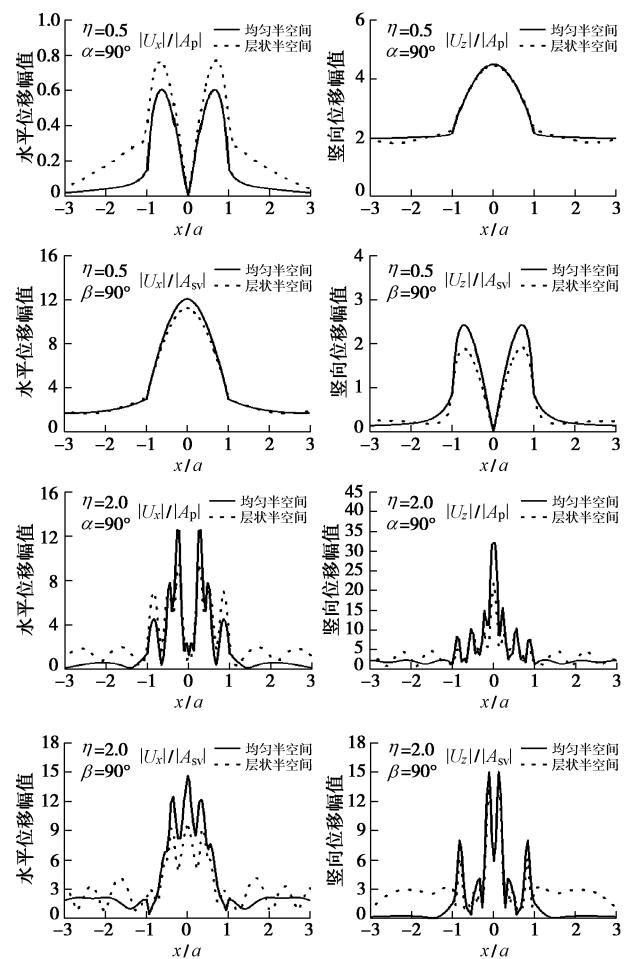


图 7 P、SV 波入射下均匀半空间与层状半空间沉积盆地地表位移幅值  
Fig. 7 Amplitudes of surface displacement of a alluvial basin with homogeneous half-space or layered half-space for incident P and SV waves

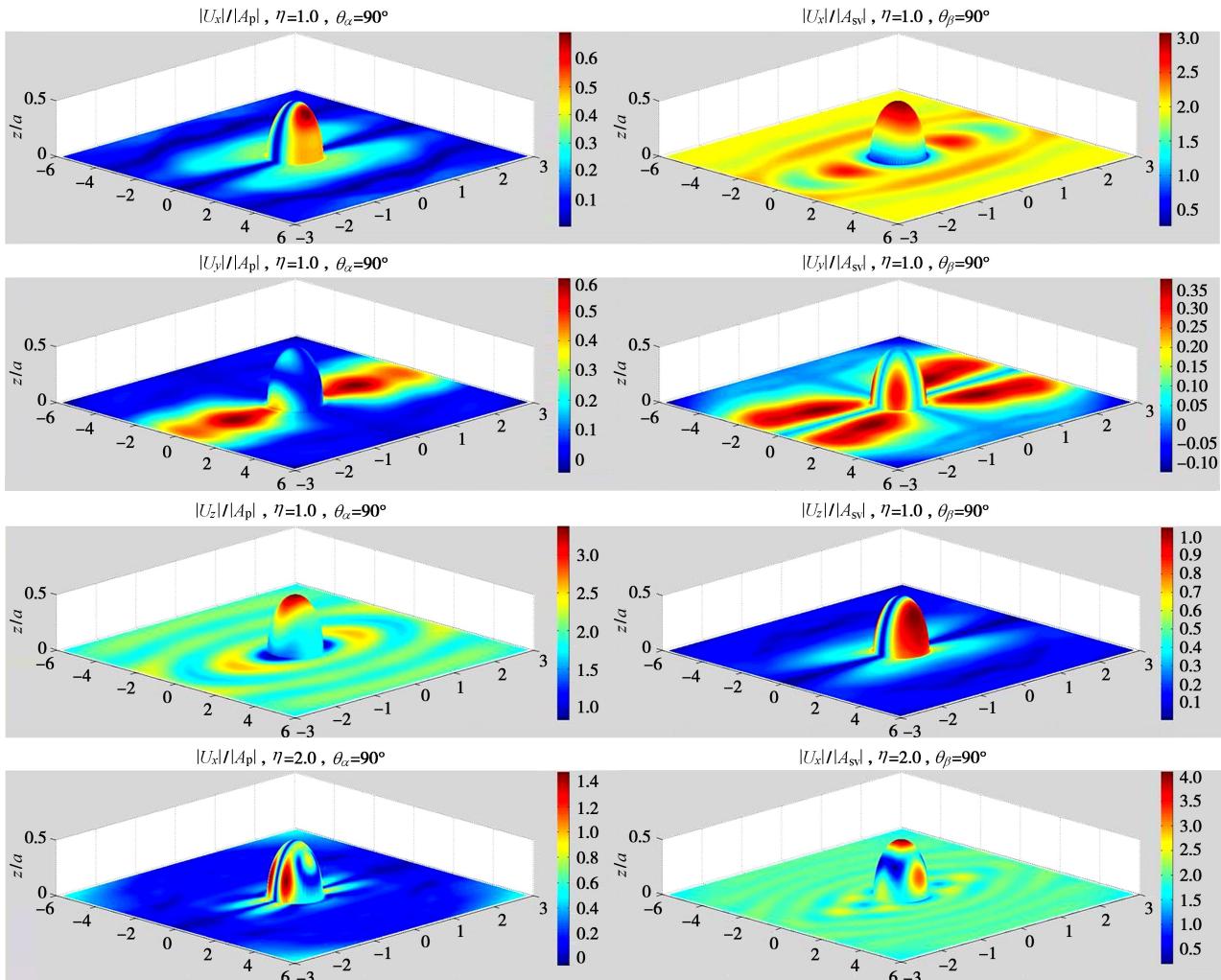
### 5.3 弹性半空间不同材料阻尼三维沉积盆地对入射平面 P、SV 波的散射

考虑沉积土层材料阻尼变化,本文分别计算了滞回阻尼比  $\zeta=0.01, 0.02$  和  $0.05$  情况下三维半球形沉积盆地表面位移幅值(外部材料阻尼系数为  $0.01$  保持不变)。无量纲频率取  $\eta=0.5, 2.0$ 。

对比结果可得出,由于岩土介质阻尼消耗震动能,随着阻尼增大,位移幅值峰值逐渐降低。而且频率越高,阻尼对位移幅值的影响越大。另外,阻尼增大对位移空间分布特征影响不大,沉积盆地内部阻尼系数变化对外部地震响应的影响基本可以忽略。(由于受篇幅限制,不同阻尼的对比结果未列出)

### 5.4 弹性半空间三维均质椭球山体对入射平面 P、SV 波的散射

图 8 给出了三维半空间均质椭球形山体( $\frac{x^2}{a} + \frac{y^2}{b} + \frac{z^2}{c} = 1$ , 其中  $b/a = 0.5, c/a = 0.5$ ),在 P、SV 波作用下,考虑不同入射波频率情况( $\eta=1.0, 2.0$ ), $x, y, z$  向地表位移幅值云图( $x/a \in [-6, 6]$ )。沉积内外密度比为 1, 介质泊松比为 0.3, 设入射 P、SV 波和  $y$  轴的夹角余弦  $l_y = 0$ , 波入射角度分别取  $\theta_\alpha$ ,



$$\theta_\beta = 90^\circ$$

从图中可以看出,P 波垂直入射下,频率较低( $\eta=1.0$ )时, $z$  向最大位移集中在山顶区域,且位移幅值由山顶向山脚逐渐降低,次方向  $x, y$  向最大位移幅值出现在山体边缘。入射频率较高时( $\eta=2.0$ ),山体顶部及山腰处位移放大均十分显著(峰值超过 4.0)。该结果同文献[25]中“山顶运动较自由场地面放大 100%~400%”一致。山体坡面上位移分布较为复杂,呈现非单调变化;山体坡面上  $x, y$  向位移同样放大明显,特别是在较陡的坡面上(沿  $y$  向一侧),由于山体边缘波型转换效应,山腰处  $y$  向位移幅值达到 3.5,因此对于实际中高陡山坡的侧向地震动放大需要加以注意。

对于 SV 波垂直入射,入射频率较低时( $\eta=1.0$ ),入射波主要激起山体的一阶振型,主方向  $x$  向位移从山脚到山顶逐渐增大,峰值达到 3.0,同时  $x$  向坡面上竖向位移也有一定放大,达到 1.0。入射频率较高时( $\eta=2.0$ ),山体高阶振型参与加大,  $x$  向位移从山脚到山顶非单调变化,顶部峰值超过 4.0,山腰上出现“波节”,同时  $y$  向坡面上  $y$  向位移幅值达到 2.4。因此在

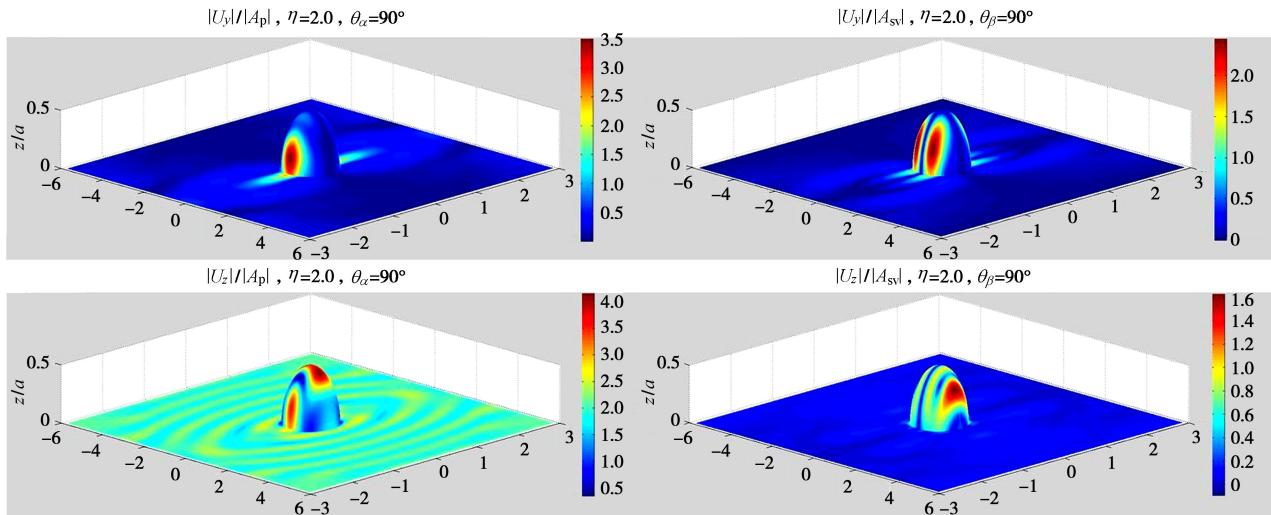


图 8 P, SV 波入射下均质椭球山体地表位移幅值

Fig. 8 Amplitudes of surface displacement around homogeneous ellipsoid mountain for incident P and SV waves

实际工程中, 需根据入射波型、入射波频率和山体本身的几何、材料特征对山体地震动效应进行科学评估, 为山体区域城市规划和工程抗震设防提供依据。

## 6 结语

针对开放域中复杂局部场地对地震波的散射问题, 本文充分发挥间接边界积分方程法与有限元法各自优势, 发展了一种高精度 FEM-IBIEM 耦合算法。方法实现了对半无限层状空间(外域)辐射条件的精确满足和对近地表复杂地形或地质条件的精细刻画。对于外域 IBIEM 模拟中格林函数求解, 本文基于位势函数理论, 通过 Hankel 积分变换, 采用修正刚度矩阵法求解, 很好地解决了当源点和接收点位于相同或接近的水平面上时的积分收敛问题。

在精度检验的基础上, 本文以三维不均匀沉积盆地和均质山体地震响应为例, 进行了简单的数值分析。结果表明: ①局部场地地震响应显著依赖于入射波的角度和频率、散射体的形状和材料特征。②沉积盆地内部介质波速沿深度变化对盆地内部位移幅值影响显著; 高频情况外部介质波速沿深度变化对盆地内地震反应特征影响显著; 盆地内部介质阻尼对盆地高频放大效应具有显著的降幅作用。

## 参考文献:

- [1] TRIFUNAC M D. Surface motion of a semi-cylindrical alluvial valley for incident plane SH waves[J]. Bull Seism Soc Am, 1971, **61**: 1755–1770.
- [2] YUAN X M, LIAO Z P. Scattering of plane SH waves by a cylindrical alluvial valley of circular-arc cross-section[J]. Earthquake Eng Struct Dyn, 1995, **24**(10): 1303–1313.
- [3] 梁建文, 张秋红, 李方杰. 浅圆沉积谷地对瑞雷波的散射 ——高频解[J]. 地震学报, 2006, **28**(2): 176–182. (LIANG Jian-wen, ZHANG Qiu-hong, LI Fang-jie. Scattering of Rayleigh waves by a shallow circular alluvial valley: high-frequency solution[J]. Acta Seismologica Sinica, 2006, **28**(2): 176–182. (in Chinese))
- [4] 赵成刚, 韩 靖. 半球形饱和土沉积谷场地对入射平面 Rayleigh 波的三维散射问题的解析解[J]. 地球物理学报, 2007, **50**(3): 905–914. (ZHAO Cheng-gang, HAN Zheng. Three-dimensional scattering and diffraction of plane Rayleigh-waves by a hemispherical alluvial valley with saturated soil deposit[J]. Chinese J Geophys, 2007, **50**(3): 905–914. (in Chinese))
- [5] 周国良, 李小军, 侯春林, 等. SV 波入射下河谷地形地震动分布特征分析[J]. 岩土力学, 2012, **33**(4): 1161–1166. (ZHOU Guo-liang, LI Xiao-jun, HOU Chun-lin, et al. Characteristic analysis of ground motions of canyon topography under incident SV seismic waves[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(4): 1161–1166. (in Chinese))
- [6] BAO H, BIELAK J, GHATTAS O, et al. Large-scale simulation of elastic wave propagation in heterogeneous media on parallel computers[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1998, **152**(1): 85–102.
- [7] 丁海平, 刘启方, 金 星. 长周期地震动三维有限元数值模拟方法[J]. 地震工程与工程振动, 2006, **26**(5): 27–31. (DING Hai-ping, LIU Qi-fang, JIN Xing. A method of numerical simulation for long-period strong ground motion by 3-D FEM[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, **26**(5): 27–31. (in Chinese))
- [8] 陈国兴, 金丹丹, 朱 娇, 等. 河口盆地非线性地震效应及设计地震动参数[J]. 岩土力学, 2015, **36**(6): 1721–1736. (CHEN Guo-xing, JIN Dan-dan, ZHU Jiao, et al. Nonlinear

- seismic response of estuarine basin and design parameters of ground motion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(6): 1721 – 1736. (in Chinese)
- [9] FRANKEL A, VIDALE J. A three-dimensional simulation of seismic waves in the Santa Clara Valley, California, from a Loma Prieta aftershock[J]. Bull Seism Soc Am, 1992(5): 2045 – 2074.
- [10] 付长华, 高孟潭, 陈 鲲. 北京盆地结构对长周期地震动反应谱的影响[J]. 地震学报, 2012, **34**(3): 374 – 382. (FU Chang-hua, GAO Meng-tan, CHEN Kun. A study on long-period response spectrum of ground motion affected by basin structure of Beijing[J]. Acta Seismologica Sinica, 2012, **34**(3): 374 – 382. (in Chinese))
- [11] SANCHEZ-SESMA F J, LUZON F, PEREZ-RUIZ J A. In-plane seismic response of inhomogeneous alluvial valleys with vertical gradients of velocities and constant Poisson ratio[J]. Soil Dyn Earthquake Eng, 2009, **29**: 994 – 1004.
- [12] 巴振宁, 梁建文. Rayleigh 波斜入射下层状场地中凸起地形的三维响应分析[J]. 中国科学:技术科学, 2015, **45**(8): 874 – 888. (BA Zhen-ning, LIANG Jian-wen. Three dimensional responses of a hill in a layered half-space for obliquely incident Rayleigh waves[J]. Science China Technological Sciences, 2015, **45**: 874 – 888. (in Chinese))
- [13] 刘中宪, 梁建文, 赵瑞斌. 流体饱和层状半空间中沉积谷地对地震波的散射—IBIEM 求解[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(3): 512 – 522. (LIU Zhong-xian, LIANG Jian-wen, ZHAO Rui-bin. Indirect boundary integral equation method for solving scattering of seismic waves by an alluvial valley in fluid poroelastic layered half-space[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(3): 512 – 522. (in Chinese))
- [14] MOSSESSIAN T K, DRAVINSKI M. Amplification of elastic waves by a three dimensional valley. Part 1: steady state response[J]. Earthquake Eng Struct Dyn, 1990, **19**: 667 – 680.
- [15] 金 峰, 张楚汉, 王光纶. 结构地基相互作用的 FE-BE-IBE 耦合模型[J]. 清华大学学报 (自然科学版), 1993, **33**(2): 17 – 25. (JIN Feng, ZHANG Chu-han, WANG Guang-lun. A Coupling FE-BE-IBE model for structure-foundation interactions[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science), 1993, **33**(2): 17 – 25. (in Chinese))
- [16] MOSSESSIAN T K, DRAVINSKI M. A hybrid approach for scattering of elastic waves by three-dimensional irregularities of arbitrary shape[J]. J Phys Earth, 1992, **40**: 241 – 261.
- [17] LYSMER J, KULEMEYER R L. Finite dynamic model for infinite media[J]. J Engng Mech Div ASCE, 1969, **95**: 759 – 877.
- [18] 刘晶波, 王振宇, 杜修力, 等. 波动问题中的三维时域 黏弹性人工边界[J]. 工程力学, 2005, **22**(6): 46 – 51. (LIU Jing-bo, WANG Zhen-yu, DU Xiu-li, et al. Three-dimensional visco-elastic artificial boundaries in time domain for wave motion problems[J]. Engineering Mechanic, 2005, **22**(6): 46 – 51. (in Chinese))
- [19] 廖振鹏. 工程波动理论导论[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2002. (LIAO Zhen-peng. Introduction to wave motion theories in engineering[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [20] CLAYTON R, ENGQUIST B. Absorbing boundary condition for acoustic and elastic equations[J]. Bull Seism Soc Am, 1977, **67**: 1529 – 1540 .
- [21] WOLF J P. Dynamic soil-structure interaction[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1985.
- [22] 梁建文, 巴振宁. 三维层状场地中斜面均布荷载动力格林函数[J]. 地震工程与工程振动, 2007, **27**(5): 18 – 26. (LIANG Jian-wen, BA Zhen-ning. Dynamic Green's function for uniformly distributed loads acting on an inclined plane in 3-D layered site[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, **27**(5): 18 – 26. (in Chinese))
- [23] 刘中宪, 梁建文. 三维黏弹性层状半空间埋置集中荷载动力格林函数求解—修正刚度矩阵法[J]. 固体力学学报, 2013, **34**(6): 579 – 588. (LIU Zhong-xian, LIANG Jian-wen. Dynamic Green's function for three-dimensional concentrated loads in the interior of viscoelastic layered half-space—Modified Stiffness Matrix Method[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2013, **34**(6): 579 – 588. (in Chinese))
- [24] SÁNCHEZ-SESMA F J. Diffraction of elastic waves by three-dimensional surface irregularities[J]. Bull Seism Soc Am, 1983, **73**(6A): 1621 – 1636.
- [25] 廖振鹏, 杨柏坡, 袁一凡. 三维地形对地震地面运动的影响[J]. 地震工程与工程震动, 1980(1): 13 – 33. (LIAO Zhen-peng, YANG Bai-po, YUAN Yi-fan. Effect of three-dimensional topography on earthquake ground motion[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1980(1): 13 – 33. ( in Chinese))