

刘中宪, 于琴, 何颖. 2017. 岩土介质随机性对沉积河谷地震动放大效应的影响. 地震学报, 39(5): 764-777. doi:10.11939/jass.2017.05.011.

Liu Z X, Yu Q, He Y. 2017. Effect of randomness of geotechnical medium on the seismic ground motion amplification effect of a sedimentary valley. *Acta Seismologica Sinica*, 39(5): 764-777. doi:10.11939/jass.2017.05.011.

# 岩土介质随机性对沉积河谷地震动 放大效应的影响<sup>\*</sup>

刘中宪<sup>1,2,3)</sup> 于 琴<sup>1,2)</sup> 何 颖<sup>1,2),†</sup>

1) 中国天津 300384 天津城建大学土木工程学院

2) 中国天津 300384 天津市土木建筑结构防护与加固重点实验室

3) 中国天津 300074 天津市地震工程研究所

**摘要** 基于间接边界元法计算沉积河谷对平面 P 波和 SV 波的二维散射, 着重考察沉积介质波速比和材料阻尼比的随机性对河谷地震动放大效应的影响。利用蒙特卡罗方法随机模拟产生了波速比样本和阻尼样本各 30 组, 给出了不同入射角度和频率的 P 波和 SV 波入射下河谷随机响应的单频和频谱结果。算例分析结果表明: ① 地表位移响应幅值的变异系数极值均显著大于波速比变异系数, 且波速比的随机性对地表位移的影响在体系共振频率处最为显著, 地表位移的标准差最大可达 7.168; 低频情况下, 沉积中部地震动反应的变异性更显著, 高频情况下则在沉积河谷边缘变异性最大; ② 入射角对地表位移响应变异系数极值的影响不大, 但对变异系数空间变化的影响显著; ③ 阻尼比随机性对地表位移的影响在低频情况下较小, 在高频情况下则较明显, 尤其是在沉积河谷的体系共振频率处, 其影响最为显著。

**关键词** 河谷放大效应 地震动 间接边界元法 波速比随机性 阻尼比随机性 蒙特卡洛方法

doi:10.11939/jass.2017.05.011 中图分类号: P315.9 文献标志码: A

## Effect of randomness of geotechnical medium on the seismic ground motion amplification effect of a sedimentary valley

Liu Zhongxian<sup>1,2,3)</sup> Yu Qin<sup>1,2)</sup> He Ying<sup>1,2),†</sup>

1) Civil Engineering College, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China

2) Tianjin Key Laboratory of Civil Structure Protection and Reinforcement, Tianjin 300384, China

3) Earthquake Engineering Research Institute of Tianjin City, Tianjin 300074, China

**Abstract:** The actual geotechnical property parameters have obvious randomness. The two-dimensional scattering of the P and SV waves in the sedimentary valleys is studied based on the indirect boundary element method (IBEM) in order to explore the effect of the randomness of the medium velocity and materi-

\* 基金项目 国家自然科学基金(51678390)和天津市应用基础与前沿研究计划重点项目(16JCZDJC38900, 15JCZDJC39900)共同资助。

收稿日期 2017-03-07 收到初稿, 2017-05-15 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: he114@126.com



al damping on seismic ground amplification effect of the valley. The Monte Carlo method is used to simulate 30 groups of wave velocity ratio samples and 30 groups of damping ratio samples. Finally the present paper gives the single frequency and spectral results of random response of the valley under P wave and SV wave incidence with different incident angles and frequencies. The results show that the variation coefficient extremum of surface displacement response amplitude is significantly larger than the variation coefficient of velocity ratio, and the effect of velocity ratio randomness on surface displacement is the most significant at system resonance frequency, and the maximum standard deviation of surface displacement can reach 7.168. The variation of the ground motion response in the sedimentary center is more significant at low frequency, but it is the largest at the edge of the sedimentary valley at high frequency. On the other hand, the incident angle has little effect on the variation coefficient extremum of surface displacement response amplitude, but it has a significant effect on the spatial variation of the variation coefficient. Meanwhile, the damping randomness has little effect on the surface displacement at low frequencies, but the effect is obvious at high frequencies, especially at the natural vibration frequency of the sedimentary valley, the effect is most significant.

**Key words:** valley amplification effect; seismic ground motion; indirect boundary element method; wave velocity ratio randomness; damping ratio randomness; Monte Carlo method

## 引言

国内外有大量的城市和重要建筑场址位于沉积河谷之中,多次地震观测和震害调查表明,沉积河谷作为常见的局部场地之一,对地震动具有显著影响。近年来,出于地震小区划和重大工程抗震设计的需要,沉积河谷对地震动的放大效应引起了国内外岩土工程界的广泛关注。沉积河谷对地震波散射问题的计算方法可采用数值法和解析法,其中解析法主要指波函数展开法(Trifunac, 1971; Yuan, Liao, 1995; 梁建文等, 2006; 赵成刚, 韩铮, 2007),数值法包括限元法(Bao *et al*, 1998; 丁海平等, 2006; 周国良等, 2012; 陈少林等, 2014; 陈国兴等, 2015)、有限差分法(Frankel, Vidale, 1992; 付长华等, 2012)、边界单元法(Lozón *et al*, 2009; 巴振宁, 梁建文, 2015)、间接边界积分方程法(Mossessian, Dravinski, 1990; 刘中宪等, 2013)、有限元-边界元(边界积分方程)耦合法(Mossessian, Dravinski, 1992; 金峰等, 1993)等。但是,这些研究大多针对确定性模型进行参数分析,而对参数随机性的讨论则较少。现实中岩土介质参数的随机性十分明显,且当前的实验技术对岩土参数测定的可靠度并不高。考虑到介质波速、阻尼等参数的不确定性,研究参数随机性对河谷地震响应的影响具有重要的理论意义和工程应用价值。近年来,一些研究人员对波速、波形的影响已进行了初步研究,取得了诸多成果。例如,Ge(2010)给出了剪切波速沿任意方向梯度变化的半圆沉积谷地对SH波入射的地震响应,刘中宪和王冬(2014)对不同地层波速模型对半圆沉积谷地地震响应的影响进行了深入分析。

鉴于材料波速和阻尼是影响沉积谷地地震响应规律的关键因素,本文拟采用间接边界元法,借鉴何颖等(2014a, b)关于SH波入射情况下形状随机性对地震波散射的分析思路,

进一步对P波和SV波入射下沉积河谷的地震动反应进行统计分析,以期获取沉积介质波速比、阻尼随机性对河谷地震动放大效应的影响。

## 1 计算模型

如图1所示,假设在半空间中有一沉积河谷场地,地震波从基岩半空间入射。为简化分析,基岩半空间( $D_1$ )和沉积河谷( $D_2$ )均假设为各向同性弹性介质;  $B$ 为区域  $D_1$  与  $D_2$  的交界面;  $G_1$ ,  $v_1$ ,  $\rho_1$ ,  $c_{p1}$ ,  $c_{s1}$  和  $\zeta_1$  分别为半空间介质  $D_1$  的剪切模量, 泊松比, 密度, 纵波波速, 横波波速和阻尼比;  $G_2$ ,  $v_2$ ,  $\rho_2$ ,  $c_{p2}$ ,  $c_{s2}$  和  $\zeta_2$  分别为沉积河谷  $D_2$  相应的材料特性;  $a$  为沉积河谷的半宽,  $h$  为深度;  $L_1$  和  $L_2$  分别为半空间地表和沉积河谷地表。

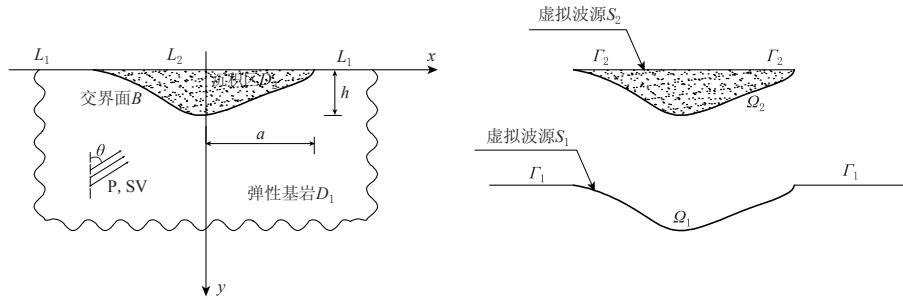


图1 计算模型

(a) 沉积河谷图; (b) 虚拟波源分布图

Fig. 1 Calculation model

(a) Sedimentary valley diagram; (b) Virtual wave source distribution

## 2 计算方法

本文对基岩半空间和沉积河谷内部的波动状态均采用间接边界元法进行模拟, 然后根据沉积河谷和半空间交界面  $B$  上位移和应力连续以及地表  $L$  (包括半空间地表  $L_1$  和沉积河谷地表  $L_2$ ) 零应力边界条件, 求得各部分波场的虚拟波源密度, 进而得到各部分的散射场, 最终得到整体解。

首先进行波场分离, 基岩弹性半空间  $D_1$  的总位移场和应力场可分别表达为

$$u_i^{(t,1)}(\mathbf{x}) = u_i^{(f,1)}(\mathbf{x}) + u_i^{(s,1)}(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in D_1, \quad (1)$$

$$\sigma_i^{(t,1)}(\mathbf{x}) = \sigma_i^{(f,1)}(\mathbf{x}) + \sigma_i^{(s,1)}(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in D_1, \quad (2)$$

式中,  $u_i^{(f,1)}$  和  $\sigma_i^{(f,1)}$  分别表示平面波入射下自由场  $i$  向位移和应力,  $u_i^{(s,1)}$  和  $\sigma_i^{(s,1)}$  分别表示散射场  $i$  向位移和应力。根据单层位势理论,  $D_1$  域内散射场由虚拟波源面  $S_1$  上分布的虚拟波源产生(图1), 且  $S_1 = \{\Gamma_1 \cup \Omega_1\}$ , 该区域内相应的位移和应力可表达为

$$u_i^{(s,1)}(\mathbf{x}) = \int_{S_1} \varphi_j^{(s,1)}(\mathbf{y}) G_{ij}^{(s,1)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) dS_y, \quad (3)$$

$$\sigma_i^{(s,1)}(\mathbf{x}) = -0.5 \varphi_j^{(s,1)}(\mathbf{x}) + \int_{S_1} \varphi_j^{(s,1)}(\mathbf{y}) T_{ij}^{(s,1)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) dS_y, \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{x} \in D_1$ ,  $\mathbf{y} \in S_1$ ;  $\varphi_j^{(s,1)}(\cdot)$  为基岩半空间的波源密度,  $G_{ij}^{(s,1)}(\cdot)$  和  $T_{ij}^{(s,1)}(\cdot)$  分别为基岩半空间的位移和应力格林函数。

与基岩半空间类似, 沉积河谷散射场可由虚拟波源面  $S_2$  上分布的虚拟波源产生, 且

$S_2 = \{\Gamma_2 \cup \Omega_2\}$ , 则相应的散射位移和应力可表达为

$$u_i^{(s,2)}(\mathbf{x}) = \int_{S_2} \varphi_j^{(s,2)}(\mathbf{y}) G_{ij}^{(s,2)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) dS_y, \quad (5)$$

$$\sigma_i^{(s,2)}(\mathbf{x}) = 0.5 \varphi_j^{(s,2)}(\mathbf{x}) + \int_{S_2} \varphi_j^{(s,2)}(\mathbf{y}) T_{ij}^{(s,2)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) dS_y, \quad (6)$$

式中,  $u_i^{(s,2)}$  和  $\sigma_i^{(s,2)}$  分别为沉积部分的位移和应力,  $\varphi_j^{(s,2)}(\cdot)$  为沉积河谷的波源密度,  $G_{ij}^{(s,2)}(\cdot)$  和  $T_{ij}^{(s,2)}(\cdot)$  分别为沉积河谷的位移和应力格林函数. 由于沉积河谷  $D_2$  区域内无自由场部分, 该区域的散射场即为总波场.

根据边界位移、应力连续及地表零应力条件, 通过上述求得的各部分波场建立方程以求解波源密度.

为便于问题数值求解, 首先对边界进行离散, 并在每个单元上施加虚拟均布荷载. 假定  $\varphi_j(\cdot)$  在每个单元上均为常量, 则存在线性方程组

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{l=1}^{N_1} \varphi_j^{(s,1)}(\mathbf{y}_l) g_{ij}^{(s,1)}(\mathbf{x}_n, \mathbf{y}_l) - \sum_{m=1}^{N_2} \varphi_j^{(s,2)}(\mathbf{y}_m) g_{ij}^{(s,2)}(\mathbf{x}_n, \mathbf{y}_m) = -u_i^{(f,1)}(\mathbf{x}_n), \\ -0.5[\varphi_j^{(s,1)}(\mathbf{x}_n) + \varphi_j^{(s,2)}(\mathbf{x}_n)] + \sum_{l=1}^{N_1} \varphi_j^{(s,1)}(\mathbf{y}_l) t_{ij}^{(s,1)}(\mathbf{x}_n, \mathbf{y}_l) - \\ \sum_{m=1}^{N_2} \varphi_j^{(s,2)}(\mathbf{y}_m) t_{ij}^{(s,2)}(\mathbf{x}_n, \mathbf{y}_m) = -\sigma_i^{(f,1)}(\mathbf{x}_n), \\ -0.5\varphi_j^{(s,1)}(\mathbf{x}_{n_1}) + \sum_{l=1}^{N_1} \varphi_j^{(s,1)}(\mathbf{y}_l) t_{ij}^{(s,1)}(\mathbf{x}_{n_1}, \mathbf{y}_l) = -\sigma_i^{(f,1)}(\mathbf{x}_{n_1}), \\ 0.5\varphi_j^{(s,2)}(\mathbf{x}_{n_2}) + \sum_{m=1}^{N_2} \varphi_j^{(s,2)}(\mathbf{y}_m) t_{ij}^{(s,2)}(\mathbf{x}_{n_2}, \mathbf{y}_m) = 0, \\ g_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \int_{y-\frac{\Delta S}{2}}^{y+\frac{\Delta S}{2}} G_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) dS_y, \\ t_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \int_{y-\frac{\Delta S}{2}}^{y+\frac{\Delta S}{2}} T_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) dS_y, \end{array} \right. \quad (7)$$

式中,  $N_1$  和  $N_2$  分别为基岩半空间表面和沉积河谷边界面的离散单元数, 且  $\mathbf{x}_n \in B$ ,  $\mathbf{x}_{n_1} \in L_1$ ,  $\mathbf{x}_{n_2} \in L_2$ ,  $\mathbf{y}_l \in S_1$ ,  $\mathbf{y}_m \in S_2$ . 当  $\mathbf{x} \neq \mathbf{y}$  时, 直接利用式(7)和(8)进行计算; 当  $\mathbf{x} = \mathbf{y}$  时, 则需利用格林函数展开式进行解析积分求解. 综上, 对于基岩半空间而言, 散射场和自由场叠加得到总波场, 对于沉积河谷而言, 散射场即为总波场.

### 3 数值算例

首先采用蒙特卡洛方法(Shinozuka, Deodatis, 1991)随机产生 30 组沉积河谷介质与基岩半空间介质的波速比  $c_{S2}/c_{S1}$  样本(以下简称波速比样本)和 30 组沉积河谷介质与基岩半空间介质的阻尼比  $\xi$  样本(以下简称阻尼比样本), 其中波速比样本服从均值为 1/3、变异系数为 0.3 的正态分布, 阻尼比样本服从均值为 0.03、变异系数为 0.33 的正态分布. 定义沉积河谷宽度  $2a$  与入射波波长  $\lambda$  之比为入射波的无量纲频率  $\eta = 2a/\lambda$ , 分别基于间接边界元法求解这 30 组波速比样本和 30 组阻尼比样本的半椭圆沉积河谷在平面 P 波和 SV 波入射下地表位移响应幅值的均值  $\mu$ , 标准差  $\sigma$  和变异系数  $\sigma/\mu$ . 图 2 和图 3 分别给出了波速

比随机而阻尼比保持不变( $\zeta=0.03$ )的情况下P波和SV波入射下地表位移响应幅值均值 $\mu$ 和正负一倍标准差的置信区间 $\mu\pm\sigma$ ,图4给出了30组波速比样本的地表位移响应幅值的变异系数,图5和图6分别给出了阻尼比随机而波速比保持不变( $c_{S2}/c_{S1}=1/3$ )的情况下P波和SV波入射下地表位移响应幅值均值 $\mu$ 和置信空间 $\mu\pm\sigma$ ,图7给出了30组阻尼比样本的地表位移响应幅值的变异系数.同时为便于比较,图2—7中也给出了波速比 $c_{S2}/c_{S1}=1/3$ 和阻尼比 $\zeta=0.03$ 的计算结果,所用计算参数为:半空间与沉积介质密度比为1:0.8;半空间介质阻尼比为0.02;无量纲频率 $\eta=0.5, 1, 2$ 和5;入射角 $\theta=0^\circ, 30^\circ$ .横坐标 $x/a$ 表示地表观察点距沉积地表中心的水平距离.

### 3.1 不同波速比情况下沉积河谷模型对平面P波和SV波的散射

对30组波速比样本的计算结果进行统计,得到位移幅值均值 $\mu$ 和置信区间 $\mu\pm\sigma$ ,分析波速随机性对地表位移的影响程度.

在P波和SV波入射下,沉积河谷地表位移响应特征呈现出与入射频率、入射角度、沉积深度等多因素的相关性.从图2和图3可以看出,在沉积河谷内部地表位移幅值均值 $\mu$ 和置信区间 $\mu\pm\sigma$ 的宽度明显大于外围半空间,图4中沉积段地表位移变异系数显著增大,与之相吻合,表明波速比随机性对沉积段的地表位移幅值影响十分显著,而对外围半空间响应则影响较小.其次,地表位移幅值置信区间宽度较大位置基本与幅值均值的峰值部位对应.另外,图4中沉积河谷边界点 $x/a=\pm 1$ 处的变异系数明显增大形成波峰,这种

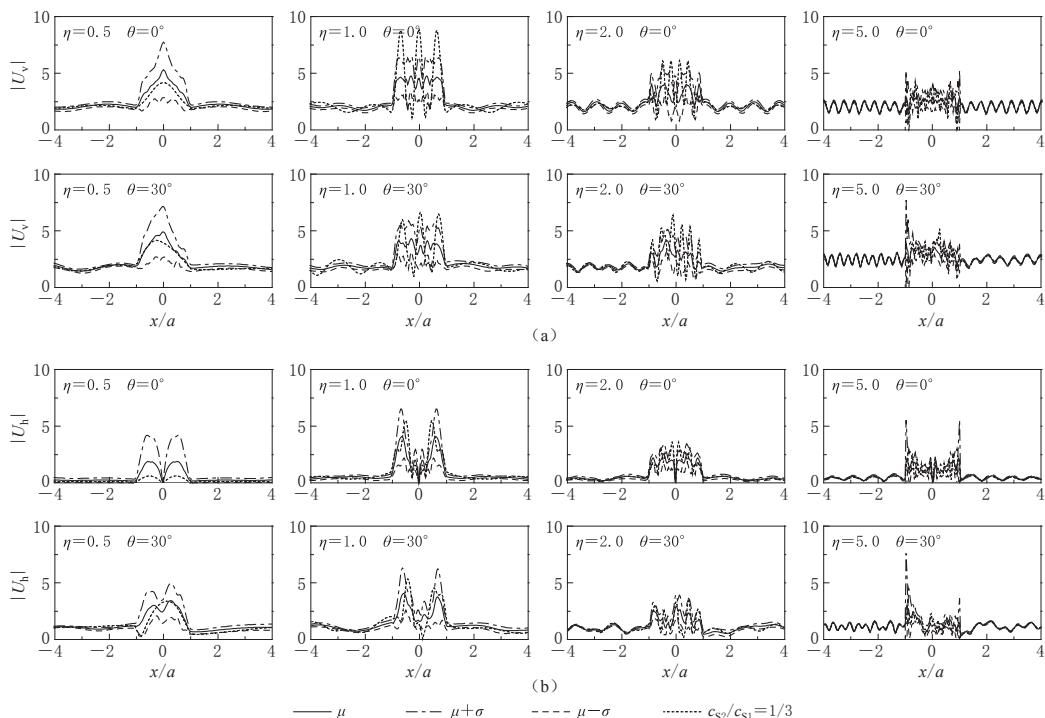


图2 P波以不同角度入射下波速比随机性对沉积河谷地表竖向位移幅值 $|U_v|$ (a)和水平位移幅值 $|U_h|$ (b)的影响

Fig. 2 Effect of wave velocity ratio randomness on surface vertical displacement amplitude  $|U_v|$  (a) and horizontal displacement amplitude  $|U_h|$  (b) of sedimentary valley with different incidence angles under P-wave incidence

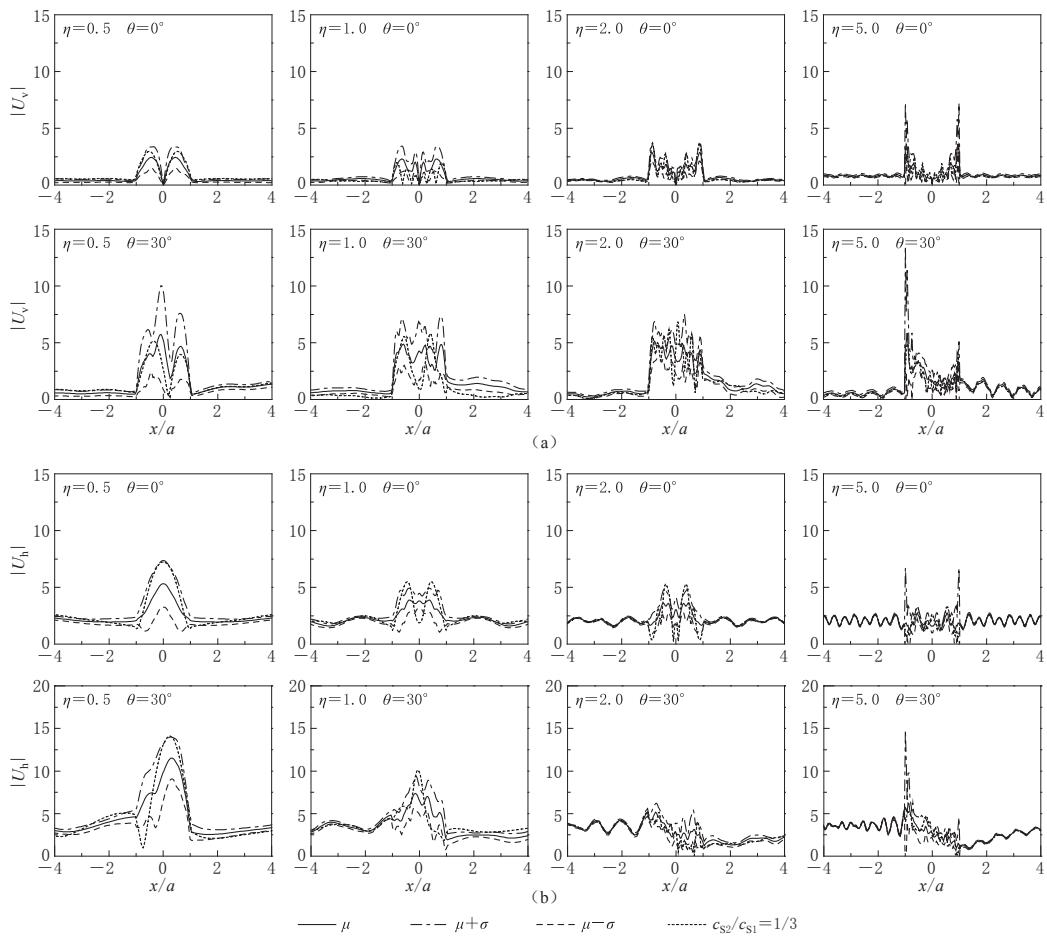


图 3 SV 波以不同角度入射下波速比随机性对沉积河谷地表竖向位移幅值  $|U_v|$  (a) 和水平位移幅值  $|U_h|$  (b) 的影响

Fig. 3 Effect of wave velocity randomness on surface vertical displacement amplitude  $|U_v|$  (a) and horizontal displacement amplitude  $|U_h|$  (b) of sedimentary valley with different incidence angles under SV-wave incidence

现象随着频率的增大变得更加显著, 这与高频下沉积河谷角部放大显著的规律是一致的, 表明高频波入射下, 波速随机性对沉积河谷边缘处地震响应的影响也十分突出, 变异系数最大可达  $2.791 (\eta=5.0, \theta=0^\circ, \text{水平方向})$ . 此外, 从图 4 还可以看出, 在入射角不同的情况下, 地表位移幅值变异系数的空间变化显著不同, 整体而言在外围半空间的变化明显, 尤其是  $\eta=5.0$  时 SV 波入射下竖向位移变异系数分布差异更为显著. 在这种情况下, 左侧 ( $x/a < 0$ ) 地表位移幅值的变异系数在地震波斜入射时不仅明显高于垂直入射情况, 而且从整体上也高于右侧 ( $x/a > 0$ ) 地表的变异系数, 即入射波的位置对变异系数有一定的影响.

表 1 给出了 P 波和 SV 波入射下 30 个波速比随机样本的地表位移响应幅值变异系数  $\sigma/\mu$  的极值. 可以看出, 该变异系数极值均显著大于波速比变异系数, 与图 2—4 所示结论相同, 表明波速比随机性对地震波散射的影响不可忽视. 然而,  $\theta=0^\circ$  与  $\theta=30^\circ$  情况的对比结果显示变异系数极值变化与入射角度关系不大.

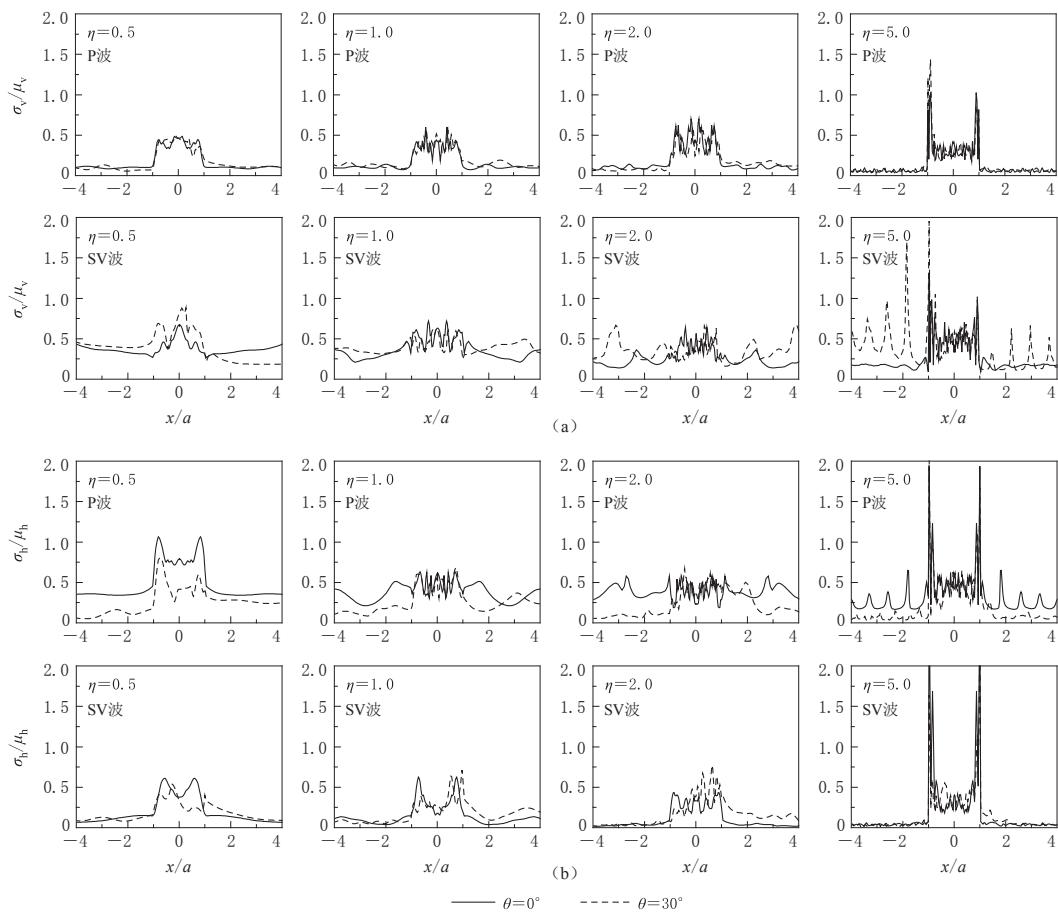


图 4 30 组波速比样本地表位移响应幅值的竖向变异系数  $\sigma_v/\mu_v$ (a) 和水平变异系数  $\sigma_h/\mu_h$ (b)

Fig. 4 Vertical variation coefficient  $\sigma_v/\mu_v$ (a) and horizontal variation coefficient  $\sigma_h/\mu_h$ (b) of the surface displacement amplitude for 30 wave velocity ratio samples

表 1 P 波和 SV 波入射下竖向位移变异系数和水平向位移变异系数极值(波速比随机)

Table 1 The variation coefficient extremum of vertical displacement and horizontal displacement with the P-wave incidence and the SV-wave incidence (wave velocity ratio randomness)

$\eta$	P 波入射				S 波入射			
	$\sigma_v/\mu_v$		$\sigma_h/\mu_h$		$\sigma_v/\mu_v$		$\sigma_h/\mu_h$	
	$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$
0.5	0.484	0.492	1.071	0.814	0.677	0.889	0.619	0.544
1.0	0.594	0.565	0.632	0.683	0.720	0.619	0.624	0.712
2.0	0.696	0.600	0.582	0.670	0.644	0.667	0.432	0.771
5.0	1.012	1.425	1.931	2.084	1.287	1.947	2.791	2.433

### 3.2 不同阻尼比情况下沉积河谷模型对平面 P 波和 SV 波的散射

对 30 组阻尼比样本的计算结果进行统计, 得到位移幅值均值  $\mu$  和置信区间  $\mu \pm \sigma$ (图 5, 6), 分析阻尼比随机性对地表位移的影响程度, 其中 P 波入射的水平位移幅值图和 SV 波入射的竖向位移幅值图由于相对次要且篇幅有限, 故略去。

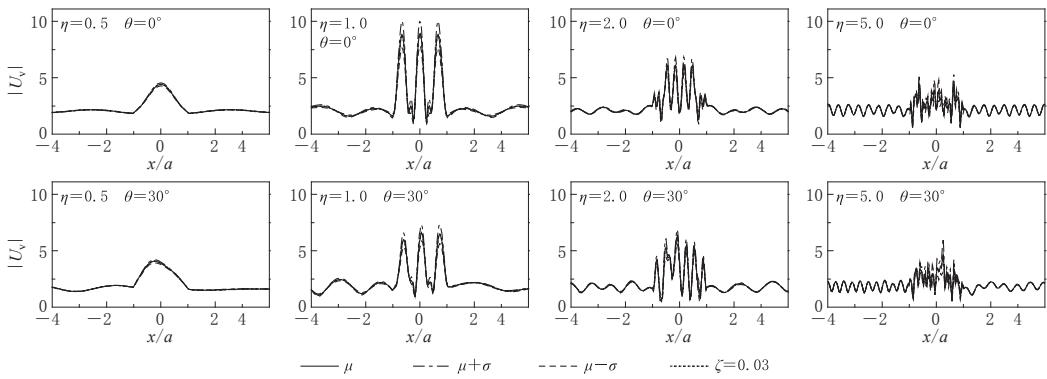


图 5 P 波以不同角度入射下阻尼比随机性对沉积河谷地表竖向位移幅值  $|U_v|$  的影响 ( $c_{S2}/c_{S1}=1/3$ )

Fig. 5 Effect of damping ratio randomness on surface vertical displacement amplitude  $|U_v|$  of sedimentary valley with different incidence angles under P-wave incidence ( $c_{S2}/c_{S1}=1/3$ )

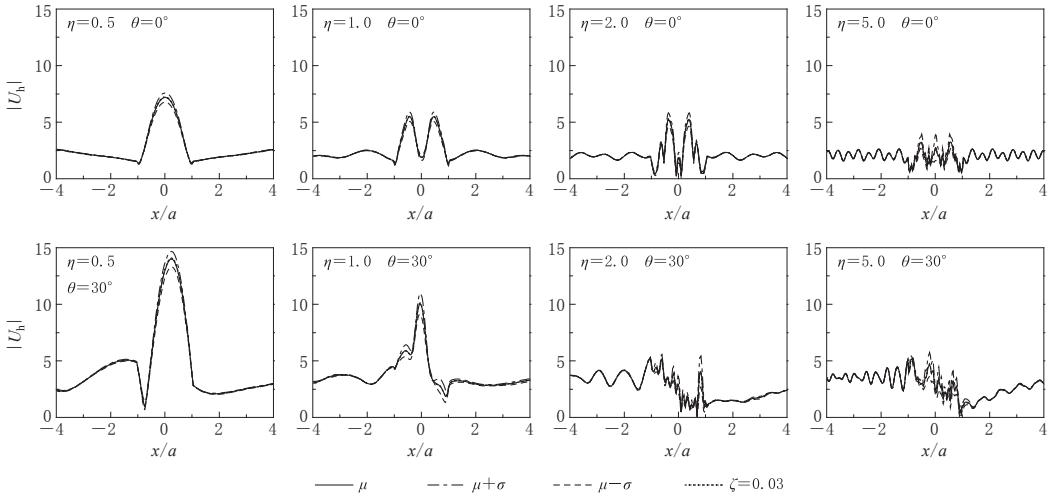


图 6 SV 波以不同角度入射下阻尼比随机性对沉积河谷地表水平位移幅值  $|U_h|$  的影响 ( $c_{S2}/c_{S1}=1/3$ )

Fig. 6 Effect of damping ratio randomness on surface horizontal displacement amplitude  $|U_h|$  of sedimentary valley with different incidence angles under SV-wave incidence ( $c_{S2}/c_{S1}=1/3$ )

与波速比随机性影响不同, 图 5 和 6 显示了阻尼比随机性对沉积外部半空间地表位移幅值的离散性几乎没有影响, 而对沉积内部地表响应影响稍大, 这与图 7 的结果相吻合。随着入射波频率的增加, 置信区间  $\mu \pm \sigma$  的宽度也随之增加, 说明阻尼比在高频时对位移的影响大, 这一点与波动规律是一致的。入射角度影响仍旧对变异系数空间变化的影响较大。表 2 给出了 P 波和 SV 波入射下 30 个阻尼比随机样本的地表位移幅值变异系数  $\sigma/\mu$  的极值。变异系数体现了地表位移幅值的离散程度, 随频率增大呈振荡起伏变化, 最大可达 1.489 ( $\eta=5.0$ ,  $\theta=30^\circ$ , SV 波, 水平方向); 从变异系数大小看, 与波速比随机影响相比, 阻尼比随机性对沉积河谷地震波散射影响显著减小。变异系数极值变化与入射角度的大小关系不大, 在  $\eta=5.0$  的情况下, SV 波以  $30^\circ$  入射时的水平位移变异系数除外, 变异系数的

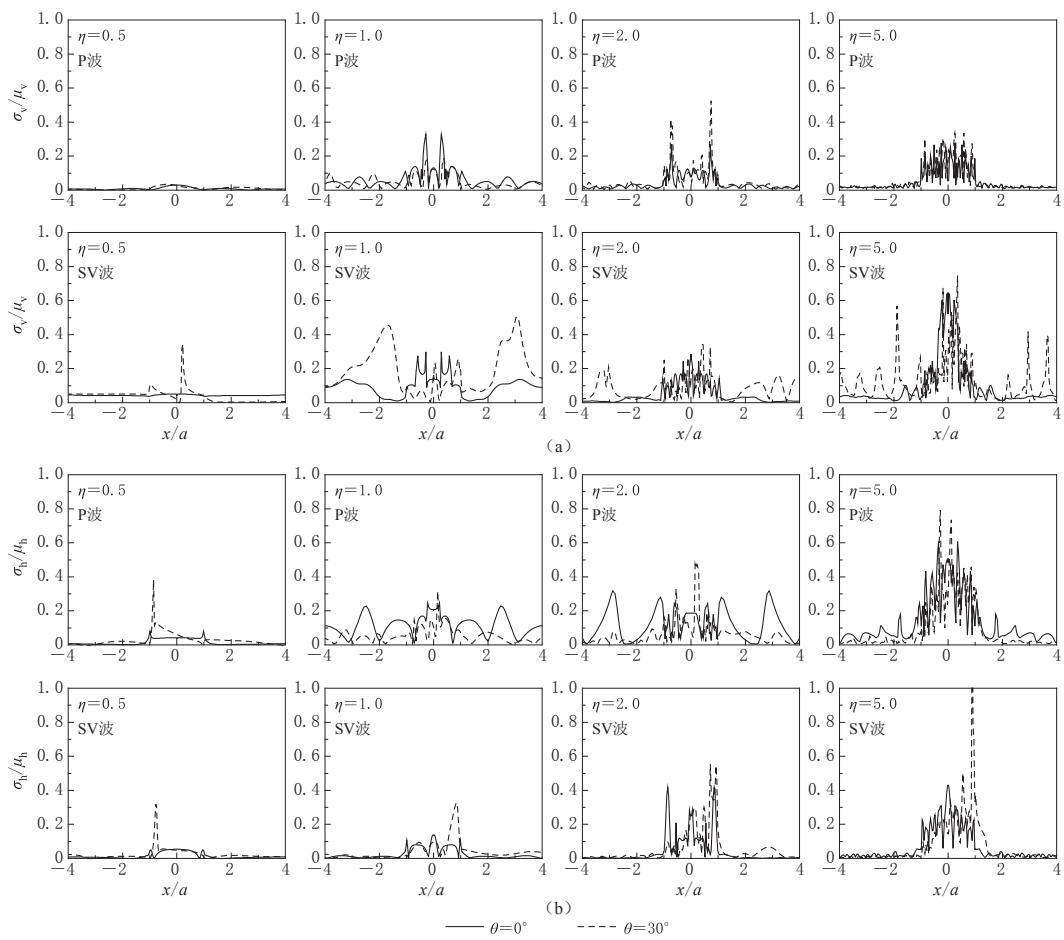


图 7 30 组阻尼比样本地表竖向位移变异系数  $\sigma_v/\mu_v$ (a) 和水平位移变异系数  $\sigma_h/\mu_h$ (b)

Fig. 7 Variation coefficient of surface vertical displacement amplitude  $\sigma_v/\mu_v$ (a) and horizontal displacement amplitude  $\sigma_h/\mu_h$ (b) for 30 groups of damping ratio samples

表 2 P 波和 SV 波入射下竖向位移变异系数和水平向位移变异系数极值(阻尼比随机)

Table 2 The variation coefficient extremum of vertical displacement and horizontal displacement with the P-wave and the SV-wave incidences (damping ratio randomness)

$\eta$	P 波入射				SV 波入射			
	$\sigma_v/\mu_v$		$\sigma_h/\mu_h$		$\sigma_v/\mu_v$		$\sigma_h/\mu_h$	
	$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=0^\circ$	$\theta=30^\circ$
0.5	0.030	0.035	0.084	0.233	0.054	0.348	0.057	0.320
1.0	0.325	0.184	0.246	0.316	0.298	0.500	0.138	0.326
2.0	0.175	0.393	0.403	0.475	0.282	0.342	0.417	0.554
5.0	0.271	0.328	0.604	0.789	0.639	0.741	0.428	1.489

异常放大主要是由于在高频情况下, 边界点离散程度大, 且均值过小趋近于 0 所致, 这也证明了与图 5—7 所示的结论相同。

### 3.3 波速比随机情况下的二维沉积河谷地表位移幅值谱

鉴于沉积河谷对地震波散射作用的复杂性, 为了全面地反映散射的频谱特性, 本文分

析波速比随机性对河谷内部典型点位的位移幅值谱离散程度的影响。考虑地震波入射角  $\theta$  为  $0^\circ$  和  $30^\circ$  时, 在沉积河谷地表选择  $x/a=0, -0.5$  和  $-0.8$  这 3 个观察点; 入射地震波无量纲频率  $\eta$  取值范围为 0—2, 间隔步长为 0.02, 其它地质条件及几何参数同上。

图 8 给出了 P 波和 SV 波入射下沉积河谷地表上  $x/a=0, -0.5, -0.8$  这 3 个典型点位的位移谱, P 波垂直入射的水平位移幅值谱图和 SV 波垂直入射的竖向位移幅值谱图由于幅值较小, 对工程抗震设计影响不大, 故略去。由图 8 可见, P 波和 SV 波入射时, 由于浅椭圆形河谷中心位置的聚焦放大作用, 地表中心位置( $x/a=0$ )的位移谱值通常大于其它典型点位; 河谷地表位移放大效应显著, 且由于河谷内部直达波、反射波和边缘衍射波复杂的相干效应, 不同点位的地震动幅值和频谱特性的差别较大。总体上看, 在低频波段, 越靠近中心位置, 波速比随机性对地震波散射的影响越大, 具体而言, 典型点位  $x/a=0$  的标准差最大可达  $7.168(\eta=0.32, \theta=30^\circ, \text{SV 波入射水平方向})$ , 典型点位  $x/a=-0.5$  的标准差最大可达  $3.865(\eta=0.32, \theta=30^\circ, \text{SV 波入射水平方向})$ , 典型点位  $x/a=-0.8$  的标准差最大可达到  $4.333(\eta=0.68, \theta=0^\circ, \text{P 波入射竖向})$ , 且基本都是在沉积河谷体系共振频率处达到最大, 由此可见, 波速比的随机性对地表位移幅值的影响不容忽视, 这与前文所得结果一致。

### 3.4 阻尼比随机情况下的二维沉积河谷地表位移幅值谱

同样地, 分析随机沉积介质阻尼比对河谷内部典型点位的位移幅值谱离散程度的影响时, 沉积河谷内部介质阻尼也按正态分布取 30 组样本进行统计计算, 波速比  $c_{s2}/c_{s1}=1/3$ , 其它参数与 3.3 节相同, 计算结果如图 9 所示。

沉积河谷内部受不同阻尼作用时, 不同点位频谱特性差别很大, 主要是由散射波复杂的相干效应造成的。从图 9 可以看出, 在较低频时, 位移频谱的离散性差别不大, 而当入射频率较高时, 位移幅值的离散性差异有所增大, 这与前文所得结果一致。整体而言, 位移离散性大的点一般均发生在共振点处(即幅值为峰值之处), 这也符合波动规律。

## 4 讨论与结论

本文以半椭圆形二维沉积河谷为例, 采用间接边界元法对其地震反应进行计算分析, 通过对地表位移幅值的统计分析, 研究沉积介质波速比、阻尼比随机性对场地响应的影响。对研究结果分析如下:

1) 波速比随机性对沉积段地表位移的影响显著。低频时, 沉积中部地震响应变异性更显著, 高频情况下则在沉积河谷边缘地震动变异性最大。变异系数的极值均显著大于波速比变异系数; 角度对变异系数极值的影响不大, 但对变异系数的空间变化影响较大。

2) 阻尼比随机性对沉积内部地表位移“峰值点”处的影响最为显著, 变异系数随频率增大呈振荡起伏变化; 阻尼比随机性对位移的影响在高频段较大, 且在“共振频率”处的影响尤为显著。由变异系数图可看出, 阻尼比随机性对地震动变异系数空间变化的影响需要进一步研究。

3) 波速比随机情况下, 最大标准差基本发生在沉积河谷的体系自振频率处, 说明波速比随机性对位移频谱的影响不容忽视。另外, 河谷内部不同位置的变异性有较大差异, 低频情况下, 沉积中部的地震响应变异性更显著, 高频情况下则在沉积河谷边缘变异性最大。

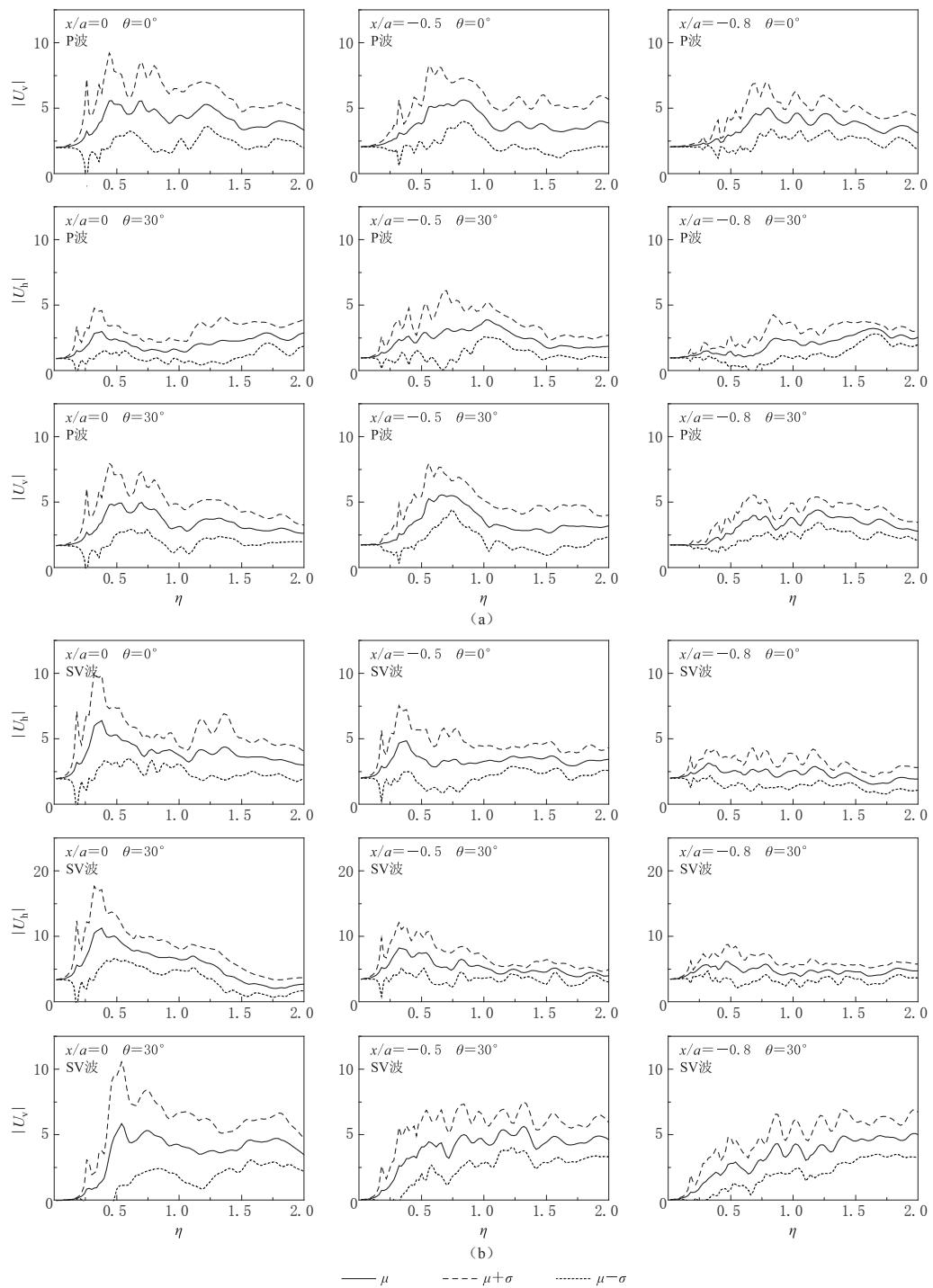


图 8 波速比随机情况下 P 波(a)和 SV 波(b)入射时二维沉积河谷地表位移幅值谱

Fig. 8 Surface displacement amplitude spectra in two-dimensional sedimentary valley with wave velocity ratio randomness under P-wave (a) and SV-wave (b) incidences

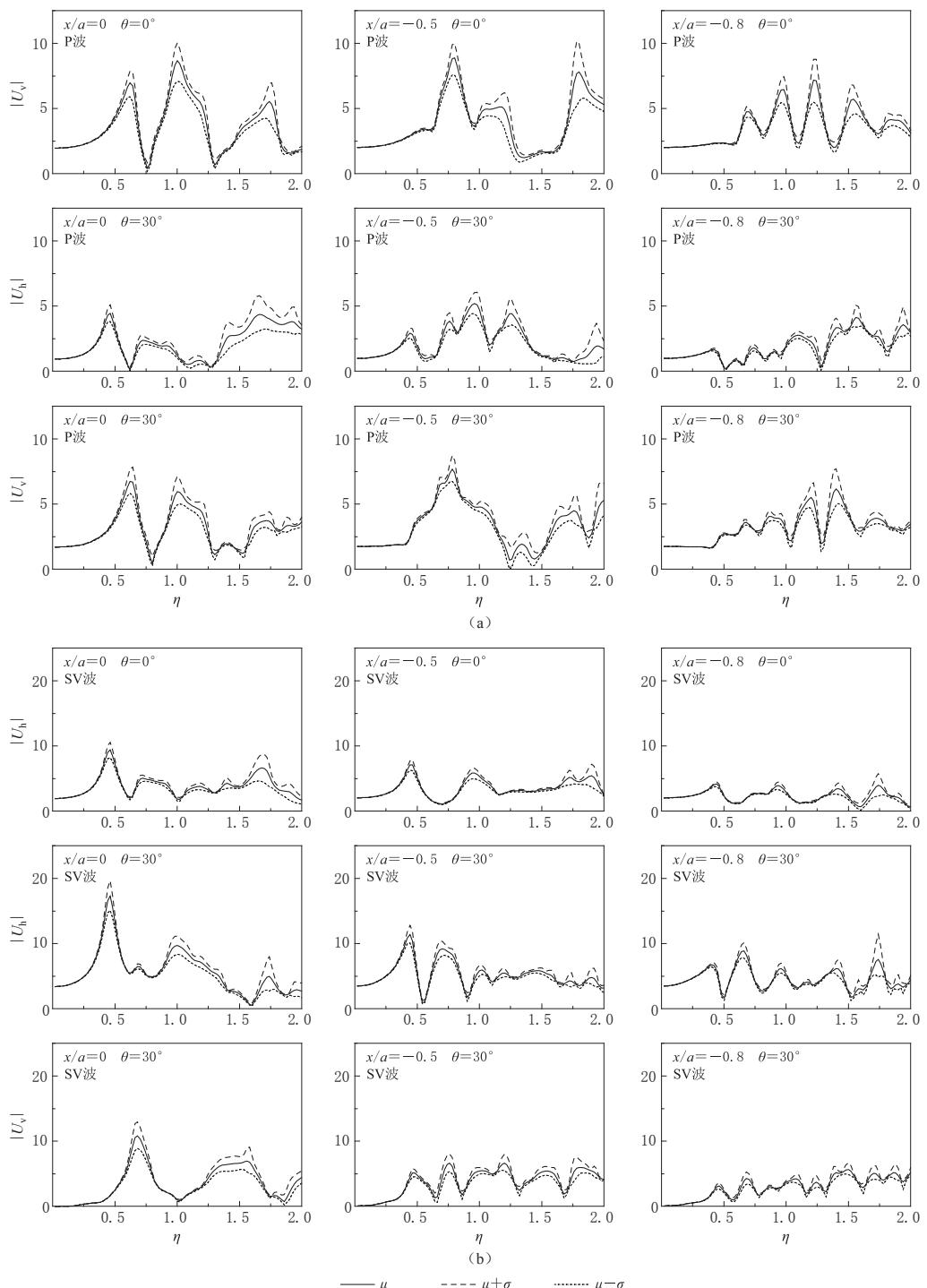


图 9 阻尼比随机情况下 P 波(a)和 SV 波(b)入射时二维沉积河谷的地表位移幅值谱

Fig. 9 Surface displacement amplitude spectra in two-dimensional sedimentary valley with random damping ratio under P-wave (a) and SV-wave (b) incidences

鉴于沉积河谷介质波速比随机性对河谷地震放大效应的显著影响,在实际场地地震安全性评价及地震小区划等工作中应综合先进的技术手段获取足够准确的波速模型。另外,强震情况下土体非线性对沉积河谷随机地震规律响应的影响还有待进一步深入研究。

## 参 考 文 献

巴振宁, 梁建文. 2015. 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, **45**(8): 874–888.

Ba Z N, Liang J W. 2015. Three dimensional responses of a hill in a layered half-space for obliquely incident Rayleigh waves[J]. *Scientia Sinica Technologica*, **45**(8): 874–888 (in Chinese).

陈国兴, 金丹丹, 朱姣, 李小军. 2015. 河口盆地非线性地震效应及设计地震动参数[J]. 岩土力学, **36**(6): 1721–1736.

Chen G X, Jin D D, Zhu J, Li X J. 2015. Nonlinear seismic response of Estuarine basin and design parameters of ground motion[J]. *Rock and Soil Mechanics*, **36**(6): 1721–1736 (in Chinese).

陈少林, 张莉莉, 李山有. 2014. 半圆柱型沉积盆地对 SH 波散射的数值分析[J]. 工程力学, **31**(4): 218–224.

Chen S L, Zhang L L, Li S Y. 2014. Numerical analysis of the plane SH waves scattering by semi-cylindrical alluvial valley[J]. *Engineering Mechanics*, **31**(4): 218–224 (in Chinese).

丁海平, 刘启方, 金星. 2006. 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, **26**(5): 27–31.

Ding H P, Liu Q F, Jin X. 2006. A method of numerical simulation for long-period strong ground motion by 3-D FEM [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **26**(5): 27–31 (in Chinese).

付长华, 高孟潭, 陈鲲. 2012. 北京盆地结构对长周期地震动反应谱的影响[J]. 地震学报, **34**(3): 374–382.

Fu C H, Gao M T, Chen K. 2012. A study on long-period response spectrum of ground motion affected by basin structure of Beijing[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **34**(3): 374–382 (in Chinese).

金峰, 张楚汉, 王光纶. 1993. 结构地基相互作用的 FE-BE-IBE 模型[J]. 清华大学学报: 自然科学版, **33**(2): 17–25.

Jin F, Zhang C H, Wang G L. 1993. A coupling FE-BE-IBE model for structure-foundation interactions[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, **33**(2): 17–25 (in Chinese).

何颖, 梁建文, 林永星. 2014a. 地下洞室断面形状随机性对平面 SH 波散射的影响[J]. 地震工程与工程振动, **34**(1): 1–7.

He Y, Liang J W, Lin Y X. 2014a. Effect of cross-section-shape randomness of underground cavity on scattering of plane SH waves[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, **34**(1): 1–7 (in Chinese).

何颖, 梁建文, 林永星. 2014b. 地下夹塞断面形状随机性对平面 SH 波散射的影响[J]. 地震学报, **36**(4): 584–594.

He Y, Liang J W, Lin Y X. 2014b. Effect of cross-section-shape randomness of underground inclusion on scattering of plane SH waves[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **36**(4): 584–594 (in Chinese).

梁建文, 张秋红, 李方杰. 2006. 浅圆沉积谷地对瑞雷波的散射: 高频解[J]. 地震学报, **28**(2): 176–182.

Liang J W, Zhang Q H, Li F J. 2006. Scattering of Rayleigh waves by a shallow circular alluvial valley: High-frequency solution[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **28**(2): 176–182 (in Chinese).

刘中宪, 梁建文, 赵瑞斌. 2013. 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, **35**(3): 512–522.

Liu Z X, Liang J W, Zhao R B. 2013. 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*, **35**(3): 512–522 (in Chinese).

刘中宪, 王冬. 2014. 不同地层波速模型对沉积谷地地震响应规律的影响: FEM-IBIEM 模拟研究[J]. 岩土工程学报, **36**(7): 1289–1301.

Liu Z X, Wang D. 2014. Effect of different wave velocity models on seismic response of alluvial valley based on FEM-IBIEM[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, **36**(7): 1289–1301 (in Chinese).

赵成刚, 韩铮. 2007. 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,

50(3): 905–914.

Zhao C G, Han Z. 2007. Three-dimensional scattering and diffraction of plane Rayleigh-waves by a hemispherical alluvial valley with saturated soil deposit[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **50**(3): 905–914 (in Chinese).

周国良, 李小军, 侯春林, 李铁萍. 2012. SV 波入射下河谷地形地震动分布特征分析[J]. 岩土力学, **33**(4): 1161–1166.

Zhou G L, Li X J, Hou C L, Li T P. 2012. Characteristic analysis of ground motions of canyon topography under incident SV seismic waves[J]. *Rock and Soil Mechanics*, **33**(4): 1161–1166 (in Chinese).

Bao H S, Bielak J, Ghattas O, Kallivokas L F, O'Hallaron D R, Shewchuk J R, Xu J F. 1998. Large-scale simulation of elastic wave propagation in heterogeneous media on parallel computers[J]. *Comput Methods Appl Mech Eng*, **152**(1/2): 85–102.

Frankel A, Vidale J. 1992. A three-dimensional simulation of seismic waves in the Santa Clara Valley, California, from a Loma Prieta aftershock[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **82**(5): 2045–2074.

Ge Z X. 2010. Simulation of the seismic response of sedimentary basins with constant-gradient velocity along arbitrary direction using boundary element method: SH case[J]. *Earthquake Science*, **23**(2): 149–155.

Luzón F, Sánchez-Sesma F J, Pérez-Ruiz J A, Ramírez-Guzmán L, Pech A. 2009. In-plane seismic response of inhomogeneous alluvial valleys with vertical gradients of velocities and constant Poisson ratio[J]. *Soil Dyn Earthquake Eng*, **29**(6): 994–1004.

Mossessian T K, Dravinski M. 1990. Amplification of elastic waves by a three dimensional valley. Part 1: Steady state response[J]. *Earthquake Eng Struct Dyn*, **19**(5): 667–680.

Mossessian T K, Dravinski M. 1992. A hybrid approach for scattering of elastic waves by three-dimensional irregularities of arbitrary shape[J]. *J Phys Earth*, **40**(1): 241–261.

Shinozuka M, Deodatis G. 1991. Simulation of stochastic processes by spectral representation[J]. *Appl Mech Rev*, **44**(4): 191–204.

Trifunac M D. 1971. Surface motion of a semi-cylindrical alluvial valley for incident plane SH waves[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **61**(6): 1755–1770.

Yuan X M, Liao Z P. 1995. Scattering of plane SH waves by a cylindrical alluvial valley of circular-arc cross-section[J]. *Earthquake Eng Struct Dyn*, **24**(10): 1303–1313.