

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2024.05.002

【理论研究】

SV波斜入射作用下梯形沉积河谷场地地震动分析

陈家旺^{1,2}, 黄博^{1,2*}, 凌道盛^{1,2}, 王楠^{1,2}

(1. 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058)

摘要: 河谷场地地震动分布特征研究对高坝等跨河谷工程的抗震设计具有重要意义。采用无限元人工边界结合等效荷载输入方法, 数值分析了梯形沉积河谷的几何参数和地震波入射角对加速度放大系数分布特征的影响。结果表明: 坡度较小河谷的加速度放大系数极大值位置位于河谷中部和两侧, 随着坡度增大, 加速度放大系数极大值位置逐渐远离河谷两侧, 进而向河谷中部距地表一定深度处转移; 对于窄河谷, 河谷两侧影响区域重叠, 导致地震异常剧烈, 地表加速度放大系数远大于宽河谷情况; 随着地震波入射角增大, 加速度放大系数极大值位置由河谷中部往迎波侧移动, 河谷地形效应不断增强, 迎波侧聚焦放大、背波侧滤波减小现象越明显。

关键词: SV波; 斜入射; 沉积河谷; 场地地震动; 放大效应

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)05-0434-10

Seismic motion analysis of a trapezoidal sedimentary valley subjected to obliquely incident SV waves

CHEN Jiawang^{1,2}, HUANG Bo^{1,2*}, LING Daosheng^{1,2}, WANG Nan^{1,2}

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China)

Abstract: Investigating the distribution characteristics of seismic motion in valley sites is crucial for the seismic design of cross-valley projects, such as high dams. The analysis of the impact of geometric parameters of trapezoidal sedimentary valleys and the angle of seismic wave incidence on the distribution characteristics of the acceleration amplification coefficient was conducted using the infinite element artificial boundary and the equivalent load input method. The results show that the valley sites with a low slope exhibit maximum values of acceleration amplification coefficients in the middle and on both sides of the valley. As the slope of valley increases, these maximum values of acceleration amplification coefficients gradually shift away from both sides of the valley and concentrate towards the middle of the valley at a certain depth below the surface. In narrow valleys, there are overlapping influence areas on both sides, resulting in abnormal and intense seismicity, characterized by significantly higher surface acceleration amplification coefficients compared to wider valleys. Moreover, with an increase in the incident angle of seismic waves, the maximum acceleration amplification coefficient shifts from the middle of the valley towards the onshore side, intensifying the topographic effect of the valley. This leads to a pronounced phenomenon of focusing and amplification on the onshore side, while reducing the filtering effect on the opposite side.

Key words: SV wave; obliquely incident; sedimentary valley; site seismic motion; amplification effect

0 引言

河谷场地是一种工程中常见的凹陷地形。近年

来, 随着跨河谷工程的大量涌现, 研究河谷场地地震动分布特征成为了工程抗震设计与分析的关键问题。根据已有的强震观测和研究成果^[1-2], 局部不

收稿日期: 2023-04-06

作者简介: 陈家旺 (1998—), 男, 湖南浏阳人, 硕士, 从事土动力学研究。E-mail: 22012260@zju.edu.cn。

*通信作者: 黄博 (1973—), 女, 江苏南通人, 博士, 教授, 从事土动力学和实验土力学研究。E-mail: cehuangbo@zju.edu.cn。

规则地形及沉积层对地震波传播影响显著。传统地震动一维分析模型无法考虑沉积层不规则几何形状导致的地震波散射和聚焦效应^[3]。除局部场地效应外, 行波效应是引起地震动空间变化的另一重要原因, 地震波斜入射对场地地震响应有很大影响^[4-5]。我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[6]为考虑地震动空间变化性, 建议对复杂场地进行专门研究。

针对河谷场地地震响应研究主要包括台阵监测、解析分析和数值模拟 3 种方法。台阵监测可以真实反映复杂场地地震动传播过程, 实测数据直观、可靠。HUANG 等^[7]在 1992 年花莲地震中监测台湾翡翠河谷时发现, 左岸距谷底 170 m 处的峰值加速度是右岸距谷底 70 m 处的 2.7 倍, 河谷地形效应引起的地震放大和空间非一致性显著。王海云等^[8]基于自贡地形台阵在汶川地震中记录的数据, 发现沉积层区域地震放大效应显著大于无沉积层区域。王文才等^[9]针对 2018 年陕西强地震的台阵数据进行分析, 发现了覆盖土层对地震中频段的地震放大效应。这些监测到的地震现象进一步证实了河谷场地效应。解析法能够揭示地震波散射的规律, 但仅适用于较规则的半圆形或半椭圆形沉积河谷地震响应分析^[10-11]。数值法能够模拟复杂的河谷几何形状以及材料特性, 对各种影响因素进行耦合分析, 具有良好的工程适用性。BARARPOUR 等^[12]研究了梯形无填充河谷的地震动分布, 发现河谷坡度越大, 斜坡上地表加速度越大。孙纬宇等^[13]模拟了 SV 波斜入射下无填充河谷的地震响应, 发现坡顶处地震动放大系数随坡度增大呈线性增大趋势。张建经等^[14]研究了 SH 波斜入射下盆地的地震响应, 盆地坡角对盆地地表加速度峰值分布模式有重要影响, 坡度较小盆地边缘处的地震反应最为强烈。高严等^[15]研究了 SV 波垂直入射下盆地的地震响应, 发现盆地表面放大系数分布受河谷深宽比的强烈影响, 位移放大效应从盆地外边缘到盆地中心逐渐增大。

近年来对河谷场地地震响应模拟方面的研究较多, 但 SV 波斜入射下场地地震响应的研究相对较少, 且研究主要关注于地表的地震动分布。实际工程中随着地基越来越深, 不可避免地需要研究深厚沉积层内部的地震动, 故沉积层内部地震动传播规律的研究十分必要。本文基于无限元人工边界的等效荷载输入方法, 以等腰梯形沉积河谷为研究对象, 初步探讨了河谷几何参数和 SV 波入射角对场

地震动空间分布特征的影响。

1 地震波输入方法

1.1 无限元

在模拟半无限地基时, 需要设置合适的人工边界条件来模拟无限域介质的作用。无限元人工边界能模拟远场地基对地震波能量的吸收作用, 还能够准确模拟无穷远处位移为 0 的边界条件^[16]。在 ABAQUS 中, 无限元人工边界可采用 CINPE4 单元来实现, 其阻尼参数按下式计算:

$$C_T = \rho c_s \tag{1}$$

$$C_N = \rho c_p \tag{2}$$

式中: C_T 、 C_N 分别为切向和法向阻尼系数; c_s 、 c_p 分别为 SV 波和 P 波波速; ρ 为材料密度。

1.2 斜入射等效节点力

HUANG 等^[17]基于弹性波动理论, 推导了针对无限元边界的地震波斜入射等效荷载计算式。下面以平面 SV 波从有限元分析区域左侧边界斜入射为例(如图 1 所示), 给出了入射角小于临界入射角的等效荷载计算式。

底部边界节点:

$$\begin{cases} F_{kx}^y(t) = A_1 \left[\frac{G(\sin^2 \alpha - \cos^2 \alpha)}{c_s} \dot{u}_s(t - \Delta t_4) + C_{TT} \dot{u}_s(t - \Delta t_4) \cos \alpha \right] \\ F_{ly}^y(t) = A_1 \left[\frac{2G \sin \alpha \cos \alpha}{c_s} \dot{u}_s(t - \Delta t_4) + C_{NN} \dot{u}_s(t - \Delta t_4) \sin \alpha \right] \end{cases} \tag{3}$$

左侧边界节点:

$$\begin{cases} F_{kx}^x(t) = A_1 \left[2G \sin \beta \cos \beta / c_s (\dot{u}_s(t - \Delta t_1) + C_{NN} (\dot{u}_s(t - \Delta t_1) \cos \alpha - A_1 \dot{u}_s(t - \Delta t_2))) + (\lambda + 2G \sin^2 \beta) / c_p A_2 \dot{u}_s(t - \Delta t_3) + A_1 \dot{u}_s(t - \Delta t_2) \cos \alpha + A_2 \dot{u}_s(t - \Delta t_3) \sin \beta \right] \\ F_{ly}^x(t) = A_1 \left[G(\sin^2 \alpha - \cos^2 \alpha) / c_s (\dot{u}_s(t - \Delta t_1) + C_{TT} (\dot{u}_s(t - \Delta t_1) \sin \alpha - A_1 \dot{u}_s(t - \Delta t_2))) - 2G \sin \beta \cos \beta / c_p A_2 \dot{u}_s(t - \Delta t_3) - A_1 \dot{u}_s(t - \Delta t_2) \sin \alpha + A_2 \dot{u}_s(t - \Delta t_3) \cos \beta \right] \end{cases} \tag{4}$$

式中: C_{TT} 、 C_{NN} 分别为切向和法向阻尼系数; $\dot{u}_s(t)$ 为位移时程; A_1 为有限元边界节点 l 的影响范围; A_1 为反射 SV 波与入射 SV 波幅值比; A_2 为反射 P 波与入射 SV 波幅值比; G 为剪切模量; λ 为拉梅常数; α 为 SV 波的入射角; β 为反射 P 波的反射角;

Δt_1 、 Δt_2 、 Δt_3 分别为左侧人工边界 l 节点处入射 SV 波、反射 SV 波和反射 P 波的延迟时间； Δt_4 为底部人工边界 l 节点处入射 SV 波的延迟时间；等效荷载上标表示节点所在有限元边界界面的外法线方向，下标表示节点号和分量方向，负号代表与坐标轴方向相反。

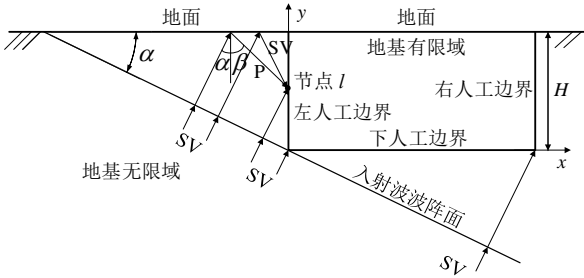


图1 平面 SV 波斜入射示意图

Fig. 1 Diagram of plane SV-wave oblique incidence

SV 波的临界入射角 α_c 可按下式计算：

$$\alpha_c = \arcsin\left(\frac{c_s}{c_p}\right) = \arcsin\left(\sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}}\right) \quad (5)$$

式中： ν 表示截断边界处材料的泊松比。

当入射角 $\alpha=0^\circ$ 时，式 (3) ~ (4) 可退化为阳栋等^[18] 提出的 SV 波垂直入射情况。本文利用 MATLAB 编写基于波动理论的地震波等效边界荷载计算程序，在 ABAQUS 中实现了非一致地震波的输入。

1.3 方法验证

为了验证平面 SV 波斜入射等效节点力公式的正确性，将本文所述数值方法与地震波斜入射解析解^[19] 进行比较。

假定在均匀弹性半空间中，介质密度为 $1\,900\text{ kg/m}^3$ ，剪切波速为 260 m/s ，泊松比为 0.35 ，临界入射角为 28.71° ，入射简谐波的频率为 1 Hz ，振幅为 1 cm ，入射角为 20° 。均质地基斜入射计算模型如图 2 所示，选取有限元计算区域宽 500 m 、高 100 m ，单元尺寸与最小波长比值不大于 $1/6\sim 1/8$ ^[20]，故采用边长 4 m 的四节点平面应变单元划分网格。

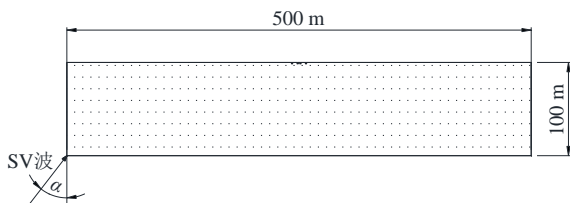


图2 均质地基斜入射计算模型

Fig. 2 Calculation model of oblique incidence for homogeneous foundation

两种计算方法得到的 SV 波入射角为 20° 时地表中心点水平应力时程如图 3 所示。可知，本文方法计算的应力曲线与解析解吻合较好，说明了本文 SV 波输入方法和程序的正确性。

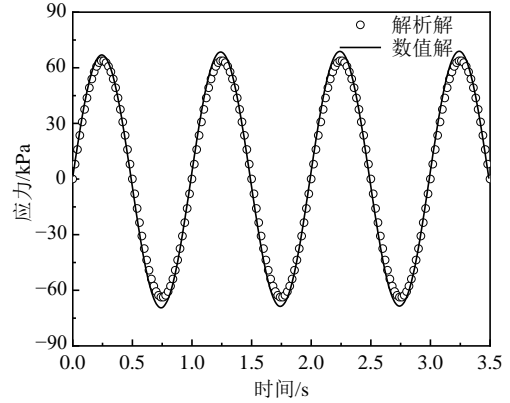


图3 SV 波入射角为 20° 时地表中心点水平应力时程

Fig. 3 Horizontal stress-time series at the center point of the surface when the incident angle of SV wave is 20°

2 沉积河谷计算模型及参数

2.1 计算模型

根据某实际工程场地，概化为如图 4 所示的等腰梯形沉积河谷计算模型。河谷坡度为 θ ，沉积层底部宽度为 a ，沉积层顶部宽度为 b ，沉积层深度为 h ，沉积层底部至基岩顶部厚度为 H 。该模型为缺省几何模型，如无特别说明，采用表 1 所示参数。以沉积层顶部中点为原点建立坐标系，在沉积层地表设置 3 个观测点， $x_0=0\text{ m}$ ， $x_c=700\text{ m}$ ， $x_c=-700\text{ m}$ ，假定 SV 波从模型左侧入射，入射角为 α 。

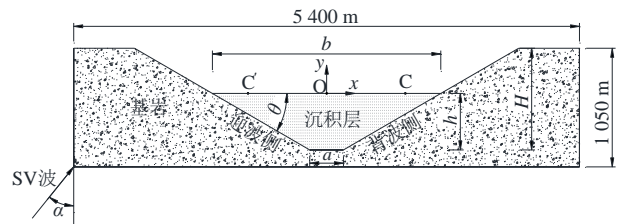


图4 等腰梯形沉积河谷计算模型

Fig. 4 Calculation model of isosceles trapezoidal sedimentary valley

表1 场地缺省几何参数

Table 1 Default geometric parameters of site

坡度/ ($^\circ$)	底部宽度/ m	顶部宽度/ m	沉积土深度/ m	基岩深度/ m
30	300	2 032	500	900

表 2 为材料力学参数，临界入射角 $\alpha_c \approx 32.3^\circ$ ，故本文入射角最大值取 30° 。基岩为均质、各向同

性弹性材料, 沉积层为黏弹性材料, 采用瑞利阻尼模拟土体阻尼, 阻尼矩阵 C 可按下式计算:

$$C = \alpha_1 M + \beta_1 K \quad (6)$$

式中: α_1 为质量比例阻尼; β_1 为刚度比例阻尼; M 为质量矩阵; K 为刚度矩阵。

表 2 材料力学参数

Table 2 Mechanical parameters of materials

介质	密度/(kg/m ³)	剪切波速/(m/s)	泊松比
沉积层	1 900	260	0.35
基岩	2 300	1 800	0.30

采用 HUDSON 等^[21] 提出的 QUAD4 法计算阻尼:

$$\alpha_1 = 2\zeta \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (7)$$

$$\beta_1 = 2\zeta \frac{1}{\omega_1 + \omega_2} \quad (8)$$

式中: ω_1 为模型固有频率, 经试算, 模型一阶固有频率为 0.24 Hz; $\omega_2 = n\omega_1$, n 为大于 ω_c/ω_1 的奇数, ω_c 为地震波卓越频率; ζ 为阻尼比, 根据 NEJATI 等^[22] 建议, 沉积层阻尼比取 5%。

采用人工边界模拟地基辐射阻尼时, 孔宪京等^[23] 建议将地基截取范围取所关注区域长度的 0.3~0.5 倍, 经试算, 选取有限元计算区域宽 5 400 m、高 1 050 m, 采用三节点平面应变单元 (CPE3) 和四节点平面应变单元 (CPE4) 划分网格 (如图 5 所示)。单元尺寸与最小波长比值不大于 1/6~1/8^[20], 经试算, 沉积层单元边长设置为 2~4 m, 基岩单元边长设置为 4~25 m, 基岩近场区域单元边长为 4 m, 基岩远场区域单元边长为 25 m, 单元数为 41 133 个, 节点数为 41 332 个, 取固定增量步长为 0.005 s。在模型侧面和底面施加无限元人工边界。

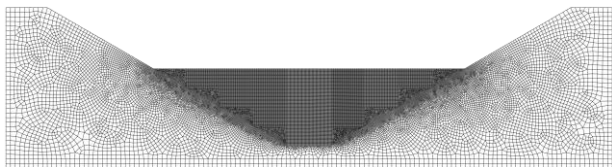


图 5 梯形沉积河谷有限元模型

Fig. 5 Finite element model of trapezoidal sedimentary valley

2.2 输入地震波

本文选取 Ricker 波作为基岩输入 SV 波, 为探讨入射地震波卓越频率对河谷场地地震响应的影响, 基于场地固有频率, 选取卓越频率为 1.5 Hz 和 4.5 Hz 的两种 Ricker 波, 分别记为 Ricker 1 和 Ricker 2。Ricker 波加速度时程、傅里叶谱如图 6~8 所示。

如无特别说明, 本文采用 Ricker 1 作为输入地震波。

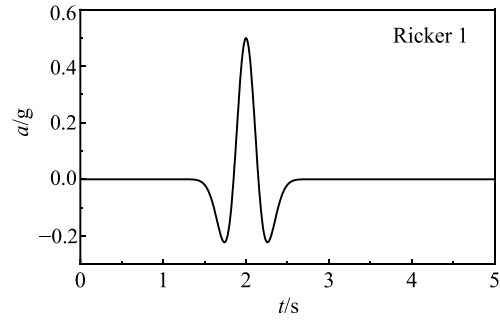


图 6 Ricker 1 波加速度时程

Fig. 6 Acceleration time history of Ricker 1

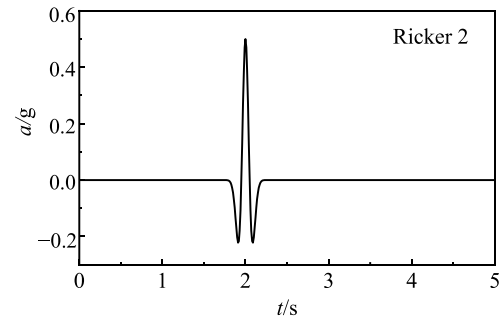


图 7 Ricker 2 波加速度时程

Fig. 7 Acceleration time history of Ricker 2

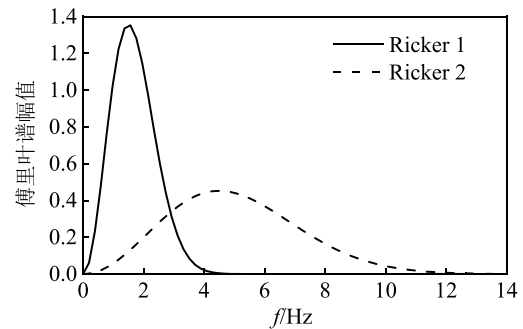


图 8 傅里叶谱

Fig. 8 Fourier spectrum

3 场地地震动响应分析

3.1 地震波卓越频率对场地响应的影响

为了对比分析 SV 波入射作用下沉积河谷地震放大效应, 以沉积层底部中点加速度峰值为基准, 任意观测点加速度峰值 A 与基准点加速度峰值 A_0 之比为加速度放大系数 η , 即:

$$\eta = \frac{A}{A_0} \quad (9)$$

图 9 为地震波垂直入射时基岩表面加速度放大系数分布。对于谷底两侧, 随着 $|x|$ 增大, 加速度放大系数不断增大, 且在谷底中心出现了加速度放大系数极大值, 这是典型的河谷地形放大效应, 与高

玉峰^[2]、孙纬宇等^[13]的研究结果一致。谷底中心至坡脚处，加速度放大系数明显降低，是因为坡脚处基岩一部分水平、另一部分倾斜，使得该处表面积增大，在输入地震波能量一定时，导致坡脚处能量密度小于谷底中心，故在谷底中心出现了显著地震放大。

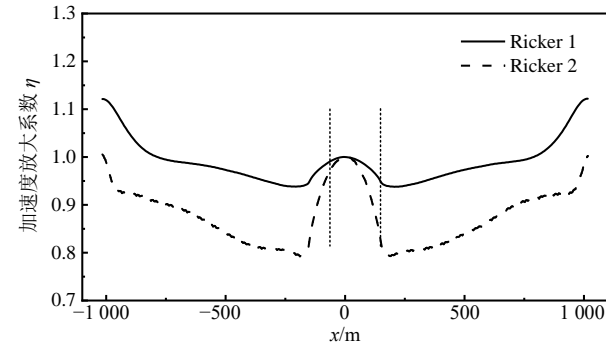


图 9 地震波垂直入射时基岩表面加速度放大系数分布
Fig. 9 Distribution of acceleration amplification coefficient of bedrock surface when seismic wave is vertically incident

图 10 为地震波垂直入射时沉积层地表加速度放大系数分布。在 Ricker 1 作用下，地表为地震放大，而在 Ricker 2 作用下，地表中部为地震动衰减，地表两侧为地震放大，距地表中部越远，两者放大系数差值越小。图 11 和图 12 分别为 Ricker 1 和 Ricker 2 垂直入射时沉积层加速度放大系数云图。低频地震波 Ricker 1 入射时，加速度放大系数明显大于高频地震波 Ricker 2 入射的情况。

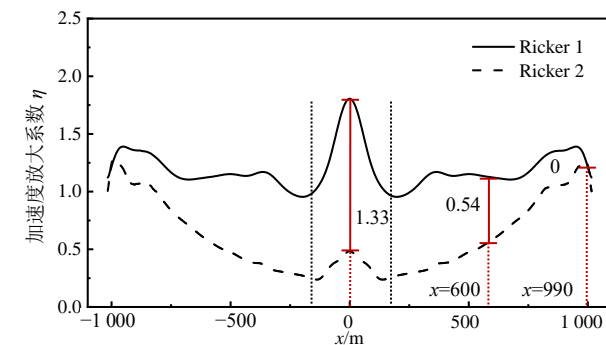


图 10 地震波垂直入射时沉积层地表加速度放大系数分布
Fig. 10 Distribution of acceleration amplification coefficient at the surface of sedimentary layer when seismic wave is vertically incident

造成上述差异的主要原因是：对于河谷中部，土层效应占据主导地位，由于沉积层阻尼影响，当 Ricker 1 入射时，如图 13 所示，地震波低频成分被放大，故河谷地表中部地震响应强烈，而当 Ricker 2 入射时，如图 14 所示，地震波高频成分被过滤，导致河谷中部地震衰减。对于河谷边缘，地形效应

占据主导地位，故两种情况下均表现为地震放大。

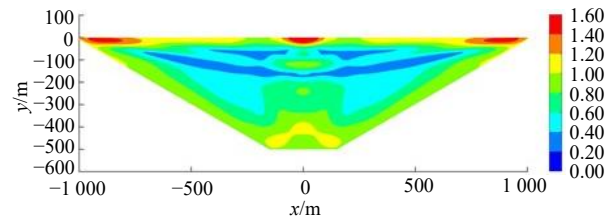


图 11 加速度放大系数云图 (Ricker 1)

Fig. 11 Nephogram of acceleration amplification coefficient (Ricker 1)

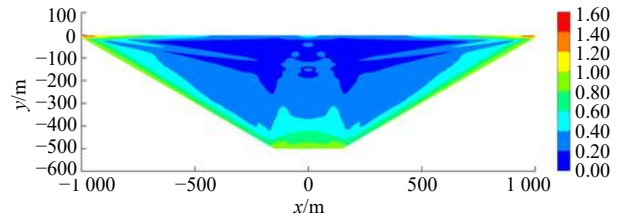


图 12 加速度放大系数云图 (Ricker 2)

Fig. 12 Nephogram of acceleration amplification coefficient (Ricker 2)

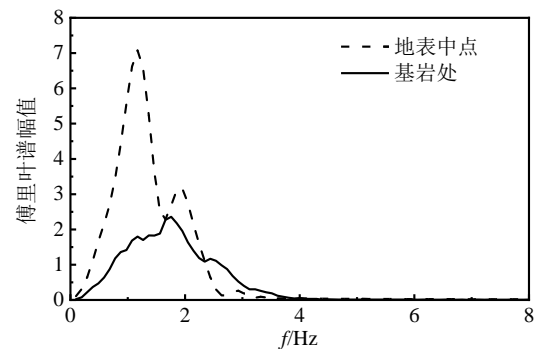


图 13 傅里叶谱 (Ricker 1)

Fig. 13 Fourier spectrum (Ricker 1)

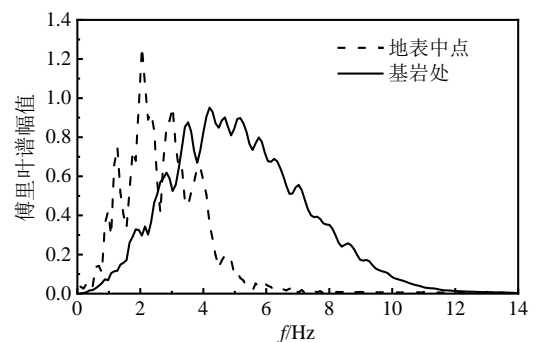


图 14 傅里叶谱 (Ricker 2)

Fig. 14 Fourier spectrum (Ricker 2)

3.2 沉积河谷坡度对场地响应的影响

为了探究河谷坡度对沉积河谷地震响应的影响，选取坡度不同的 3 个河谷 ($\theta=30^\circ、45^\circ、60^\circ$)，保持 a 和 h 不变，进行分析。

图 15 为不同坡度时加速度放大系数云图。河谷坡度对加速度放大系数分布模式有显著影响，当坡度较小时 (如图 15 (a) 所示)，加速度放大系数极大值

位置主要分布在河谷中部和两侧; 而当坡度较大时 (如图 15 (c) 所示), 加速度放大系数极大值位置逐渐远离河谷两侧, 向中部转移, 且出现在中部距地表一定深度处。场地加速度放大系数峰值及位置见表 3。

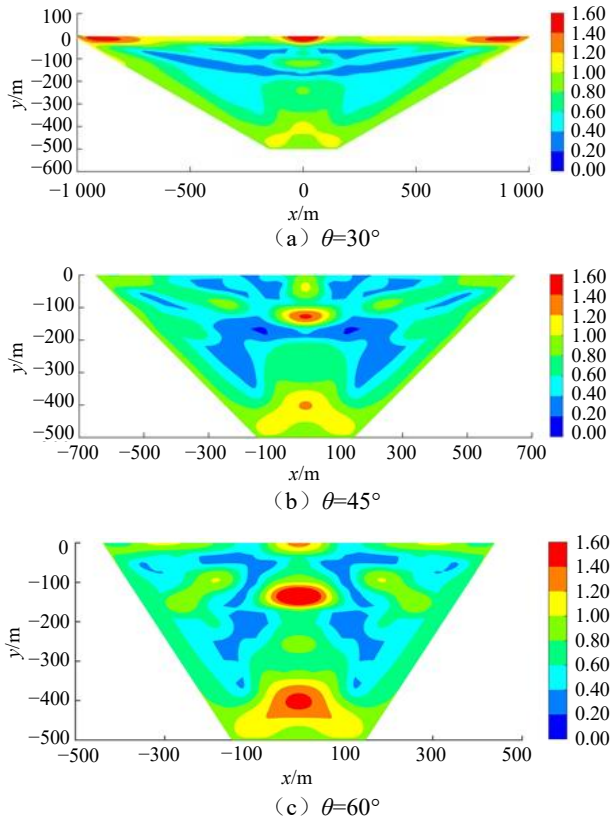


图 15 不同坡度时加速度放大系数云图

Fig. 15 Nephogram of acceleration amplification coefficient at different slopes

表 3 场地加速度放大系数峰值及位置

Table 3 Peak value of site acceleration amplification coefficient and its position

坡度	$\theta=30^\circ$	$\theta=45^\circ$	$\theta=60^\circ$
放大系数峰值	1.81	1.44	1.88
坐标	(0,0)	(0,-130)	(0,-135)

图 16 展示了沉积层中线处加速度放大系数随深度分布的变化。结果表明, 加速度放大系数变化趋势总体上相似, 放大系数最大值出现的位置不同。当坡度为 30° 时, 沉积层仅在 40 m 深度范围内表现为地震放大, 地表放大系数最大; 而当坡度为 60° 时, 在中线处出现了 3 个显著的地震放大区域。随着坡度增大, 地表处放大系数先减小后增大。对于沉积层深部 ($y=-135\text{ m}$ 和 $y=-400\text{ m}$), 加速度放大系数随着坡度增大而增大。在实际工程中, 河谷坡度越大, 加速度放大系数最大值越可能出现在沉积层中, 此时发生液化或软化的可能性急剧增大。

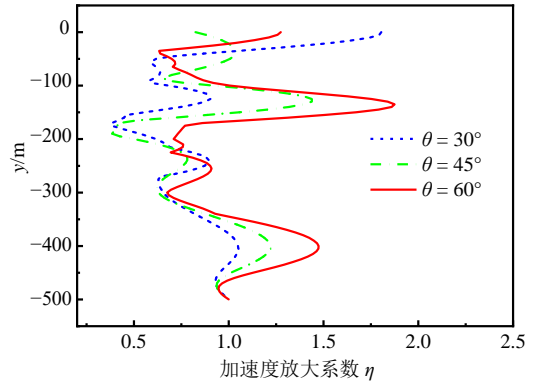


图 16 $x=0$ 处加速度放大系数随深度分布

Fig. 16 Distribution of acceleration amplification coefficient with depth at $x=0$

3.3 沉积河谷宽度对场地响应的影响

为了探究沉积河谷宽度对沉积河谷地震响应的影响, 保持 θ 和 h 不变, 对比分析 $a=300\text{ m}$ 和 $a=1\,800\text{ m}$ 两种情况。

图 17 为沉积层地表中点左部加速度放大系数分布。当宽度较小时, 河谷场地效应显著, 此时地表加速度放大系数大于 1。当 $a=1\,800\text{ m}$ 时, 河谷场地效应影响范围仅限于靠近河谷两侧 1 300 m 内的区域。当距边缘大于 1 300 m 时, 加速度放大系数趋于稳定, 表现为地震衰减。

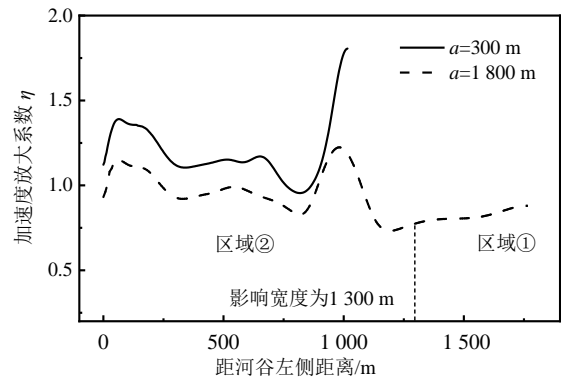


图 17 沉积层地表中点左部加速度放大系数分布

Fig. 17 Distribution of acceleration amplification coefficient at the left part of the surface midpoint of the sedimentary layer

图 15 (a) 和图 18 分别为 $a=300\text{ m}$ 和 $a=1\,800\text{ m}$ 时加速度放大系数云图。结果表明, 对于宽河谷, 沉积层可分为 3 个放大区域: 河谷中部 (区域①) 表现为二维土层放大, 河谷两侧 (区域②和③) 表现为地形放大与土层放大叠加。对于某河谷, 存在临界宽度, 当河谷宽度小于临界宽度时, 河谷两侧影响区域 (区域②和③) 重叠, 导致地震异常剧烈, 地表加速度放大系数远大于宽河谷的情况。

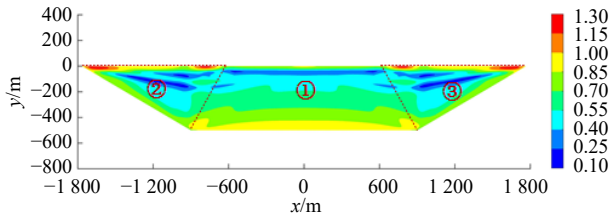


图 18 加速度放大系数云图 ($a=1800\text{ m}$)

Fig. 18 Nephogram of acceleration amplification coefficient ($a=1800\text{ m}$)

3.4 地震波入射角对场地响应的影响

为了探究地震波入射角对沉积河谷地震响应的影 响,对比分析地震波以不同角度 ($\alpha=0^\circ$ 、 10° 、 20° 、 30°) 入射时场地加速度放大系数分布的变化规律。

图 19 为沉积层地表加速度放大系数分布。由图 19 可知,斜入射时地表开始出现地震衰减,加速度放大系数随入射角变化较为复杂,迎波侧地表加速度放大系数分布受入射角影响最大、中部次之、背波侧地表最小。图 20 为地表中部放大系数峰值位置随入射角的变化,如图 20 所示,随着入射角的增大,地表中部加速度放大系数峰值不断右移。当入射角较小时,地表加速度放大系数最大值位于中部,入射角增大至 30° 时,地表中部加速度放大系数为次大值,而地表放大系数最大值出现在迎波侧。

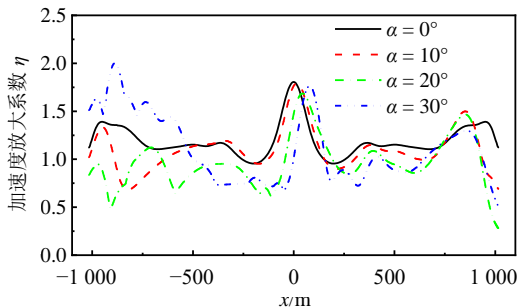


图 19 沉积层地表加速度放大系数分布

Fig. 19 Distribution of acceleration amplification coefficient at the surface of sedimentary layer

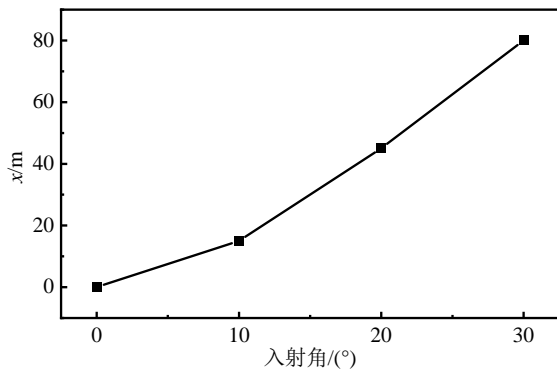


图 20 地表中部放大系数峰值位置随入射角的变化
Fig. 20 Variation of the peak position of amplification coefficient in the middle of the ground surface with the incident angle

图 21 为各点加速度放大系数随入射角变化。可知, O 点加速度放大系数随入射角增大而不断减小,最不利入射角为 0° 。C'点加速度放大系数随入射角的增大先减小后增大,最不利入射角为 30° 。C 点加速度放大系数变化不显著。图 22 为场地加速度放大系数峰值随入射角变化。如图 22 所示,加速度放大系数峰值随入射角的增大先减小后增大,最不利入射角为 30° ,此时加速度放大系数峰值是入射角为 20° 时的 1.2 倍。

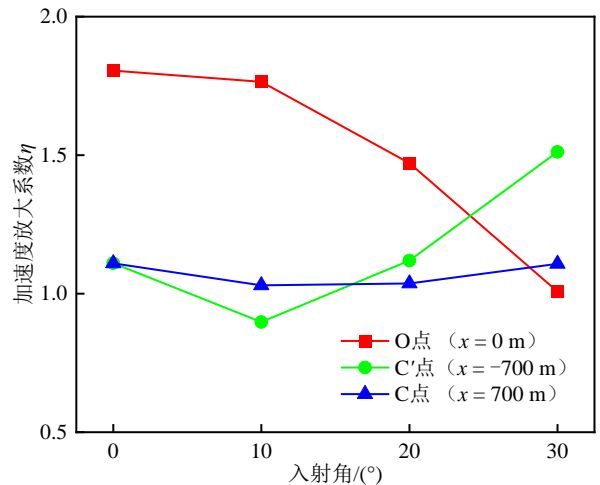


图 21 O、C 和 C'点加速度放大系数随入射角变化

Fig. 21 Variation of the acceleration amplification coefficient with the incident angle at nodes O, C and C'

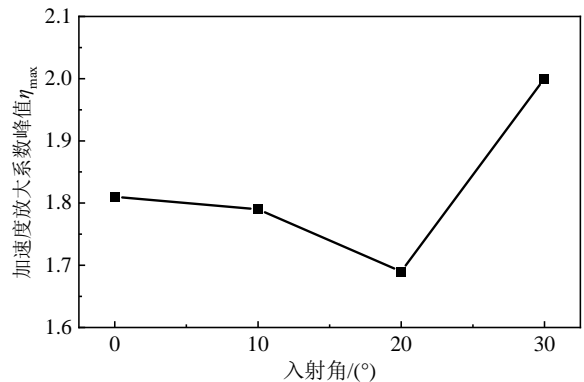


图 22 场地加速度放大系数峰值随入射角变化

Fig. 22 Variation of peak value of site acceleration amplification coefficient with incident angle

图 23 为不同入射角时加速度放大系数云图。随着入射角增大,放大系数不对称现象越明显。当 $\alpha=10^\circ$ 时,加速度放大系数分布与垂直入射时相似。当入射角增大至 20° 时,背波侧加速度放大系数小于 1 的区域增大,而迎波侧该区域减小。当 $\alpha=30^\circ$ 时,迎波侧地震放大区域和背波侧地震衰减区域进一步扩大。可见,随着入射角增大,迎波侧聚焦放大、背波侧滤波减小现象越明显。

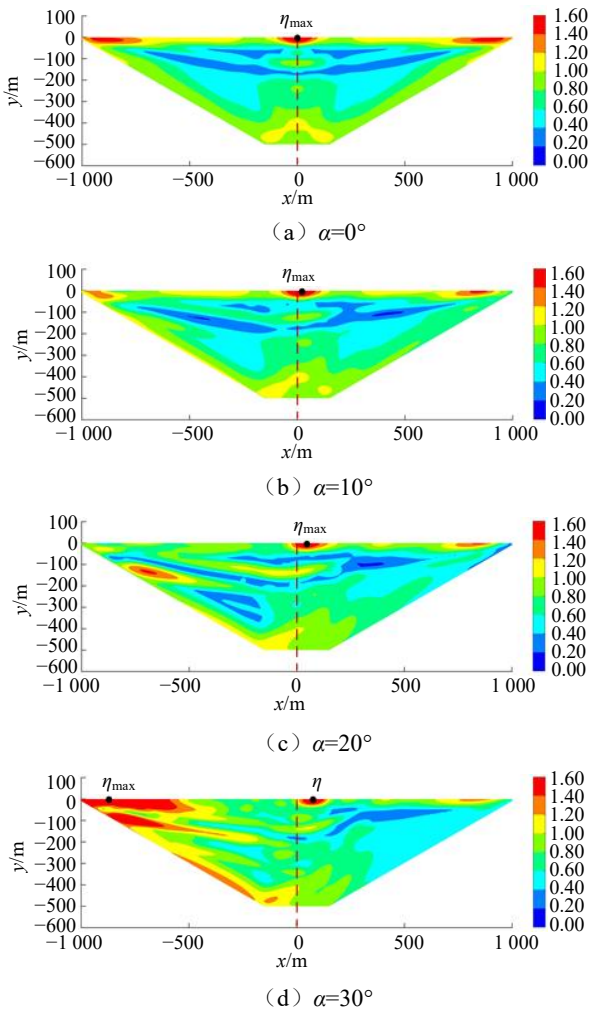


图 23 不同入射角时加速度放大系数云图

Fig. 23 Nephogram of acceleration amplification coefficient at different incident angles

3.5 讨论

为进一步说明沉积河谷对地震动的放大作用, 从地震波传播路径分析场地地震响应差异机理。需要说明的是, SV 波经不同界面折射和反射后同时存在 P 波和 SV 波, 它们在传播过程中相互干涉。为简洁起见, 下文仅给出 SV 波在沉积层中传播及干涉的过程。

地震波垂直入射时, 如图 24 (a) 所示, 对于较宽的平缓河谷, SV 波在河谷边缘产生大量反射, 增加了该处地震波相长干涉, 同一 SV 波相邻反射点距离随反射次数增加而增大, 故距河谷边缘越远, 反射波密度越小, 存在河谷场地效应影响区域 (即区域②)。其中, 干涉点 S_1 由倾斜基岩处入射地震波叠加而成, 位于河谷地表边缘; S_2 由倾斜基岩和谷底水平基岩处入射地震波叠加而成, 位于坡脚所对应河谷地表处, 导致区域②中存在两个加速度放大系数极大值 (见图 18)。对于河谷中部 (区域①), S_3 由倾斜基岩和谷底水平基岩处入射地震波叠加

而成, 由于倾斜基岩处入射地震波经多次反射而能量耗散, 故区域①表现为一维土层放大。

如图 24 (b) 所示, 随着河谷宽度减小, 河谷两侧影响区域叠加, 沉积层地表均处于河谷场地效应影响范围内。此时, S'_2 由河谷两侧倾斜基岩和谷底水平基岩处入射地震波叠加而成, 故地表加速度放大系数呈现出 3 个峰值, 最大值位于地表中心, 次大值位于地表两侧 (如图 15 (a) 所示)。如图 24 (c) 所示, 随着坡度增大, SV 波反射路径发生变化, 入射波直接从河谷边缘向河谷中部聚焦。河谷两侧干涉点密度大幅减小, 河谷中部干涉点 S_4 集中在地表以下。故河谷两侧为地震衰减, 加速度放大系数最大值由地表中点下移至距地表一定深度处。

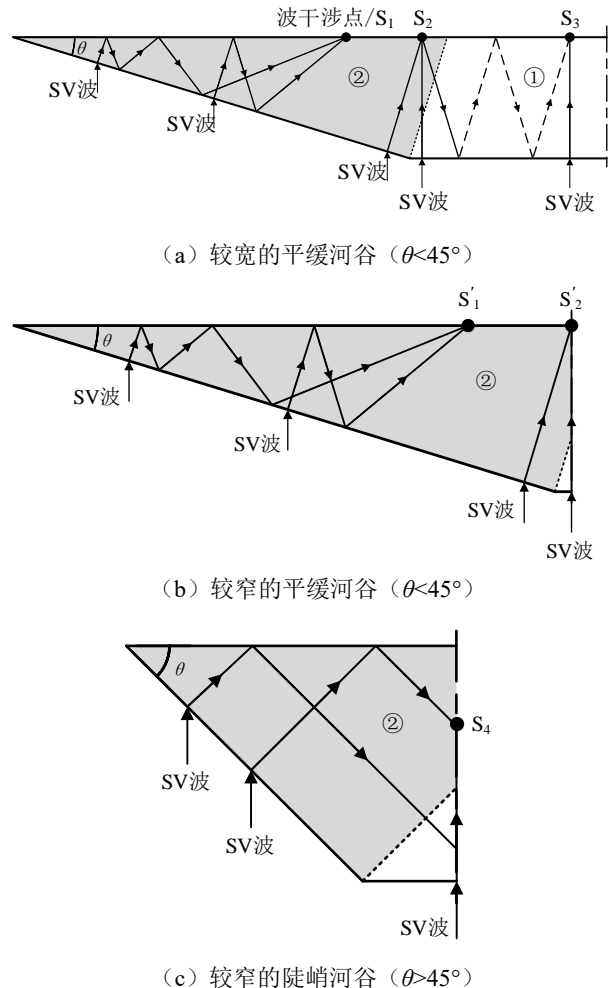


图 24 SV 波垂直入射传播路径

Fig. 24 Propagation path of SV wave at vertical incidence

地震波斜入射时, 如图 25 所示, 由于入射角增大, 折射波右偏, 使得河谷内 SV 波反射点整体右移, 河谷中部地震放大区域也右移。随着入射角增大, 河谷地形效应不断增强, 加速度放大系数最大值位置位于迎波侧, 河谷中部为次大值。

综上所述, 河谷几何形态和地震波入射角影响

了河谷中地震波的反射路径,进而改变加速度放大系数最大值的位置。

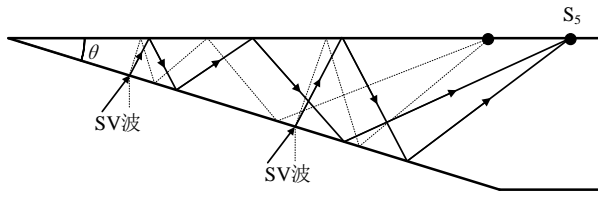


图 25 SV 波斜入射传播路径

Fig. 25 Propagation path of SV wave at oblique incidence

4 结 论

本文针对某实际工程场地,采用数值模拟方法探讨了河谷几何参数、SV 波入射角对河谷场地地震动分布特征的影响,得出以下结论:

(1) 当坡度较小时,加速度放大系数极大值位置位于河谷中部和两侧;当坡度较大时,加速度放大系数极大值位置逐渐远离河谷两侧而向河谷中部转移,且最大值位置出现在河谷中部距地表一定深度处。随着坡度增大,沉积层中加速度放大系数不断增大,此时,发生土体液化或软化的可能性也急剧增大。

(2) 对于宽河谷,沉积层可分为 3 个放大区域:河谷中部为一维土层放大,河谷两侧为地形放大与土层放大叠加。对于窄河谷,河谷两侧影响区域重叠,导致地震异常剧烈,地表加速度放大系数远大于宽河谷情况。

(3) 随着地震波入射角增大,迎波侧聚焦放大、背波侧滤波减小现象越明显。当入射角较小时,土层效应占主导地位,加速度放大系数最大值位于河谷中部。随着入射角增大,河谷地形效应不断增强,加速度放大系数最大值位于迎波侧。

参考文献

- [1] RIGA E, MAKRA K, PITILAKIS K. Investigation of the effects of sediments inhomogeneity and nonlinearity on aggravation factors for sedimentary basins[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 110(7): 284-299.
- [2] 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.
- [3] 何颖, 于琴, 刘中宪. 考虑散射效应沉积河谷空间相关多点地震动模拟[J]. *岩土力学*, 2019, 40(7): 2739-2747, 2788.
HE Ying, YU Qin, LIU Zhongxian. Simulation of multi-point spatially correlated earthquake ground motions of sedimentary valleys considering scattering effect[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(7): 2739-2747, 2788.
- [4] 尹超, 李伟华, 赵成刚. SV 波斜入射下坡地形放大效应的研究[J]. *振动工程学报*, 2020, 33(5): 971-984.
YIN Chao, LI Weihua, ZHAO Chenggang. Research of slope topographic amplification subjected to obliquely incident SV-waves[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2020, 33(5): 971-984.
- [5] 高玉峰, 代登辉, 张宁. 河谷地形地震放大效应研究进展与展望[J]. *防灾减灾工程学报*, 2021, 41(4): 734-752.
GAO Yufeng, DAI Denghui, ZHANG Ning. Progress and prospect of topographic amplification effects of seismic wave in canyon sites[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2021, 41(4): 734-752.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Seismic Design of Buildings: GB 50011 — 2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [7] HUANG H C, CHIU H C. The effect of canyon topography on strong ground motion at Feitsui damsite: Quantitative results[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1995, 24(7): 977-990.
- [8] 王海云, 谢礼立. 自贡市西山公园地形对地震动的影响[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(7): 1631-1638.
WANG Haiyun, XIE Lili. Effects of topography on ground motion in the Xishan park, Zigong city[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(7): 1631-1638.
- [9] 王文才, 尹志文, 苏小芸, 等. 2018 年陕西宁强 5.3 级地震强地面运动特征及局部场地效应分析[J]. *地震工程学报*, 2020, 42(6): 1700-1705.
WANG Wencai, YIN Zhiwen, SU Xiaoyun, et al. Characteristics of strong ground motion of the 2018 Ningqiang M5.3 earthquake in Shaanxi province and local site response analysis[J]. *China Earthquake Engineering*

- Journal, 2020, 42(6): 1700-1705.
- [10] 张宁, 高玉峰, 何稼, 等. 平面 SH 波作用下部分充填圆弧形沉积谷的二维土层和地形放大效应[J]. 地震学报, 2017, 39(5): 778-797, 819.
ZHANG Ning, GAO Yufeng, HE Jia, et al. Two-dimensional soil and topographic amplification effects of a partially filled circular-arc alluvial valley under plane SH waves[J]. Acta Seismologica Sinica, 2017, 39(5): 778-797, 819.
- [11] TSAUR D H, CHANG K H. SH-waves scattering from a partially filled semi-circular alluvial valley[J]. Geophysical Journal International, 2008, 173(1): 157-167.
- [12] BARARPOUR M, JANALIZADE A, TAVAKOLI H R. The effect of 2D slope and valley on seismic site response[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(2): 1-10.
- [13] 孙纬宇, 汪精河, 严松宏, 等. SV 波斜入射下河谷地形地震动分布特征分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(20): 237-243, 265.
SUN Weiyu, WANG Jinghe, YAN Songhong, et al. Characteristic analysis of ground motions of a canyon topography under obliquely incident SV waves[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(20): 237-243, 265.
- [14] 张建经, 朱传彬, 张明, 等. 地震波入射角对盆地地震反应影响的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊 1): 2720-2727.
ZHANG Jianjing, ZHU Chuanbin, ZHANG Ming, et al. Numerical analysis for effect of incident angle of seismic wave on seismic response of basin[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 2720-2727.
- [15] 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.
- [16] 戚玉亮, 大塚久哲. ABAQUS 动力无限元人工边界研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 3007-3012.
QI Yuliang, HISANORI Otsuka. Study of ABAQUS dynamic infinite element artificial boundary[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 3007-3012.
- [17] HUANG B, GUO J, LIAO K, et al. Fragility analysis of RC frame structures subjected to obliquely incident seismic waves[J]. Sustainability, 2021, 13(3): 1108.
- [18] 阳栋, 王志亮. 基于无限元和波场分离法的地震响应数值分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(8): 1129-1134.
YANG Dong, WANG Zhiliang. Numerical analysis of seismic response based on infinite element and wave field separation method[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(8): 1129-1134.
- [19] 黄博, 凌道盛, 丁浩, 等. 斜入射地震波在土体中产生的动应力路径及试验模拟[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 276-283.
HUANG Bo, LING Daosheng, DING Hao, et al. Seismic stress path induced by obliquely incident waves and its simulation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 276-283.
- [20] 赵密, 王维伟, 黄景琦, 等. 地震作用下土-结构相互作用的简化时程分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(1): 111-117.
ZHAO Mi, WANG Weiwei, HUANG Jingqi, et al. Simplified time history analysis for soil-structure interaction under earthquake[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(1): 111-117.
- [21] HUDSON M, IDRIS I M, BEIKAE M. User's manual for QUAD4M: a computer program to evaluate the seismic response of soil structures using finite element procedures and incorporating a compliant base[D]. Davis, US: University of California, 1994.
- [22] NEJATI H R, AHMADI M, HASHEMOLHOSSEINI H. Numerical analysis of ground surface vibration induced by underground train movement[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 29(5): 1-9.
- [23] 孔宪京, 周晨光, 邹德高, 等. 高土石坝-地基动力相互作用的影响研究[J]. 水利学报, 2019, 50(12): 1417-1432.
KONG Xianjing, ZHOU Chenguang, ZOU Degao, et al. Influence of the dynamic interaction between high rockfill dam and foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(12): 1417-1432.