

DOI: 10.11779/CJGE20231271

# P/SV 波任意角斜射下山岭-含水谷场地地震动分析

杨永斌<sup>1,2</sup>, 刘鹏<sup>1</sup>, 周泽洋<sup>\*3</sup>, 张雄飞<sup>1</sup>

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆科技学院建筑工程学院, 重庆 401331; 3. 长沙理工大学土木与环境工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 山岭-含水谷地形作为一种常见的复合场地, 其对地震动响应的影响规律尚不明确。为此, 通过理论推导实现了有限域内的土水耦合, 并结合有限/无限元法对 P 波和 SV 波任意角斜射下山岭-含水谷复合场地进行了二维地震分析, 探讨了山岭和含水谷的相对位置关系对场地二维地震响应的影响。结果表明: ①P 波或 SV 波斜射时, 位于含水谷地震波入射前侧的山岭能抑制含水谷对地震波入射近端处地表最大水平加速度的放大作用; ②当 SV 波跨临界角入射且山岭位于含水谷地震波入射前侧时, 地表最大水平加速度在复合地形的地震波入射远端反而被放大; ③山岭-含水谷相对位置、入射波类型和临界角对于复合地形两端位移频谱影响显著。

**关键词:** 山岭-含水谷; 无限元; 土-水耦合; 地震动响应; 跨临界角

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)05-0889-14

**作者简介:** 杨永斌(1954—), 男, 教授, 中国工程院院士, 主要从事半空间场地波动传播分析方法、结构非线性分析方法和车辆/桥梁互制动力理论等方面的研究。E-mail: ybyang@cqu.edu.cn。

## Seismic analysis of irregular topography of hill and water-filled valley under oblique incident P- and SV-waves

YANG Yongbin<sup>1,2</sup>, LIU Peng<sup>1</sup>, ZHOU Zeyang<sup>3</sup>, ZHANG Xiongfei<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China; 3. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** As a common composite terrain, the effects of the irregular topography of hill and water-filled valley on the ground motion are currently unclear. Therefore, the coupling of soil and liquid in finite domain is realized through the theoretical analysis, the seismic analysis of irregular topography of hill-water-filled valley under oblique incident P- and SV-waves by the finite-infinite element method is conducted, and the effects of the relative position between the hill and the water-filled valley on the ground motion are discussed. The new findings of this study include: (1) The hill located at the incident side of the seismic waves of the water-filled valley can restrain the amplification effects of the maximum horizontal acceleration of ground on the “near” edge of the water-filled valley under P- and SV-waves. (2) For the SV-waves with overly critical angles and the hill located at the incident side of the seismic waves of the water-filled valley, the maximum horizontal acceleration of ground on the “far” edge of the water-filled valley is amplified instead. (3) The relative position between the hill and the water-filled valley, the seismic wave types and the critical angles have significant influences on the displacement spectra at both sides of the irregular topography.

**Key words:** hill-water-filled valley; infinite element; soil-liquid coupling; ground motion response; overly critical angle

## 0 引言

中国地形复杂多变且地震频发, 随着国家经济的快速发展和土地资源的日渐紧缺, 更多的工程项目将不得不建设在复杂的不规则地形上。大量震害调查和强震观测表明<sup>[1]</sup>, 山地、峡谷、河谷等局部不规则地形会将入射波和反射波同地形引起的散射波相互叠加, 使地震波发生局部放大或缩减, 形成显著的地形效应。地形效应对场地附近结构的抗震安全会带来重

大影响<sup>[2]</sup>, 因而在抗震设计和研究中理应给予足够的重视。

目前, 已有诸多学者针对局部地形的地震效应开展了大量研究, 且多集中于山岭、峡谷、盆地、河谷

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52078082); 重庆市院士专项 (2022YSZX-JSX0004CSTB, CSTB2023YSZX-JSX0002)

收稿日期: 2023-12-27

\*通信作者 (E-mail: z.y.zhou@csust.edu.cn)

等单一地形<sup>[3-5]</sup>。但研究山岭峡谷、山岭河谷、山岭盆地等由多个单一地形组合而成的复合地形的地震响应才是最符合实际的。

复合场地地震效应的研究方法主要包括解析法和数值法。解析法通常以复变函数法和波函数展开法为主，并已用于研究了半圆形凸起与凹陷相连地形<sup>[6]</sup>、等腰梯形山丘半圆峡谷<sup>[7]</sup>等复合地形对平面 SH 波的散射问题，但解析法受限于自身简化条件而往往难以处理复杂地形。因此，数值方法凭借其广泛的适用性，在地形更为复杂的复合场地的地震研究中备受关注。通过引进边界元法，巴振宁等<sup>[8]</sup>研究了高山峡谷地形对平面 P 波和 SV 波的散射问题，高严等<sup>[9]</sup>讨论了 SV 波垂直入射时盆地和山岭耦合场地对地表运动的影响。此外，黏弹性人工边界法等其他数值方法<sup>[10-11]</sup>也常被用于复合场地地震响应的研究。

尽管以边界元法和黏弹性人工边界法为主的数值方法已被广泛应用于复合场地地震研究中，但这些数值方法仍在精确度和计算量之间难以达到较好的平衡。与此同时，无限元法凭借其相对容易实现、精度较高、可更简单地处理半空间的不规则性等优点，成为模拟无限边界的另一种更为良好的数值手段。目前，有限/无限元法已被应用于单一场地的地震响应研究，例如峡谷地形<sup>[12]</sup>和含水谷地形<sup>[13]</sup>，但有限/无限元法用于复合场地地震响应研究的仍尚少。

综上所述，山岭峡谷地形作为一种典型的复合地形，其对地震动的影响研究已取得了重要进展，但山岭-峡谷复合地形中峡谷赋水的情况（含水谷）考虑较少，且往往未考虑山岭、含水谷的相对位置关系对于地震动响应的影响。更多地，对于 SV 波跨临界角入射问题在诸多场地地震研究关注较少。为此，首先对近域中含水谷地形存在的土-水耦合问题进行了理论分析，随后结合 Yang 等<sup>[14]</sup>提出的基于自由场精确解的地震动输入法，应用有限/无限元法建立了山岭-含水谷复合地形的半空间模型，在经与 Luco 等<sup>[15]</sup>研究结果验证的基础上，利用该模型系统讨论了山岭和含水谷的相对位置关系、入射波类型和入射角度对山岭-含水谷复合场地地震响应的影响规律。

## 1 基于自由场精确解的地震动输入法

图 1 (a) 为 P/SV 波斜入射下含复合地形的二维半无限空间示意图，O 点为坐标原点，近域包括山岭、含水谷地形区域及周围关注的土体区域，远域则延伸到无穷远。图 1 (a) 对应的地震动输入自由场模型如图 1 (b) 所示。本文研究针对近断层地震，由于其触发的地震波传至地表的距离有限，地震波多沿斜角方

向入射至近域，并引致地表持续震动，故假设震源位于近域外的左下侧，其中  $\theta_{pi}$  和  $\theta_{si}$  分别为 P 波和 SV 波的入射角。

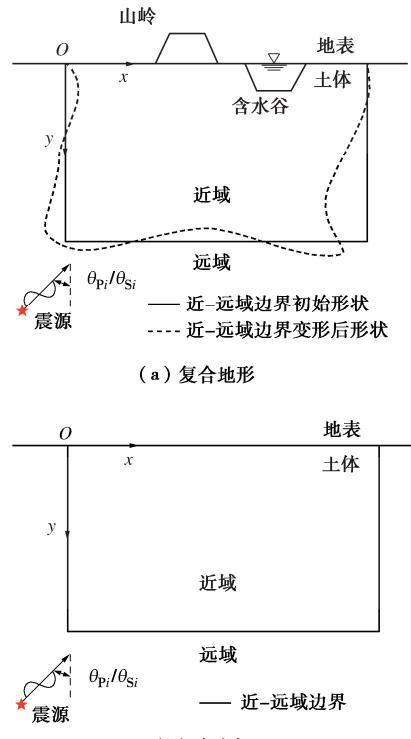


图 1 半无限空间内近-远域边界示意图

Fig. 1 Boundaries of near field in half-space

本文采用 Yang 等<sup>[14]</sup>提出的频域下基于自由场精确解的二维地震动输入法，该方法适用于近断层地震背景下 P/SV 波任意角斜入射工况（包括跨临界角<sup>[14]</sup>），且入射波及次生波波阵面均视为平面形式。需注意，局部地形引起的散射波场使得真实边界响应难以获得，故通常采用自由场边界响应来计算等效地震力<sup>[16]</sup>。该方法<sup>[14]</sup>具体为以下 2 点。

(1) 计算频域下自由场模型近-远域边界上节点的位移  $\{U_b^f\}$  和应力  $\{\sigma_b^f\}$

假定已知的地震加速度时程数据记录于原点 O，并将其视为地震动输入点。通常地震数据中的水平和竖向加速度时程分别对应于 SV 波和 P 波入射工况。故针对每一频率下的地震动输入边界条件均假定：单位水平和竖向加速度分别施加于 SV 波和 P 波入射下的地震动输入点 O。将上述边界条件带入文献[14]所述 P/SV 波斜射下自由场应力和位移的精确解中，可得每个频率下在单位加速度作用下自由场近-远域边界上节点的位移  $\{U_b^f\}$  和应力  $\{\sigma_b^f\}$ 。

(2) 基于给定的地震数据，反算施加于复合场地模型近-远域边界上节点的等效地震力  $F_{eq}$

本文时域分析中采用台中 TCU068 观测站记录的 1999 年集集地震地表加速度时程。其采样间隔为  $\Delta t =$

0.005 s, SV波和P波分别选取图2(a), (b)所示水平向和竖向加速度时程图。对图2进行快速傅里叶变换, 即可得到如图3所示的原始加速度频谱(为便于后文时频转换计算, 此处仅展示原始加速度频谱, 傅里叶谱见文献[17]), 由于 $f > 25$  Hz时频谱幅值几乎为零, 因此本文选取实际频率范围为0~25 Hz<sup>[18]</sup>。对于加速度频谱上(图3)的每一个频率 $\omega$ , 其对应频域下的二维等效地震力 $F_{eq}$ 为

$$\{F_{eq}\} = [F_{rb}] \{U_b^f\} \pm [A] \{\sigma_b^f\} \quad (1)$$

式中:  $[F_{rb}]$ 为无限元的动态阻抗矩阵;  $[A]$ 为将面力转化为节点力的面积矩阵。特别地, 式(1)在近-远域左边界上取“-”, 在右边界和下边界上取“+”。

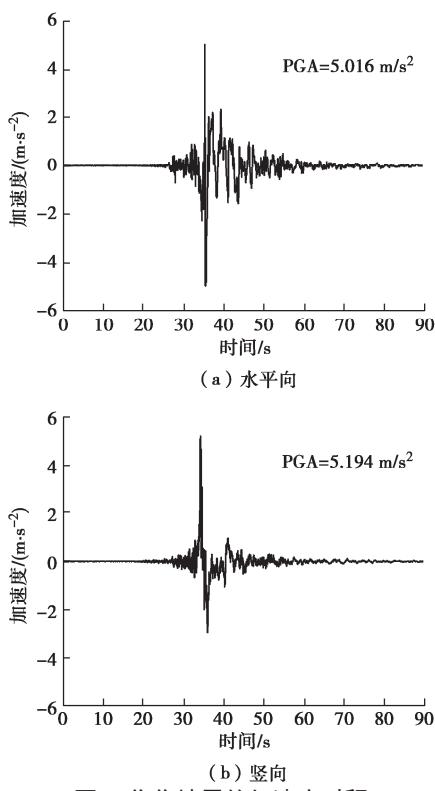


图2 集集地震的加速度时程

Fig. 2 Histories of acceleration of Chi-Chi Earthquake

在本文数值分析中, 由式(1)计算所得等效地震荷载 $\{F_{eq}\}$ 将作为外荷载施加于数值模型的近-远域边界上来计算频域下系统响应。

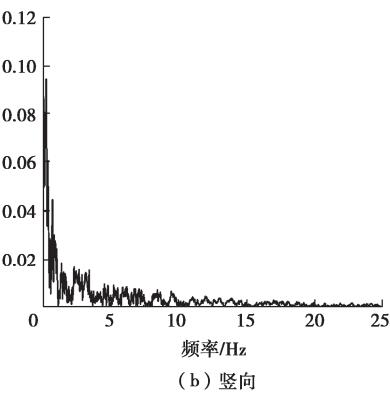
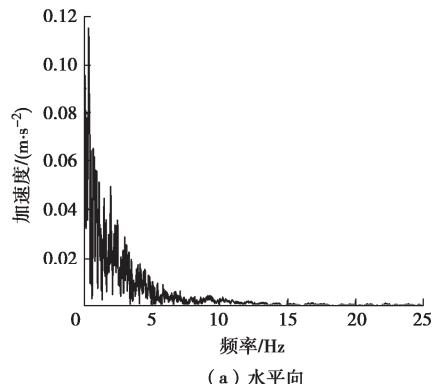


图3 集集地震的原始加速度频谱

Fig. 3 Frequency spectra of original acceleration of Chi-Chi Earthquake

## 2 有限域内的土-水耦合

为考虑局部地形中赋存水体对地震波传特性的影响, 因此需建立考虑水动力效应和土-水耦合效应的数值单元。如图1所示, 含水谷地形存在于近域且由有限单元离散模拟, 因此土-水耦合仅存在于有限域内。

假设本文动力学研究中水体变形属于小变形问题, 即水体密度 $\rho_1$ 和体积弹性模量 $K$ 在计算过程中保持不变。水体在地震作用下并非单一刚体运动, 故本文水体是可压缩的、无黏性的(即水中的摩擦力可忽略, 仅存在P波)<sup>[19]</sup>, 且不考虑其自重。对于水体部分, 超出静水压力的部分动水压力 $p$ 为<sup>[20]</sup>

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c_{p,1}} \ddot{p} \quad (2)$$

式中:  $\nabla^2$ 为二维的拉普拉斯算子;  $c_{p,1}$ 为P波在水中传播的速度。土-水界面和水体自由表面上的边界条件分别为<sup>[19-20]</sup>

$$\frac{\partial p_{int}}{\partial n} = -\rho_1 \dot{A}_{n,int} \quad (3)$$

$$p_{sur} = 0 \quad (4)$$

式中:  $A$ 为界面粒子的位移; 下标 $n$ 为土-水界面的法向方向; 下标int表示土-水界面上的粒子; 下标sur表示水体自由表面上的粒子;  $\cdot\cdot$ 为对时间求二阶导数。

随后, 采用Galerkin形式的加权-残差法对式(2)进行化简, 得到如下矩阵形式的水体离散方程:

$$([\mathbf{H}] - \omega^2 [\mathbf{Q}]) \{p\} = \{\mathbf{B}_{int}\} \quad (5)$$

式中:  $[\mathbf{H}]$ ,  $[\mathbf{Q}]$ 为与水单元的压力形状函数 $N_i$ 相关的矩阵; 向量 $\{\mathbf{B}_{int}\}$ 取决于土-水界面上的法向方向动水压力的形状函数 $N_{i,int}$ ( $\subset N_i$ ),  $N_i$ 与土单元的位移形函数相同。上述矩阵和向量的具体表达式为

$$[\mathbf{H}] = \sum_e \int_{\Omega_e} \left( \frac{\partial \{N_i\}^T}{\partial x} \frac{\partial \{N_i\}}{\partial x} + \frac{\partial \{N_i\}^T}{\partial y} \frac{\partial \{N_i\}}{\partial y} \right) d\Omega \quad ,$$

$$\{\mathbf{Q}\} = \frac{1}{c_{p,i}^2} \sum_e \int_{\Omega_R} \{N_i\}^T \{N_i\} d\Omega , \quad (6a)$$

$$\{\mathbf{B}_{int}\} = \sum_e \int_{S_R} \{N_{i,int}\}^T \frac{\partial p_{int}}{\partial n} dS . \quad (6b)$$

$$\{\mathbf{B}_{int}\} = \sum_e \int_{S_R} \{N_{i,int}\}^T \frac{\partial p_{int}}{\partial n} dS . \quad (6c)$$

式中：对于所考虑的二维问题， $\Omega_R$ ， $S_R$  分别为每个水单元的面积和该单元在土-水界面上的对应长度。

与土-水界面上的水体相关的节点力 $\{F_i\}$ 可由土-水界面上的各个节点的贡献叠加得到：

$$\{F_i\} = [L]\{p_{int}\} , \quad (7)$$

$$[L] = \sum_e \int_{S_R} \{N_{s,int}\}^T \{N_{i,int}\} dS . \quad (8)$$

式中： $\{N_{s,int}\}$  为一个行向量，由土-水界面上的土单元各节点的位移形函数组成。

定义土-水界面上的沿着界面法向方向的土体位移 $\{U_{int}^{nd}\} (\subset N_i)$ ，上标 nd 代表土-水界面上的沿着界面法向方向的土体自由度。土-水界面上的界面粒子的法向加速度 $\{\ddot{A}_{n,int}\}$  可表示为

$$\{\ddot{A}_{n,int}\} = \sum_e \{N_{s,int}\} \{\ddot{U}_{int}^{nd}\}_e . \quad (9)$$

将式(4)代入式(6c)，结合式(9)，并将界面粒子的位移 $\Delta$ 以离散化的形式表示：

$$\{B_{int}\} = -\rho_1 [L]^T \{\ddot{U}_{int}^{nd}\} . \quad (10)$$

随后，将式(10)代入式(5)，结合式(7)可得到：

$$\{F_i\} = -\rho_1 [L][Z]^{-1} [L]^T \{\ddot{U}_{int}^{nd}\} . \quad (11)$$

式中： $[Z] = [H_{int}] - \omega^2 [Q_{int}]$  仅用于简化表达，无具体物理意义。

在自振频率为 $\omega$ 的简谐波外力作用下，土体部分的节点位移响应 $\{U\}$ 可由下式所示的运动方程求得：

$$[\mathbf{K}] - \omega^2 [\mathbf{M}] \{U\} = \{R\} . \quad (12)$$

式中：在近域范围内， $[\mathbf{K}]$  为全局刚度矩阵； $[\mathbf{M}]$  为全局质量矩阵；总的广义节点力 $\{R\}$ 可分为两部分：

$$\{R\} = \{F_{eq}\} + \{F_i\} . \quad (13)$$

式中： $\{F_{eq}\}$  为作用在近-远域边界上的等效地震力； $\{F_i\}$  为土-水界面上与水体相关的节点力。

将式(11)代入式(13)，并将所得项 $\{R\}$ 代入式(12)，即可得在考虑土-水耦合的土体运动方程：

$$[\mathbf{S}]^* \{U\} = \{F_{eq}\} . \quad (14)$$

式中： $[\mathbf{S}]^*$  为等效的结构动态阻抗矩阵，

$$[\mathbf{S}]^* = [S^a] + [S_{int}^{nd}]^* . \quad (15)$$

式中： $[S_{int}^{nd}]^*$  为近域内土-水界面上的土单元节点自由度； $[S^a]$  为近域内其它土单元节点自由度。

$[S_{int}^{nd}]^*$  的具体表达式为

$$[S_{int}^{nd}]^* = [S_{int}^{nd}] - \rho \omega^2 [L][Z]^{-1} [L]^T . \quad (16)$$

式中： $[S_{int}^{nd}]$  代表土体部分的贡献，其余部分代表与土-水界面相关的水体部分的贡献。

### 3 有限/无限元法和二维地震分析程序

#### 3.1 有限/无限元法概述

为模拟波向无限域的传播过程，需在计算域外设置人工边界。常用手段有黏弹性边界（施加阻尼器），透射边界（设定人工波速）等，本文将采用无限单元（构造衰减函数）模拟近域边界。近域中土体和水体均选用 Q8 有限单元离散和模拟；远域则选用退化的 5 节点(D5)无限单元模拟，其位移形函数在局部坐标系 $(\xi, \eta)$  中为<sup>[21]</sup>

$$N_{s1} = \eta(\eta-1)P(\xi)/2 , \quad (17a)$$

$$N_{s2} = -\eta(\eta-1)(\eta+1)P(\xi) , \quad (17b)$$

$$N_{s3} = \eta(\eta+1)P(\xi)/2 . \quad (17c)$$

式中： $P(\xi)$  为局部坐标系下的波传衰减函数，

$$P(\xi) = e^{-\alpha_l \xi} e^{-ik_l \xi} . \quad (18)$$

式中： $\alpha_l$  为位移振幅衰减系数； $k_l$  局部坐标的波数衰减因子； $\alpha_l$  和  $k_l$  具体取值详见文献[14]。

#### 3.2 基于有限/无限元法的二维地震分析程序

山岭-含水谷复合地形的地震动响应计算的二维地震分析程序可概述为以下 3 步：

(1) 地震波数据处理：对于如图 3 所示地震频谱中所关注的频率范围(0~25 Hz)，选择 $\Delta\omega=0.1$  Hz<sup>[18]</sup>的频率增量对其进行划分，以获得频率离散值。

(2) 在频域内求解系统响应：对于每个频率离散值，可通过式(1)计算得等效地震力 $\{F_{eq}\}$ 。随后由式(14)求得频率内近域和边界上节点的位移响应 $\{U\}$ 和加速度响应 $\{\ddot{U}\} = -\omega^2 \{U\}$ 。

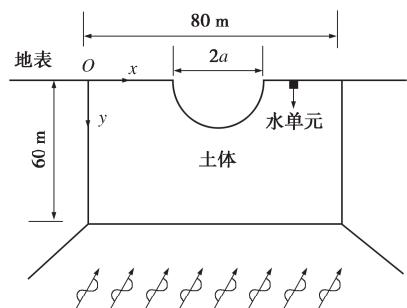
(3) 将频域解变换到时域解：将近域和边界上节点的响应分量乘以对应的加速度频谱值(图 3)，得到每个频率 $\omega$ 的谱响应。然后，对 $\omega$ 进行逆傅里叶变换，即可得近域和边界上的总时程响应。

### 4 实例分析验证

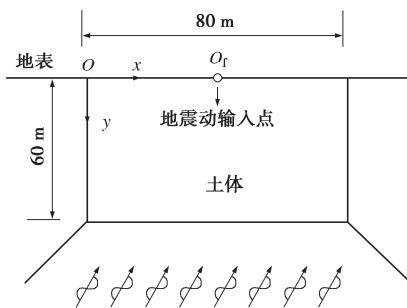
#### 4.1 频域解验证

为验证上述二维地震分析程序中求解系统频域响应的合理性(对应 3.2 节第 2 步)，本节在频域内将程序求解结果与 Luco 等<sup>[15]</sup>的数值解进行对比。由于 Luco 等<sup>[15]</sup>的分析模型中无水单元，故本节验证模型为减小水体的影响仅建立一个水体单元，如图 4(a) 所示。土体的材料属性<sup>[13]</sup>：泊松比 $\nu = 0.33$ ，弹性模量 $E_s = 2$  GPa，密度 $\rho_s = 2000$  kg/m<sup>3</sup>，迟滞阻尼比 $\beta = 0.01$ 。水体的材料属性<sup>[13]</sup>：密度 $\rho_l = 1000$  kg/m<sup>3</sup>，体积弹性

模量  $K = 2 \text{ GPa}$ , P 波在水中的传播速度  $c_{\text{P},l} = 1414 \text{ m/s}$ , 忽略黏度的作用。



(a) 实际分析模型



(b) 相应自由场示意图

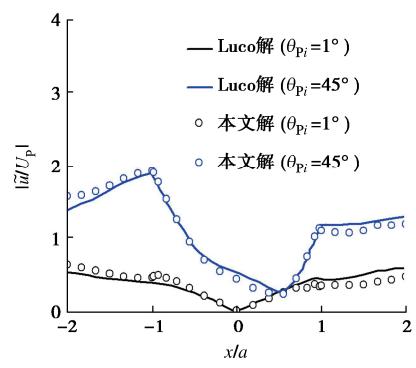
图 4 含单一半圆形峡谷的半无限空间

Fig. 4 Half-space with a semi-circular canyon

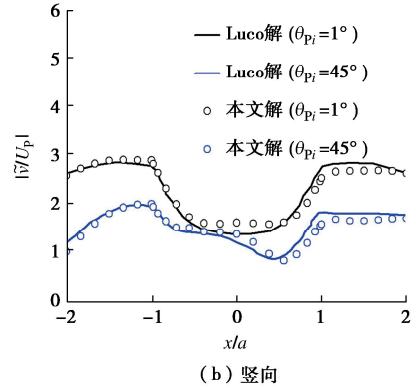
为与 Luco 等<sup>[15]</sup>的解进行比较, 取无量纲频率  $\eta = 2a/\lambda_s = 0.5$ , 其中  $a$  为半圆形峡谷的半径。根据已给定的土体参数和实际计算频率的上限 (25 Hz), 计算得土体中剪切波波长为  $\lambda_s = 24.5 \text{ m}$ , 对应  $a = 6 \text{ m}$ 。土水单元网格尺寸基于  $L \leq \lambda_s/5$  的准则<sup>[18]</sup>取  $L = 2 \text{ m}$ , 为保证散射波通过无限单元能够充分衰减, 定义  $x$  和  $y$  轴方向上局部地形尺寸与近域尺寸之比的最大值为  $S$  (比例系数)。基于文献[13], 模型比例系数取  $S = 0.5$  时在 0~25 Hz 能充分保证无限元对散射波的良好吸收。图 4 所示模型近域尺寸取宽 80 m, 深 60 m, 满足  $S = 0.15 \leq 0.5$ , 故该模型在 0~25 Hz 频率范围所得计算结果是可靠的。此外, 对于 P 波和 SV 波, 分别选取  $\theta_{Pi}$  (或  $\theta_{Si}$ ) 为 1° 或 45° 两种入射工况。

如图 4 (b) 所示,  $O(0, 0)$  点为坐标原点, 地震动输入点设置于  $O_f(40, 0)$ 。通过在  $O_f$  点施加单位水平加速度 (SV 波) 或单位竖直加速度 (P 波) 的边界条件, 应用 3.1 节提出的二维地震分析程序前 2 步, 可得到归一化的地表水平 ( $|\tilde{u}/U_p|$  或  $|\tilde{v}/U_{sv}|$ ) 或竖向 ( $|\tilde{v}/U_p|$  或  $|\tilde{v}/U_{sv}|$ ) 位移幅值, 其中  $U_p$  和  $U_{sv}$  分别代表入射 P 波和 SV 波作用下  $O_f$  处的位移幅值。数值结果连同 Luco 等<sup>[15]</sup>的结果绘于图 5, 6, 分别对应 P 波和 SV 波两种工况。由图 5, 6 可知, 数值结果与 Luco 的结果吻合较好, 这表明二维地震分析程序第 2

步和模型尺寸具有较高的准确度。



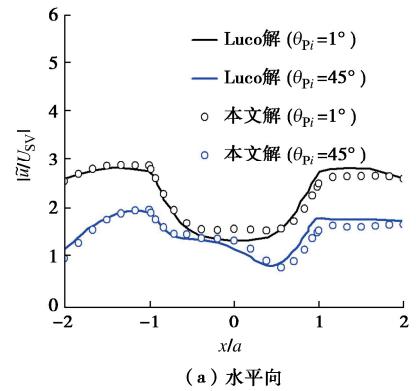
(a) 水平向



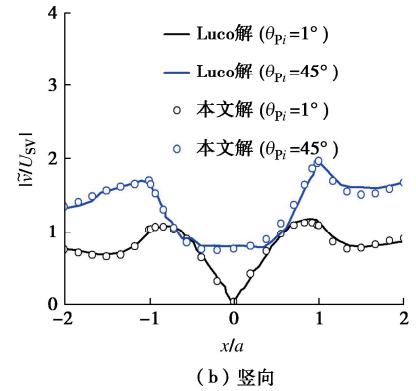
(b) 坚向

图 5 P 波标准化地表位移

Fig. 5 Normalized ground displacements of P-waves



(a) 水平向



(b) 坚向

图 6 SV 波标准化地表位移

Fig. 6 Normalized ground displacements of SV-waves

#### 4.2 时域解验证

为验证上述二维地震分析程序中求解系统时域响应的准确性, 建立如图 7 所示模型, 模型尺寸和材料参数同 4.1 节, 本节选取  $\theta_{p_i}$ (或  $\theta_{s_i}$ )=45° 工况。O(0, 0)点为坐标原点, 地震动输入点设置于点 O(0, 0), 并于 O 点分别输入图 2 所示的集集地震的水平(SV 波)和竖向(P 波)加速度时程, 应用 3.1 节完整的二维地震分析程序计算得到 O 点的加速度时程(反算解), 并同图 2 所示集集地震的加速度时程(原始数据)一起绘于图 8。由图 8 可见加速度时程的反算解和原始数据高度吻合, 证明二维地震分析程序、加速度频谱选取实际频率范围 0~25 Hz 是准确可靠的。

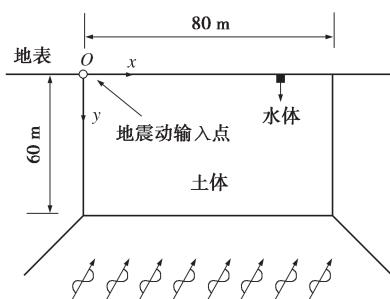


图 7 包含一个水单元的自由场

Fig. 7 Free fields containing a water element

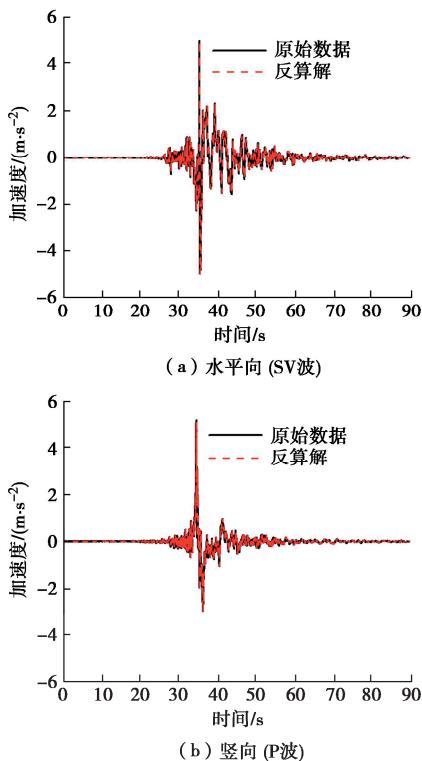


图 8 O 点的加速度时程

Fig. 8 Time histories of ground acceleration at point O

#### 4.3 复合场地模型中土水耦合验证

由于既有文献少有涉及含水局部地形场地地震动

响应的研究, 而文献[13]已采用有限/无限元法研究了单一含水谷地形对场地地震动响应的影响规律。故本节在时域内将求解结果与 Yang 等<sup>[13]</sup>的数值解进行对比, 以验证本文复合场地模型中土水耦合的准确性。假定土壤为均匀黏弹性介质, 土体的材料属性<sup>[13]</sup>: 泊松比  $\nu=0.33$ , 弹性模量  $E_s=2 \text{ GPa}$ , 密度  $\rho_s=2000 \text{ kg/m}^3$ , 迟滞阻尼比  $\beta=0.02$ 。水体忽略黏度, 其材料属性<sup>[13]</sup>: 密度  $\rho_l=1000 \text{ kg/m}^3$ , 体积弹性模量  $K=2 \text{ GPa}$ , P 波在水中的传播速度  $c_{p,l}=1414 \text{ m/s}$ 。

假定山岭和含水谷剖面均为坡角成 45° 的等腰梯形, 为减少山岭的影响, 取山岭宽度和高度分别取 1, 0.2 m, 山岭和含水谷之间距离 1 m, 含水谷宽度 100 m, 则深度取 20 m, 模型总尺寸设置为 400 m×60 m(满足  $S=0.25 \leq 0.5$ ), 如图 9 所示。对于 P 波和 SV 波, 选取  $\theta_{p_i}=\theta_{s_i}=30^\circ$  工况。O(0, 0)点为坐标原点, 地震动输入点设置于点 O, 并分别输入图 2 所示的集集地震的水平(SV 波)和竖向(P 波)加速度时程, 应用二维地震分析程序计算系统时域响应。

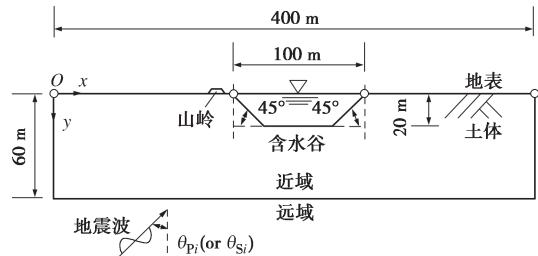
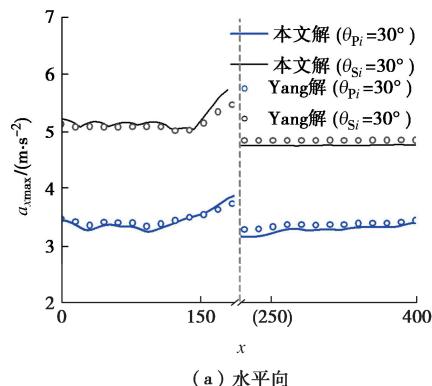


图 9 复合场地退化为单一含水谷地形示意图

Fig. 9 Schematic diagram of irregular topography degraded to valley containing liquid

计算所得地表最大水平加速度  $a_{x\max}$  和最大竖向加速度  $a_{y\max}$  的数值结果(本文解)连同 Yang 等<sup>[13]</sup>的结果分别绘于图 10(a), (b), 其中对图中含水谷所处范围(150~250 m)做横坐标截断处理, 其中灰色虚线代表含水谷。由图知本文解与 Yang 等<sup>[13]</sup>的结果十分吻合, 这表明本文复合场地模型中涉及的土水耦合是准确可靠的。



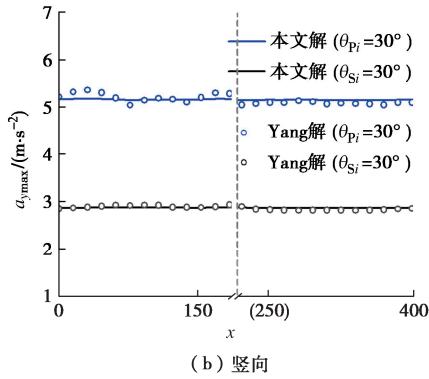


图 10 P/SV 波斜入射下地表最大加速度

Fig. 10 Maximum ground accelerations of P- or SV-waves

## 5 山岭-含水谷复合地形数值分析模型

文献[13]已研究了水体深度、宽度等条件对单一含水谷地形场地地震动响应的影响规律, 本节将在文献[13]基础上进一步研究 P/SV 波斜射下, 地震波入射角度、山岭和含水谷相对位置对复合场地地震响应的影响, 本文建立了“山岭-含水谷”和“含水谷-山岭”复合场地两个模型, 分别如图 11 (a), (b) 所示。模型中土体和水体材料参数同 4.3 节模型保持一致。

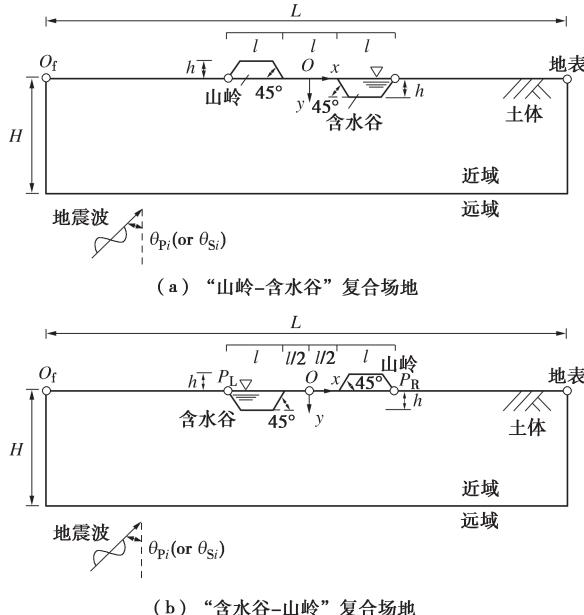


图 11 复合场地数值模型示意图

Fig. 11 Numerical model for irregular topography

假定山岭和含水谷剖面均为坡角成  $45^\circ$  的等腰梯形, 模型尺寸: 山岭底部宽度、含水谷表面宽度以及山岭与含水谷间距均为  $l$ , 山岭和含水谷高度均为  $h$ , 且  $h/l = 0.2$ , 模型总尺寸设置为  $L \times H = 8l \times 2l$  (满足  $S = 3l/L = 0.375 \leq 0.5$ )。为研究真实复合场地尺寸, 取  $l = 50$  m, 则对应  $h = 10$  m, 模型总尺寸  $L \times H = 400 \times 100$  m。以“山岭-含水谷”复合场地模型为例, 对应的有限元网格如图 12 所示, 有限单元网格尺寸基

于  $L \leq \lambda_s/5$  的准则<sup>[18]</sup>取  $L = 3$  m, 有限单元数量为 5262。对图 12 所示模型的水平坐标  $x$  进行无量纲处理, 即  $x/l$ , 其中点  $P_L$  ( $x = -75$  m,  $x/l = -1.5$ ) 和  $P_R$  ( $x = 75$  m,  $x/l = 1.5$ ) 分别代表复合地形地震波入射的“近端”和“远端”。需注意, 基于无量纲处理, 在满足上述有限单元网格尺寸  $L \leq \lambda_s/5$  条件下, 应用图 11 模型计算所得定性和定量结果均适用于等比例放大或缩小的复合场地。

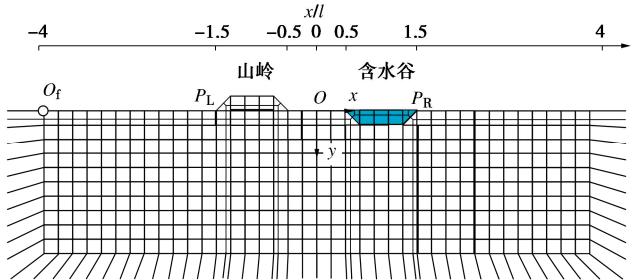


图 12 “山岭-含水谷”复合场地模型对应的有限元网格

Fig. 12 Finite element meshes for irregular topography of hill and water-filled valley

当 SV 波入射角增大到某一临界值时, 原有的反射 P 波将从体波形式转化为了面波形式, 该角度即为 SV 波入射时的临界角<sup>[14]</sup>。由式(19), (20)计算得 SV 波的临界角  $\theta_{sv}^{cr} \approx 35^\circ$ 。故对于 P 波和 SV 波, 入射角度 ( $\theta_{Pi}$  或  $\theta_{Si}$ ) 各选取  $1^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $89^\circ$  共 4 种工况。

$$\theta_{sv}^{cr} = \arcsin(1/V) \quad , \quad (19)$$

$$V = c_{P,s}/c_{S,s} = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\mu} \quad . \quad (20)$$

式中:  $V$  为波速比;  $c_{P,s}$  和  $c_{S,s}$  分别代表 P 波和 SV 波在弹性固体中传播的速度;  $\lambda$  和  $\mu$  为土体的拉梅常数。

如图 11 (a), (b) 所示,  $O(0, 0)$  点为坐标轴原点, 地震动输入点设置在  $O_f(-L/2, 0)$ , 并于  $O_f$  点分别输入图 2 所示的集集地震的水平(SV 波)和竖向(P 波)加速度时程, 应用 3.2 节总结的二维地震分析程序计算系统响应。

## 6 地表地震响应分析

### 6.1 P 波作用下的时域分析

针对“山岭-含水谷”和“含水谷-山岭”两种复合地形工况, 入射角度为  $\theta_{Pi}$  为  $1^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $89^\circ$  的 P 波引致的时域下地表最大水平加速度  $a_{x,\max}$  和竖向加速度  $a_{y,\max}$  沿着  $x/l$  轴的变化分别如图 13, 14 所示。后续分析中, 为便于分析, 对图中山岭、含水谷所处范围 ( $x/l = -1.5 \sim -0.5$  和  $x/l = 0.5 \sim 1.5$ ) 做横坐标截断处理, 其中蓝色虚线代表山岭或含水谷。

首先在时域下讨论 P 波引致的地表最大水平加速度  $a_{x,\max}$ , 如图 13 所示。整体上, 对于“山岭-含水谷”和“含水谷-山岭”工况, 随着 P 波入射角度  $\theta_{Pi}$  的增

加, 地表最大水平加速度  $a_{x\max}$  均会显著增大。当  $\theta_{pi}=1^\circ$  时, 如图 13 (a) 所示, 两种复合地形工况对应的  $a_{x\max}$  均呈现整体相对稳定但伴随轻微波动的变化趋势。当 P 波斜入射时, 如图 13 (b) ~ (d) 所示, 对于“山岭-含水谷”工况, 地震波入射近端(点  $P_L$ ) 的最大水平加速度  $a_{x\max}$  相较远端(点  $P_R$ ) 明显被放大, 且  $a_{x\max}$  在两端的差值随着  $\theta_{pi}$  的增加而显著增大; 对于“含水谷-山岭”工况, 地震波入射近端最大水平加速度  $a_{x\max}$  较远端仅有轻微的放大,  $a_{x\max}$  在两端的差值较小且几乎不随  $\theta_{pi}$  的增加而变化。Yang 等<sup>[13]</sup>研究发现, P 波斜入射时, 含水谷的地震波入射近端的  $a_{x\max}$  相较远端被明显放大。可见当山岭位于含水谷左侧(地震波入射前侧)时, 山岭的存在能一定程度上抑制含水谷对 P 波入射近端  $a_{x\max}$  的放大作用; 而当山岭位于含水谷右侧(地震波入射背侧)时, 抑制作用则不明显。

其次在时域下讨论 P 波引致的地表最大竖向加速度  $a_{y\max}$ , 如图 14 所示。整体上看, 对于“山岭-含水谷”和“含水谷-山岭”两种工况, 地表最大竖向加速度  $a_{y\max}$  的整体幅值随着 P 波入射角度  $\theta_{pi}$  的增加无明显变化, 可见地表最大水平加速度  $a_{x\max}$  对于 P 波入射角  $\theta_{pi}$  变化的敏感性明显大于地表最大竖向加速度  $a_{y\max}$ 。当  $\theta_{pi}=1^\circ$  时, 如图 14 (a) 所示, 两种复合地形工况对应的最大竖向加速度  $a_{y\max}$  均在整体上保持较为稳定的变化趋势。

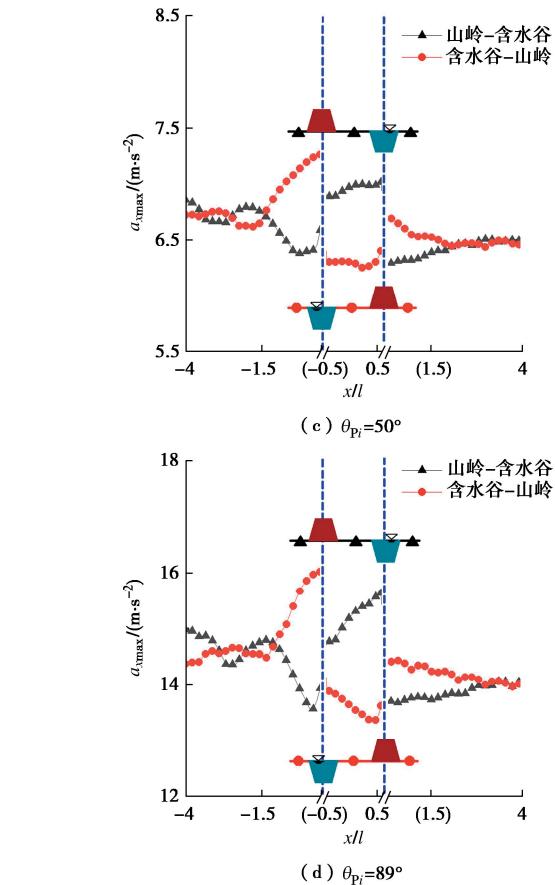
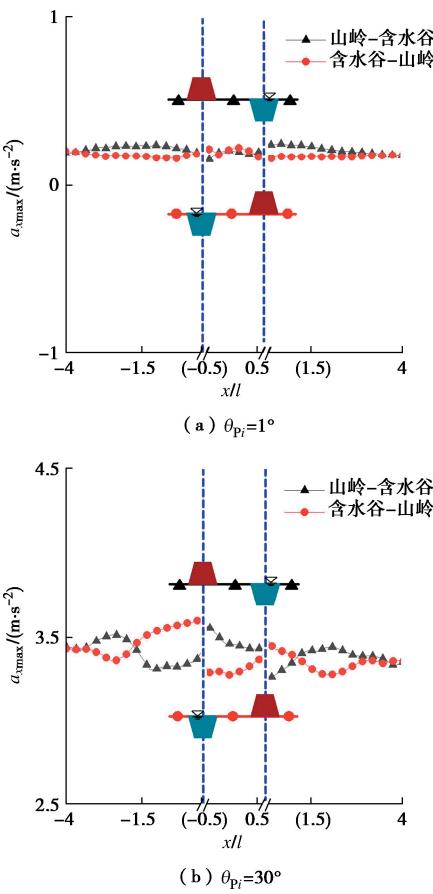
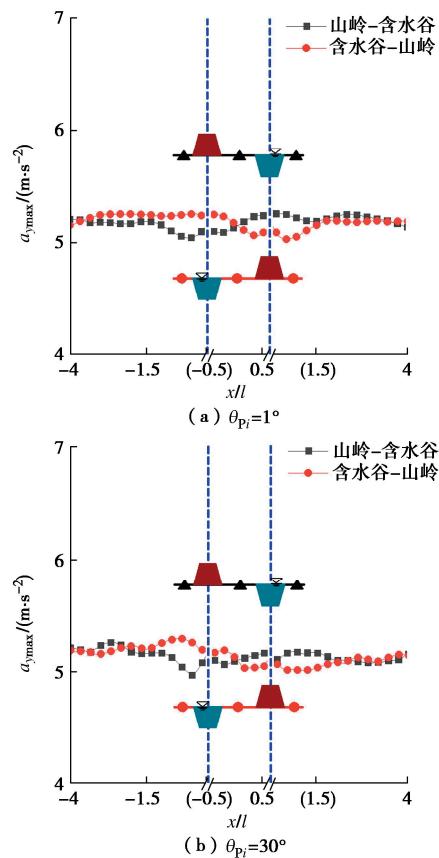


图 13 P 波作用下“山岭-含水谷”和“含水谷-山岭”复合地形的地表最大水平加速度  $a_{x\max}$

Fig. 13 Maximum horizontal ground accelerations of irregular topographies of hill-valley and valley-hill under P-waves



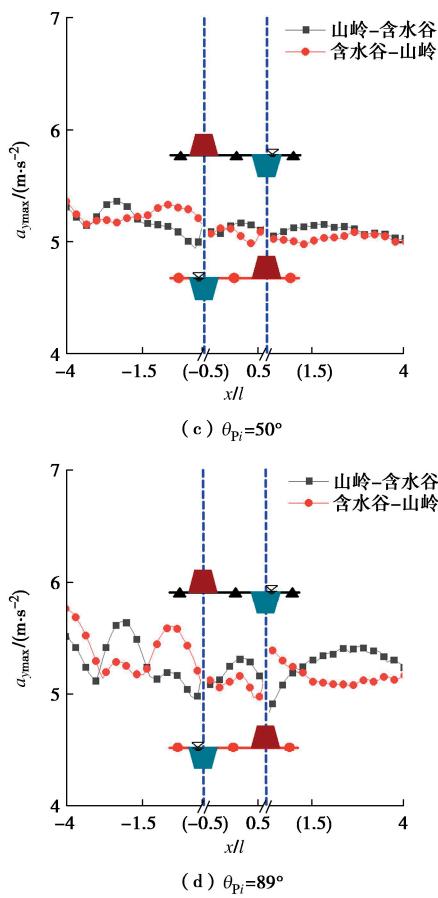


图 14 P 波作用下“山岭-含水谷”和“含水谷-山岭”复合地形的地表最大竖直加速度  $a_{y\max}$

Fig. 14 Maximum vertical ground accelerations of irregular topographies of hill-valley and valley-hill under for P-waves

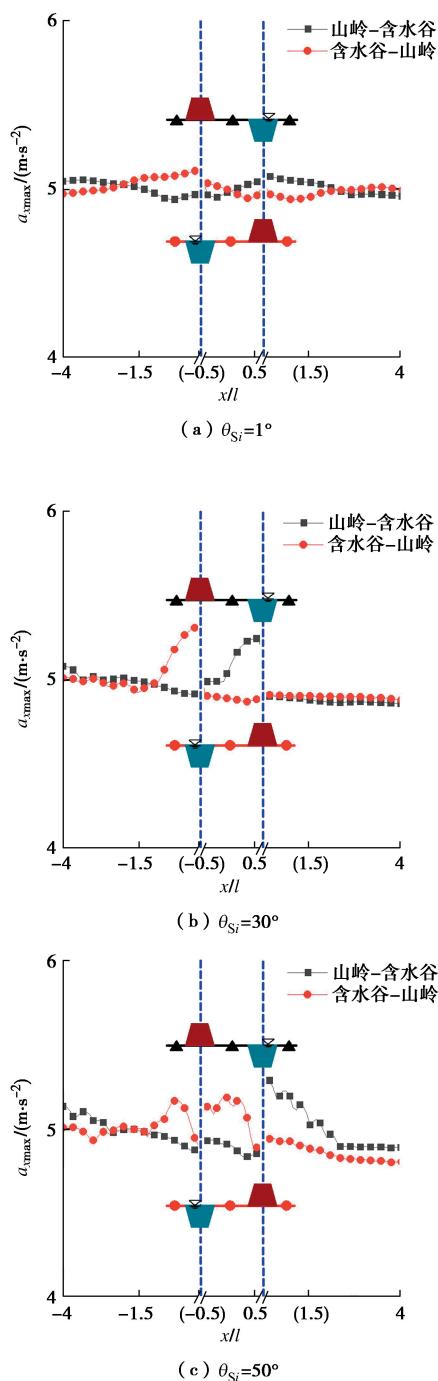
当 P 波斜入射时, 如图 14 (b) ~ (d) 所示, 两种复合地形工况对应的  $a_{y\max}$  在地震波入射近端和远端之间的差值均很小。由此可见, P 波斜入射下, 山岭和含水谷的相对位置关系对地表最大竖向加速度  $a_{y\max}$  影响较小, 而对地表最大水平加速度  $a_{x\max}$  影响较大。

## 6.2 SV 波作用下的时域分析

针对“山岭-含水谷”和“含水谷-山岭”两种工况, 入射角度  $\theta_{Si}$  为  $1^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $89^\circ$  的 SV 波引致的时域下地表最大水平加速度  $a_{x\max}$  和最大竖向加速度  $a_{y\max}$  沿着  $x/l$  轴的变化分别如图 15, 16 所示, 其中 SV 波的临界角  $\theta_{sv}^{cr} \approx 35^\circ$ , 故  $\theta_{Si}=30^\circ$  代表亚临界角,  $\theta_{Si}=50^\circ$ ,  $89^\circ$  代表跨临界角。

首先在时域下讨论 SV 波斜入射引致的地表最大水平加速度  $a_{x\max}$ , 如图 15 所示, 可以发现随着 SV 波入射角度  $\theta_{Si}$  的增加, 两种复合地形工况对应  $a_{x\max}$  的整体幅值均没有明显变化。当  $\theta_{Si}=1^\circ$  时, 如图 15 (a) 所示, 两种复合地形工况对应的  $a_{x\max}$  沿  $x/l$  轴的变化均呈现整体相对稳定的变化趋势。当 SV 波入射角度

$\theta_{Si}$  为  $30^\circ$ ,  $89^\circ$  时, 如图 15 (b), (d) 所示, “山岭-含水谷”工况在地震波入射近端(点  $P_L$ )和远端(点  $P_R$ )之间  $a_{x\max}$  的差值极小; 而“含水谷-山岭”地震波入射近端的  $a_{x\max}$  相较于远端明显被放大。值得注意的是, 对于如图 15 (c) 所示的 SV 波跨临界角工况 ( $\theta_{Si}=50^\circ$ ), 由于跨临界条件带来的地表最大水平加速度  $a_{x\max}$  的剧烈振荡, 导致  $a_{x\max}$  沿横坐标  $x/l$  的变化趋势完全改变, 此时“山岭-含水谷”地震波入射远端的  $a_{x\max}$  相较于近端被明显放大, 而“含水谷-山岭”两端的  $a_{x\max}$  差值反而很小, 这恰恰与其他入射角度的结果相反。



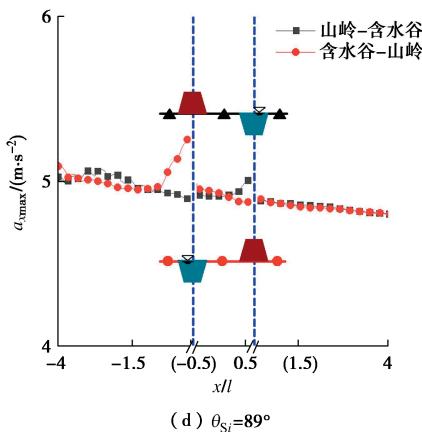
(d)  $\theta_{Si}=89^\circ$ 

图 15 SV 波斜入射下“山岭-含水谷”和“含水谷-山岭”复合地形的地表最大水平加速度  $a_{x\max}$

Fig. 15 Maximum horizontal ground accelerations of irregular topographies of hill-valley and valley-hill under SV-waves

同样地, Yang 等<sup>[13]</sup>研究发现, 一般情况下, 含水谷地形效应引致的水平地震动响应  $a_{x\max}$  在含水谷 SV 波入射近端相较于远端的放大现象仍然存在, 但当 SV 波跨临界角入射时, 含水谷 SV 波入射远端  $a_{x\max}$  相较于近端  $a_{x\max}$  被放大。这说明山岭位于含水谷左侧(地震波入射前侧)时, 能一定程度上抑制含水谷对 SV 波入射近端  $a_{x\max}$  的放大作用, 而当山岭位于含水谷右侧(地震波入射背侧)时, 抑制作用则不明显, 这与 P 波斜入射时的现象类似; 但当 SV 波跨临界角入射时, 当山岭位于含水谷左侧(地震波入射前侧)时, 抑制作用不明显, 当山岭位于含水谷右侧(地震波入射背侧)时, 反而能一定程度上抑制含水谷对 SV 波入射远端  $a_{x\max}$  的放大作用。

其次在时域下讨论 SV 波引致的地表最大竖向加速度  $a_{y\max}$ , 如图 16 所示。随着 SV 波入射角度  $\theta_{Si}$  的增加, 两种复合地形工况对应的地表最大竖向加速度  $a_{y\max}$  的整体幅值均显著增大。特别地, 对于如图 16(c) 所示的 SV 波跨临界角工况 ( $\theta_{Si}=50^\circ$ ),  $a_{y\max}$  的整体幅值被异常放大, 这于 Lee 等<sup>[22]</sup>和 Yang 等<sup>[13]</sup>不考虑上覆水体影响的数值结果一致。对比图 15, 16 可知, 地表最大竖向加速度  $a_{y\max}$  对 SV 波入射角  $\theta_{Si}$  变化的敏感性远大于地表最大水平加速度  $a_{x\max}$ 。

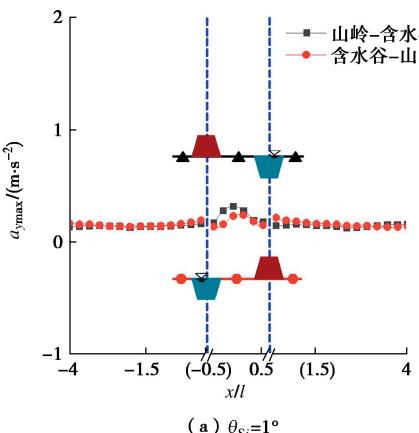
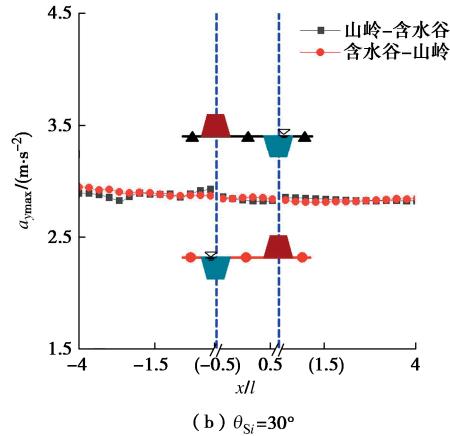
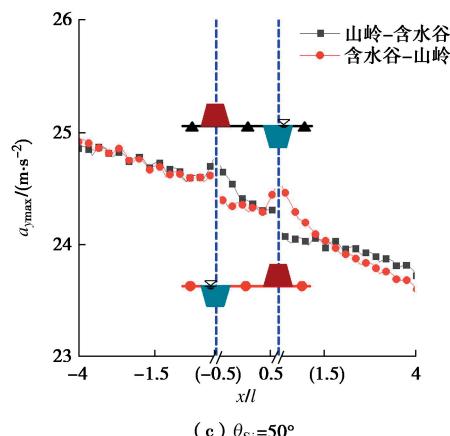
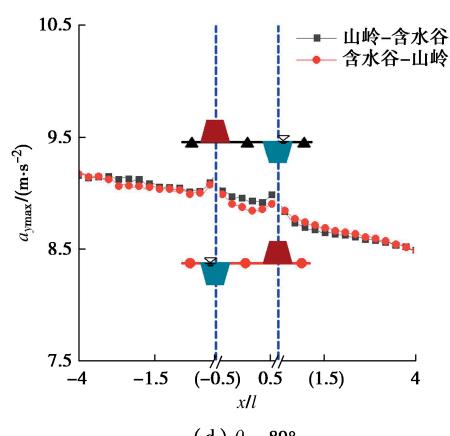
(a)  $\theta_{Si}=1^\circ$ (b)  $\theta_{Si}=30^\circ$ (c)  $\theta_{Si}=50^\circ$ (d)  $\theta_{Si}=89^\circ$ 

图 16 SV 波斜入射下“山岭-含水谷”和“含水谷-山岭”复合地形的地表最大竖向加速度  $a_{y\max}$

Fig. 16 Maximum vertical ground accelerations of irregular topographies of hill-valley and valley-hill under SV-waves

对比图 14, 16 可知, 山岭、含水谷相对位置关系对 SV 波斜射引致地表最大竖向加速度  $a_{y\max}$  的影响相较于 P 波斜射工况更不明显。此外, 根据图 16(a)~(d) 所对应的 SV 波斜入射工况计算结果可以发现, 两种复合地形工况对应的  $a_{y\max}$  在地震波入射近端(点  $P_L$ ) 和远端(点  $P_R$ ) 的差值均很小。这证明山岭和含水谷的相对位置关系对 SV 波斜入射引致的地表最大竖向加速度  $a_{y\max}$  几乎没有影响, 而对地表最大水平加速度  $a_{x\max}$  影响较大。

综上, 对 P/SV 波入射 ( $\theta_{Pi}$  或  $\theta_{Si}=30^\circ$ ,  $50^\circ$ ,

$89^\circ$ ) 引致的两种复合地形近端  $P_L$  和远端  $P_R$  的  $a_{x\max}$  进行了统计对比, 如表 1 所示, 其中“山岭-含水谷”和“含水谷-山岭”复合地形分别用 HV 和 VH 表示。

表 1 复合地形两端的最大水平加速度  $a_{x\max}$   
Table 1 Maximum accelerations at two sides of irregular topography

项目	HV 地形下 $a_{x\max}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	VH 地形下 $a_{x\max}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	对比结果
$\theta_{Pi}=30^\circ$	近端 3.41	3.60	$HV < VH$
	远端 3.26	3.48	$HV < VH$
$\theta_{Pi}=50^\circ$	近端 6.59	7.26	$HV < VH$
	远端 6.29	6.72	$HV < VH$
$\theta_{Pi}=89^\circ$	近端 13.93	16.02	$HV < VH$
	远端 13.71	14.44	$HV < VH$
$\theta_{Si}=30^\circ$	近端 4.93	5.32	$HV < VH$
	远端 4.91	4.92	$HV \approx VH$
$\theta_{Si}=50^\circ$	近端 4.90	4.91	$HV \approx VH$
	远端 5.31	4.96	$HV > VH$
$\theta_{Si}=89^\circ$	近端 4.91	5.27	$HV < VH$
	远端 4.89	4.91	$HV \approx VH$

由表 1 可知, 一般情况下, “山岭-含水谷”两端的  $a_{x\max}$  均不大于“含水谷-山岭”, 仅当 SV 波跨临界角 ( $\theta_{Si}=50^\circ$ ) 入射时, “山岭-含水谷”远端的最大水平加速度  $a_{x\max}$  大于“含水谷-山岭”远端。这意味着一般情况下, 山岭位于含水谷的地震波入射侧时, 复合地形两端受到的地震影响更小。但考虑到地震波的入射方向往往是难以预测的, 因此建筑物的修建仍应远离山岭-含水谷复合地形的两侧, 以避免复合地形对场地地震动的放大作用。

### 6.3 位移频谱分析

由上文时域分析可知, 时域下复合地形两端点的地震动响应差异较大, 故提取复合地形两端点的水平和竖向方向的位移频谱曲线分别如图 17, 18 所示, 分别对应 P 波和 SV 波工况。基于上述时域分析中考虑的 P/SV 波入射角度, 此处选取 3 种工况: P 波一般角度入射工况 ( $\theta_{Pi}=30^\circ$ )、SV 波一般角度入射工况 ( $\theta_{Si}=30^\circ$ )、SV 波跨临界角入射工况 ( $\theta_{Si}=50^\circ$ )。由于地震激励多集中于低频段内, 例如图 3 所示集集地震加速度频谱的主要频带分布于 0~10 Hz, 故图 17, 18 的位移频谱分析限定在该频带内, 纵轴取归一化的地表水平 ( $|\tilde{u}/U_p|$  或  $|\tilde{u}/U_{sv}|$ ) 或竖向 ( $|\tilde{v}/U_p|$  或  $|\tilde{v}/U_{sv}|$ ) 位移幅值, 其中  $U_p$  和  $U_{sv}$  分别代表入射 P 波和 SV 波作用下 O 处的位移幅值。

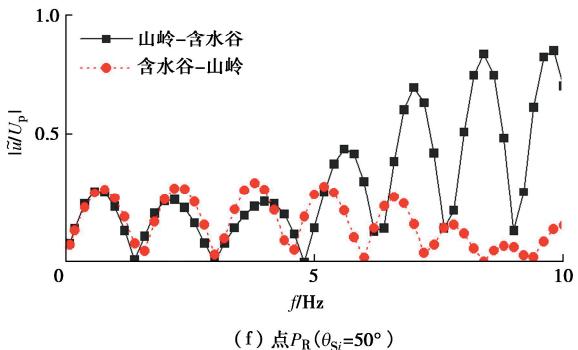
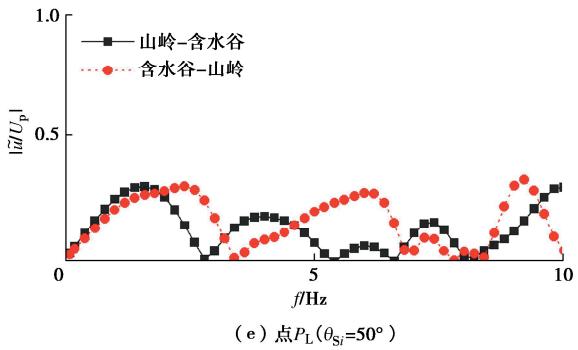
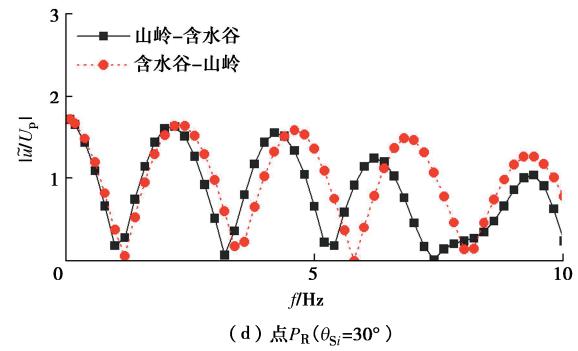
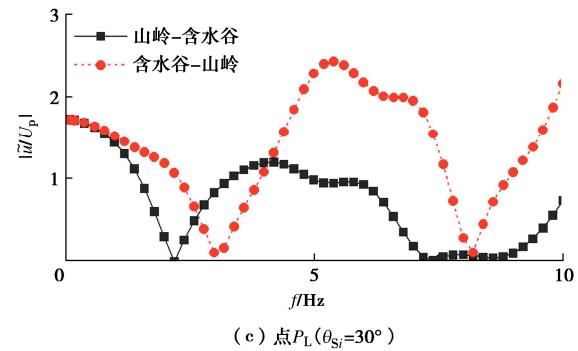
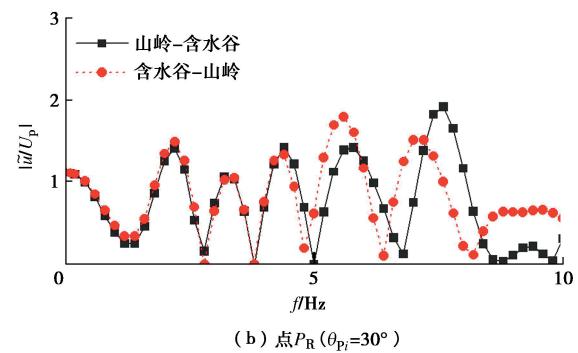
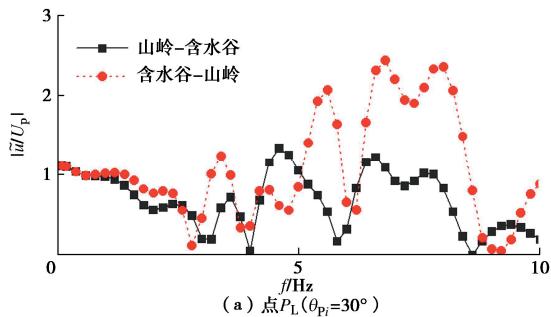


图 17 “山岭-含水谷”和“含水谷-山岭”复合地形两端点水平位移频谱图

Fig. 17 Frequency spectra of horizontal displacement of irregular topographies of hill-valley and valley-hill

如图 17 (a) ~ (d), 当 P/SV 波一般入射时 ( $\theta_{pi}/\theta_{si} = 30^\circ$ ), “含水谷-山岭”地形在左端点  $P_L$  的水平位移频谱在 5~8 Hz 内明显大于“山岭-含水谷”地形, 在右端点  $P_R$  处两类复合地形的水平位移频谱则变化不大。这与图 13 (b), 15 (b) 所示 P/SV 波一般角度入射下, “山岭-含水谷”最大水平加速度  $a_{xmax}$  在地震波入射近端较远端明显被放大的现象是一致的。如图 17 (e), (f) 所示, 对于 SV 波跨临界角入射时 ( $\theta_{si}=50^\circ$ ), “山岭-含水谷”地形在右端点  $P_R$  的水平位移频谱在 5~10 Hz 内明显大于“含水谷-山岭”地形, 在左端点  $P_L$  处两类复合地形的水平位移频谱则变化不大。这与图 15 (c) 所示 SV 波跨临界角入射下, “山岭-含水谷”的最大水平加速度  $a_{xmax}$  在地震波入射远端反而较近端明显被放大的现象是一致的。此外, “山岭-含水谷”和“含水谷-山岭”复合地形右端点  $P_R$  的水平位移频谱相较左端点  $P_L$  均更为振荡, 这是由于右端点  $P_R$  离地震动输入点  $O_f$  较远, 受散射波扰动较大。

观察图 18 (a) ~ (f) 可知, 3 类工况下, “山岭-含水谷”两端的竖向位移频谱和“含水谷-山岭”均相差不大, 这说明山岭、含水谷相对位置对复合地形两端的竖向位移频谱影响较小。这与图 14(b), 16(b), 16(c) 所示 P/SV 波入射下, 山岭和含水谷相对位置对两端最大竖向加速度  $a_{ymax}$  影响甚微的结论是一致的。类似地, 由于右端点  $P_R$  离地震动输入点  $O_f$  较远, 受散射波扰动较大, “山岭-含水谷”和“含水谷-山岭”复合地形右端点  $P_R$  的竖向位移频谱相较左端点  $P_L$  也均更为振荡。

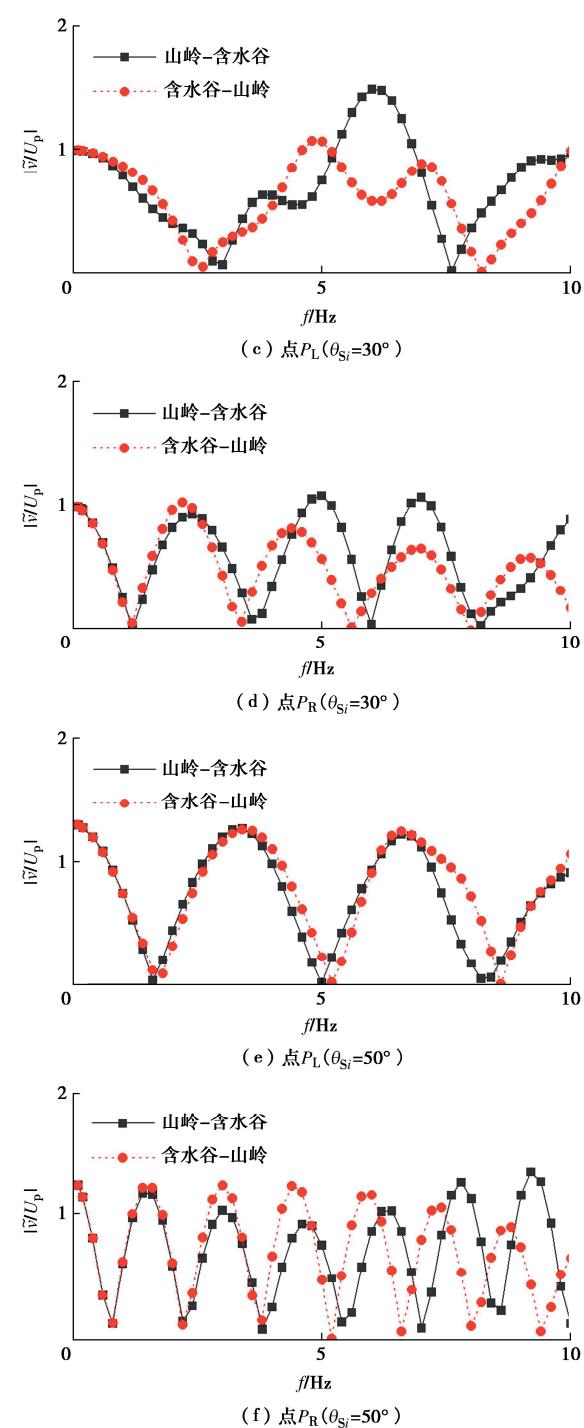
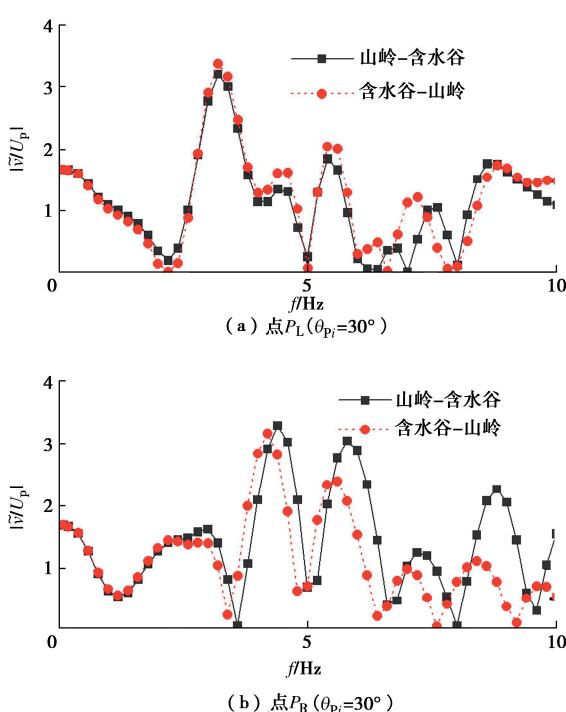


图 18 “山岭-含水谷”和“含水谷-山岭”复合地形两端点竖向位移频谱图

Fig. 18 Frequency spectra of vertical displacement of irregular topographies of hill-valley and valley-hill

## 7 结 论

本文在时域下研究了 P 波和 SV 波作用下山岭、含水谷相对位置关系以及地震波入射角度对复合场地地震响应的影响规律, 并着重讨论了跨临界角的影响, 得到 4 点结论。

(1) 山岭位于含水谷地震波入射前侧时, P 波或 SV 波斜射下地表最大水平加速度在复合地形两端的差值不大; 当山岭位于含水谷地震波入射背侧时, P 波或 SV 波地表最大水平加速度在地震波入射近端被放大。这说明当 P 波或 SV 波斜入射时, 位于含水谷地震波入射前侧的山岭能一定程度上抑制含水谷对地震波入射近端处地表最大水平加速度的放大作用。

(2) SV 波跨临界角入射下, 当山岭位于含水谷地震波入射前侧时, 地表最大水平加速度在复合地形地震波入射远端被放大; 当山岭位于含水谷地震波入射背侧时, 地表最大水平加速度在复合地形两端的差值反而不大。

(3) P/SV 波一般角度入射时, “含水谷-山岭”左端水平位移频谱大于“山岭-含水谷”; SV 波跨临界角入射时, “山岭-含水谷”右端水平位移频谱大于“含水谷-山岭”。山岭、含水谷相对位置对复合地形两端竖向位移频谱影响则较小。

(4) 建筑物的修建应远离山岭-含水谷复合地形的两侧, 以避免复合地形对场地地震动的放大作用。

在后续研究中, 将进一步考虑水体深度、宽度等参数对于山岭-含水谷复合场地地震动响应的影响, 并将研究扩展到其它含水复合地形, 例如山岭-含水谷-山岭复合地形等, 以期评估地震灾害对复杂地形的影响。

## 参考文献:

- [1] 周港圣, 周游, 周正华, 等. 山脊地形效应的强震动观测研究[J]. 地震工程学报, 2022, 44(5): 1110-1116. (ZHOU Gangsheng, ZHOU You, ZHOU Zhenghua, et al. Topographic effect of ridge terrains based on strong motion observation data[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(5): 1110-1116. (in Chinese))
- [2] 李平, 刘红帅, 薄景山, 等. 汶川 Ms8.0 地震含水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. (LI Ping, LIU Hongshuai, BO Jingshan, et al. Effects of river valley topography on anomalously high intensity in the Hanyuan town during the Wenchuan Ms8.0 earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(1): 174-184. (in Chinese))
- [3] CHEN J T, LEE J W, WU C F, et al. SH-wave diffraction by a semi-circular hill revisited: a null-field boundary integral equation method using degenerate kernels[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(5/6): 729-736.
- [4] 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 Yufeng. 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))
- [5] 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. (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. (in Chinese))
- [6] 吕晓棠, 刘殿魁. SH 波入射时半圆形凸起与凹陷地形的地震动[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(5): 14-20. (LÜ Xiaotang, LIU Diankui. Ground motion of a semi-cylindrical hill and a semi-cylindrical canyon caused by incident SH wave[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2006, 26(5): 14-20. (in Chinese))
- [7] AN X, SONG Y Q, YANG Z L, et al. Response of an isosceles trapezoidal hill with a semicircular canyon to plane SH waves[J]. Waves in Random and Complex Media, 2022: 1-19.
- [8] 巴振宁, 吴孟桃, 梁建文, 等. 高山-峡谷复合地形对入射平面 P-SV 波的散射[J]. 应用数学和力学, 2020, 41(7): 695-712. (BA Zhenning, WU Mengtao, LIANG Jianwen, et al. Scattering and diffraction by the hill-canyon composite topography for incident plane P- and SV-waves[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2020, 41(7): 695-712. (in Chinese))
- [9] 高严, 于彦彦. SV 波垂直入射盆山耦合场地对地面运动的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(1): 100-110. (GAO Yan, YU Yanyan. Effects of coupled basin-mountain terrain on seismic ground motion under vertical incident SV waves[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(1): 100-110. (in Chinese))
- [10] 郝明辉, 张郁山. 相邻地形对地震动特性的影响分析[J]. 中国地震, 2015, 31(4): 656-667. (HAO Minghui, ZHANG Yushan. Analysis of the adjacent terrain effect on the properties of ground motion[J]. Earthquake Research in China, 2015, 31(4): 656-667. (in Chinese))
- [11] 金丹丹, 陈国兴, 董菲蕃. 多地貌单元复合场地非线性地震效应特征二维分析 [J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1818-1824. (JIN Dandan, CHEN Guoxing, DONG Feifan. 2D analysis of nonlinear seismic effect characteristics of multi-geomorphic composite site[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 1818-1824. (in Chinese))
- [12] DUZGUN O A, BUDAK A. A study on soil-structure

- interaction analysis in canyon-shaped topographies[J]. *Sadhana*, 2010, **35**(3): 255-277.
- [13] YANG Y B, ZHANG X F, ZHOU Z Y, et al. Seismic analysis of a half-space containing a water-filled valley under 2D oblique incident waves by finite/infinite element method[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023, **169**: 107872.
- [14] YANG Y B, ZHOU Z Y, ZHANG X F, et al. Soil seismic analysis for 2D oblique incident waves using exact free-field responses by frequency-based finite/infinite element method[J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2022, **16**(12): 1530-1551.
- [15] LUCO J E, WONG H L, DE BARROS F C P. Three-dimensional response of a cylindrical canyon in a layered half-space[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1990, **19**(6): 799-817.
- [16] 汪精河. 基于波动理论的高陡边坡山岭隧道洞口地震响应分析[D]. 重庆: 西南交通大学, 2016. (WANG Jinghe. Seismic Response Analysis for Mountain Tunnel Portals in High Steep Slope Based on Wave Theory[D]. Chongqing: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese))
- [17] YANG Y B, ZHOU Z Y, GAO B, et al. Exact free-field response for underwater half-space analysis to oblique 3D seismic waves[J/OL]. *Applied Mathematical Modelling*, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2024.05.011>.
- [18] LIN S Y, HUNG H H, YANG J P, et al. Seismic analysis of twin tunnels by a finite/infinite element approach[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2017, **17**(9): 04017060.
- [19] SAINI S S, BETTESS P, ZIENKIEWICZ O C. Coupled hydrodynamic response of concrete gravity dams using finite and infinite elements[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1978, **6**(4): 363-374.
- [20] ZIENKIEWICZ O C. Coupled vibrations of a structure submerged in a compressible fluid[C]// Proc of Symposium on Finite Element Techniques Held at the University of Stuttgart. Stuttgart, 1969.
- [21] YANG Y B, KUO S R, HUNG H H. Frequency-independent infinite elements for analysing semi-infinite problems[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1996, **39**(20): 3553-3569.
- [22] LEE V W, KARL J. Diffraction of SV waves by underground, circular, cylindrical cavities[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1992, **11**(8): 445-456.