

坡地地形对地震动特性的影响分析¹

郝明辉 张郁山 赵凤新

(中国地震灾害防御中心, 北京 100029)

摘要 采用有限元有限差分方法, 结合人工透射边界理论, 研究局部坡地地形对地震动特性的影响, 分析坡高、坡角对地形放大效应的影响。研究表明: 坡地地形斜坡段各点反应谱谱比最大值沿坡高逐渐增大, 坡脚点对地震动反应谱谱比呈缩小效应; 坡底段各点反应谱谱比接近 1; 坡起平台段空间点受地形效应的影响较大; 坡高和坡角对地形效应的影响较明显, 当坡角不变时, 不同坡高反应谱谱比曲线形状基本相同, 峰值点对应的特征周期随着坡高的增加呈增长趋势, 峰值点对应的反应谱谱比随着坡高的增加呈增大趋势, 斜坡顶点阿里亚斯烈度比值在地形坡高超过一定数值后随着坡高的增加呈增大趋势; 当坡高不变时, 大部分频段内反应谱谱比最大值随着坡角的增加逐渐增大, 斜坡顶点阿里亚斯烈度比值在坡角达到一定数值后随着坡角的增加呈增大趋势。

关键词: 地形效应 坡地 反应谱谱比 坡高 坡角 阿里亚斯烈度

Analysis of Slope Terrain Effect on the Properties of Ground Motion

Hao Minghui, Zhang Yushan and Zhao Fengxin

(China Earthquake Disaster Prevention Center, Beijing 100029, China)

Abstract Based on the finite element finite difference method and the theory of artificial transmission boundary, the influence of local slope terrain on ground motion characteristics (including response spectrum, peak acceleration, peak velocity, peak displacement and arias intensity) is studied, and the influence of slope height and slope angle on ground shape amplification effect is analyzed. The results show that: the maximum response spectrum ratio of each point on the slope section of slope terrain gradually increases along the slope height, and the maximum value is not more than 1.3; the slope toe point has a narrowing effect on the response spectrum ratio of ground motion; the spectrum ratio of each point on the bottom section of slope is close to 1; the spatial point on the platform section is greatly affected by the terrain effect, and gradually decreases with the distance from the top of slope. The height and slope angle of slope terrain have obvious influence on terrain effect. When the slope angle is constant, the shape of the spectral ratio curve of different slope heights is basically the same, the characteristic period corresponding to the peak point increases with the increase of height, and the spectral ratio corresponding to the peak point also increases with the increase of height. When the terrain height exceeds a certain value, the ratio of arias intensity at the top of slope increases with the increase of height; when the slope height is constant, the maximum value of response spectrum ratio in most frequency bands also increases with the increase of slope angle. And the ratio of arias intensity at the top of the slope increases with the increase of the slope after reaching a certain slope angle.

Key words: Terrain effect; Slope terrain; Response spectrum ratio; Terrainheight; Terrain slope; Arias intensity

¹ 基金项目 国家重点研发计划 (2018YFC1504601); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项 (ZDJ2020-09)

【收稿日期】 2021-01-29

【作者简介】 郝明辉, 女, 生于 1983 年。高级工程师。主要从事复杂场地地形效应、结构抗震方面的研究。E-mail: minghuimail@126.com

引言

大量震害调查、强震观测及理论研究表明 (Borcherdt, 1970; Boore, 1972; Ashford 等, 1997), 地形条件对地震动的影响较大, 不容忽视。通过整理震害出现的地形资料, 依据地貌几何形态将地形分为河谷、山地、阶地、斜坡、陡坎, 山脊、山梁, 台塬、盆地。大量学者研究了不同地形对地震动特性的影响, 如梁建文等 (2003) 给出了凹陷地形 SV 波入射下的解析解; 巴振宁等 (2018) 采用间接边界元法研究了 SV 波入射下沉积谷地对地震动的放大效应, 并分析了有无覆盖层及多个谷地对结果的影响; 刘中宪等 (2019) 基于快速多极子间接边界元法, 针对城市区域沉积盆地进行了三维地震动响应模拟, 结果表明入射频率、盆地形状和盆地内部位置点对沉积盆地地表位移放大作用均有不同程度的影响; 周国良等 (2012) 和孙纬宇等 (2019) 研究了河谷地形对地震动分布特性的影响, 结果表明河谷地形对地震动分布具有重要影响。沿河谷斜坡顶到谷底的各观测点地震动峰值加速度存在显著差异, 地震动位移存在差动现象。袁晓铭等 (1996) 给出了任意圆弧形凸起地形对平面 SH 波散射的解析解; 蒋涵等 (2015) 采用三维谱元法模拟地震波传播, 研究了芦山地区地震动频谱特征; 李英民等 (2019) 和郝明辉等 (2019) 分别采用动态子结构法、有限元有限差分法研究了凸起地形对地震动特性的影响, 并分析了坡角、坡高、入射角度等因素对计算结果的影响。近年来, 大量城市建筑建于山坡上, 坡地地形对地震动的放大效应不容忽视 (殷跃平, 2008)。《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010) (中华人民共和国住房和城乡建设部等, 2010) 针对坡地地形给出了设计地震动影响系数的调整; 李英民等 (2010) 采用脉冲输入研究了岩质坡地地形对反应谱特性的影响; 李家祥等 (2021) 研究了 SH 波入射下斜坡地形对地震动特性的影响, 定量分析了 SH 波垂直入射下二维斜坡地形地震动响应与斜坡角度、土层厚度及介质阻抗比的关系。但上述研究均采用脉冲输入, 而实际地震动是非常复杂的, 且受地震波频散和干涉等因素影响, 实际地震动脉冲之间存在复杂的相位关系。因此, 基于脉冲输入的地形对地震动峰值的放大倍数无法直接用于评估地形对实际地震动峰值的放大效应 (郝明辉等, 2014)。此外, 除峰值、频谱特性外, 阿里亚斯烈度也是表征地震滑坡稳定性的重要地震动特性参数 (刘甲美等, 2015)。因此, 本文针对坡地地形, 基于透射人工边界的有限元有限差分方法, 采用人工合成地震动, 研究 SV 波垂直入射下, 坡地地形对地震动峰值、反应谱、阿里亚斯烈度等的放大效应, 并定量分析坡高、坡角对计算结果的影响, 从而为坡地地形上建筑物选址及地震动参数的确定提供理论参考。

1 模型及分析方法

局部坡地地形模型如图 1 所示。坡地地表包括顶部平台、斜坡面和坡底段。利用人工边界从无限大场地中切取包含局部坡起在内的有限元计算区域, 脚点与左、右人工边界的垂直距离取为 $5H/\tan\alpha$ (H 为坡高, α 为坡角), 与底人工边界的垂直距离为 $5H$, 可满足计算精度要求, 减小人工边界的影响。采用四边形有限元网格离散, 网格尺寸为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$, 以获取对高频成分可靠的数值模拟结果。介质假定为均匀、各向同性、黏弹性, 纵波波速表示为 c_p , 横波波速表示为 c_s , 阻尼比表示为 ζ 。本文主要考虑岩石介质, 其剪切波波速

取为 1400 m/s , 压缩波波速取为 2000 m/s , 人工边界区介质波波速取为 1200 m/s , 仅考虑平面 SV 波垂直入射情况。

为消除输入地震动随机性对分析结果的影响, 本文采用多组输入地震动计算得到的反应谱谱比平均值, 研究坡地地形对地震动反应谱的放大效应。针对第 i 个输入地震动样本 $a_i(t)$, 利用程序 TPG2D 求解图 1 所示凸起的地震反应, 得到不同输出点地震反应加速度时间过程 $a_i^r(t, \vec{x})$, 其绝对加速度反应谱为 $S_{a_i}^r(T, \vec{x})$, \vec{x} 为输出点空间坐标, $\vec{x} = [x, y]^T$ 。

程序 TPG2D 假定 $a_i(t)$ 为图 1 所示模型左下角点处入射波加速度, 以此为基础, 可确定自由场 (即不存在凸起的弹性半空间) 地震反应, 其加速度反应记为 $a_i^f(t, \vec{x})$, 反应谱记为 $S_{a_i}^f(T, \vec{x})$ 。相应地, 定义式 (1) 所示反应谱谱比用于描述局部凸起对地震动的放大效应:

$$r_i(T, \vec{x}) = \frac{S_{a_i}^r(T, \vec{x})}{S_{a_i}^f(T, \vec{x})} \quad (1)$$

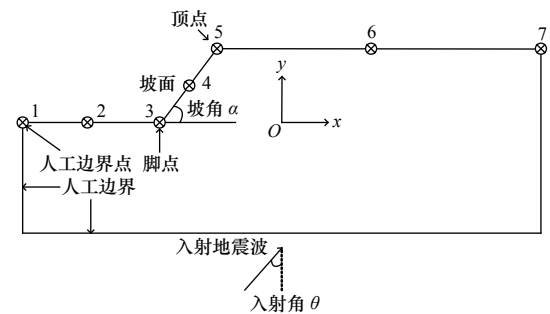


图 1 局部坡地模型

Fig. 1 A model with local terrain

已有研究表明(郝明辉等, 2014), 利用 Hanning 窗对 3 个输入地震动样本计算所得平均反应谱谱比曲线进行平滑, 所得结果与大样本数量所得平均值相近, 可有效消除输入地震动随机性的影响, 同时降低计算工作量:

$$r(T, \vec{x}) = \text{Hann} \left[\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 r_i(T, \vec{x}) \right] \quad (2)$$

式中, $\text{Hann}[f(x)]$ 表示利用 Hanning 窗对函数 $f(x)$ 进行平滑处理。下文研究的反应谱谱比是由式 (2) 定义的反应谱谱比。后续计算结果均采用 3 个输入地震动样本计算所得结果的平均值表征。

基于郝明辉等(2014)的研究, 采用人工合成的地震动时程作为模型输入, 研究凸起地形对地震动反应谱的放大效应, 其中 1 个输入地震动样本加速度、速度和位移时程曲线如图 2 所示。

2 计算方法

2.1 集中质量显式有限元内点计算方法

集中质量显式有限元的实质是从当前时刻节点运动方程推求下一时刻节点运动, 无须进行刚度矩阵、质量矩阵、阻尼矩阵集成, 其右端项的形成仅需在单元一级水平上根据每个单元对有效荷载向量的贡献累加, 整个计算基本在单元一级水平上进行, 仅需很小的高速存储区, 计算效率较高。当一系列单元刚度矩阵、质量矩阵、阻尼矩阵相同时, 无须重复计算, 效率更高。

对于模型内部节点(图 1 中 2~7 号点, 假定其总体编号为 1), 由动力平衡条件可建立运动方程为:

$$M_1 \{\ddot{u}_1(t)\} + \sum_{e=1}^{N_e} \sum_{n=1}^{N_n} (\alpha M_{in}^{(e)} + \beta K_{in}^{(e)}) \{\dot{u}_n(t)\} + \sum_{e=1}^{N_e} \sum_{n=1}^{N_n} K_{in}^{(e)} \{u_n(t)\} - \{R_1(t)\} = 0 \quad (3)$$

式中, N_e 为包含节点 1 的所有单元个数, N_n 为第 e 个单元节点数, i 为节点 1 在单元 e 中的局部编号, \hat{n} 为单元 e 中第 n 个节点总体编号, $M_{in}^{(e)}$ 和 $K_{in}^{(e)}$ 分别为单元 e 质量矩阵和刚度矩阵, α 和 β 为 Rayleigh 阻尼系数, $\{\ddot{u}_j(t)\}$ 、 $\{\dot{u}_j(t)\}$ 和 $\{u_j(t)\}$ 分别为加速度、速度和位移, $\{R_1(t)\}$ 为节点等效集中荷载, M_1 为节点 1 等效集中质量, 且有:

$$M_1 = \sum_{e=1}^{N_e} \sum_{n=1}^{N_n} M_{in}^{(e)} \quad (4)$$

利用李小军等(1992)提出的显式差分格式求解方程 (1), 可得到节点 1 运动数值解为:

$$\{u_1^{p+1}\} = \frac{1}{2} \frac{\Delta t^2}{M_1} \{R_1^p\} + \{u_1^p\} + \Delta t \{\dot{u}_1^p\} - \frac{1}{2} \frac{\Delta t^2}{M_1} \sum_{e=1}^{N_e} \sum_{n=1}^{N_n} [K_{in}^{(e)} u_n^p + (\alpha M_{in}^{(e)} + \beta K_{in}^{(e)}) \dot{u}_n^p] \quad (5)$$

式中, $\{\dot{u}_i^p\}$ 、 $\{u_i^p\}$ 和 $\{R_i^p\}$ 分别为 $p\Delta t$ 时刻节点 i 速度、位移和等效集中动力荷载, Δt 为离散时间间隔。

利用式 (5) 可显式求解内部节点动力响应。

2.2 透射人工边界

对于人工边界节点(图 1 节点 1、7, 假定其总体编号为 0), 基于透射人工边界原理, 可得动力响应计算公式为:

$$\{u_0^{p+1}\} = \sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} C_j^N \{u_j^{p+1-j}\} \quad (6)$$

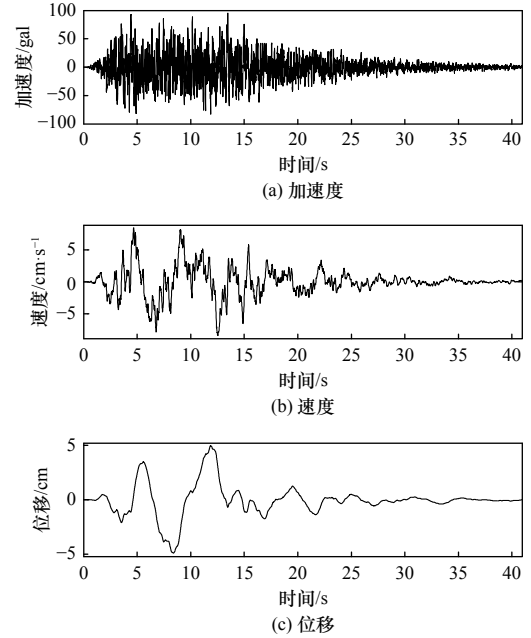


图 2 输入地震动时程曲线

Fig. 2 Acceleration, velocity and displacement curves of artificial ground motion samples

式中, N 为透射阶数(本文取为2阶), $\{u_0^{p+1}\}$ 为人工边界节点在 $(p+1)\Delta t$ 时刻的位移, $\{u_j^{p+1-j}\}$ 为计算点 $x = -jc_a\Delta t$ 在 $(p+1-j)\Delta t$ 时刻的位移, c_a 为人工波速值, C_j^N 为二项式系数:

$$C_j^N = \frac{m!}{(m-j)!j!} \quad (7)$$

2.3 程序验证

采用上述基于透射人工边界的显式有限元计算方法, 开发了并行化 Fortran 数值计算程序 TPG2D, 并移植到北京工业云计算平台上运行。为验证该程序计算结果的正确性, 计算了弹性半空间在 SV 波和 P 波垂直入射下的动力响应, 并与理论解进行对比。

从二维半无限空间中截取 $6\text{ m} \times 50\text{ m}$ 的有限范围, 单元网格尺寸为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$, 材料弹性模量 $E = 2.4 \times 10^7\text{ Pa}$, 泊松比 $\mu = 0.2$, 质量密度 $\rho = 1\,000\text{ kg/m}^3$ 。在底部垂直向上入射水平方向单位脉冲剪切位移波和竖直方向单位脉冲压缩位移波:

$$u(t) = \frac{1}{2} [1 - \cos(2\pi ft)], 0 \leq t \leq 0.25\text{ s} \quad (8)$$

式中, $f = 4\text{ Hz}$ 。

图3所示为程序 TPG2D 计算得到的有限元模型底部、中部、顶部水平向和竖直向位移时程曲线与理论解的比较。入射波由底部向上传播, 在自由地表发生反射, 自由地表处位移幅值为输入波幅值的2倍。由图3可知, 程序 TPG2D 计算结果与理论解吻合较好, 证明了本文采用计算方法的正确性和有效性。

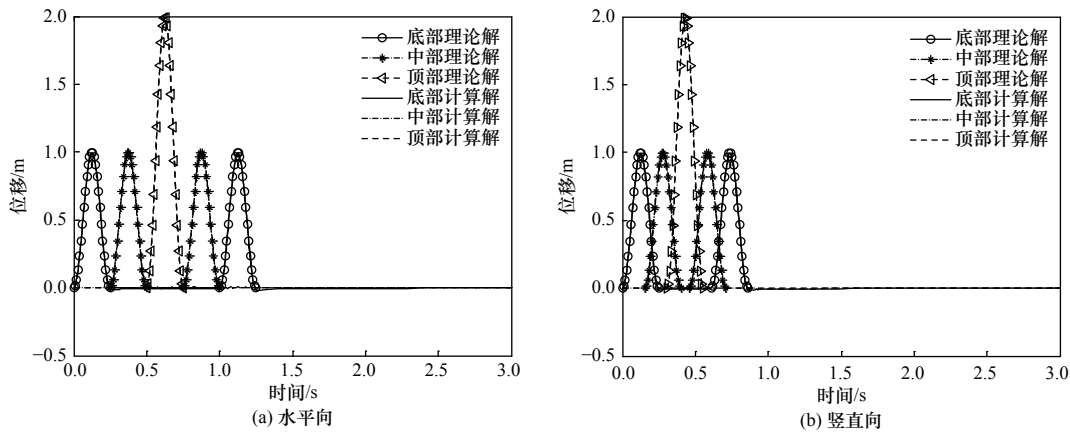


图3 数值解与理论解比较

Fig. 3 Comparison of viscous-elastic boundary calculated results with the theoretical solution

3 坡地地形地表不同位置放大系数

以坡高 50 m 、坡角 45° 的坡地地形为例, 分析地形效应对地震动反应谱特性的影响。坡底段、斜坡段、平台段不同空间点反应谱谱比曲线如图4~6所示。由图4~6可知, 在远离斜坡的坡底段反应谱谱比基本在1附近波动, 越靠近斜坡放大效应越明显(节点2); 对于斜坡段, 各点反应谱谱比最大值沿坡高逐渐增大, 而坡脚点对地震动反应谱呈缩小效应(蓝色实线), 斜坡顶点在大部分频段对地震动起放大作用, 反应谱谱比最大值达1.24(红色实线); 对于斜坡平台段, 平台节点在大部分频段反应谱谱比均 >1 , 对地震动均起放大作用。

4 坡高对计算结果的影响

坡角 α 取为 45° , 分析坡高变化对斜坡顶点反应谱谱比的影响。入射地震波采用垂直入射的 SV 波。参与计算的凸起地形坡高 H 分别取 20.0 、 30.0 、 40.0 、 50.0 、 60.0 、 70.0 、 80.0 、 90.0 、 100.0 、 110.0 、 130.0 、 150.0 、 170.0 、 190.0 、 210.0 m 。斜坡顶点反应谱谱比随坡高变化曲线如图7所示, 由图7可知, 不同坡高反应谱谱比曲线形状基本相同。反应谱谱比峰值点对应的特征周期随着坡高的增加呈增长趋势, 峰值点对应的反应谱谱比随着坡高的增加呈增大趋势。在本文研究的坡高范围内, 周期 $>1.0\text{ s}$ 的反应谱谱比随着坡高的增

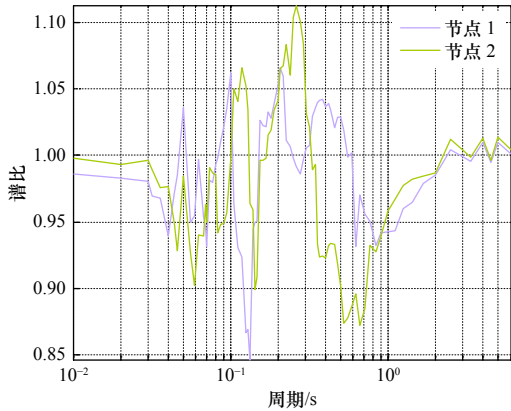


图 4 坡底段地表点反应谱谱比曲线

Fig. 4 Spectral ratio chart of surface point on bottom

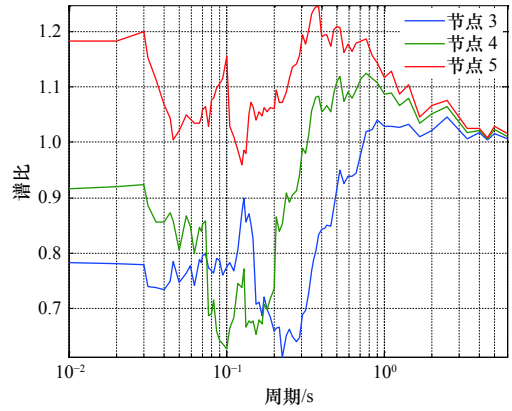


图 5 斜坡段地表点反应谱谱比曲线

Fig. 5 Spectral ratio chart of surface point on the slope

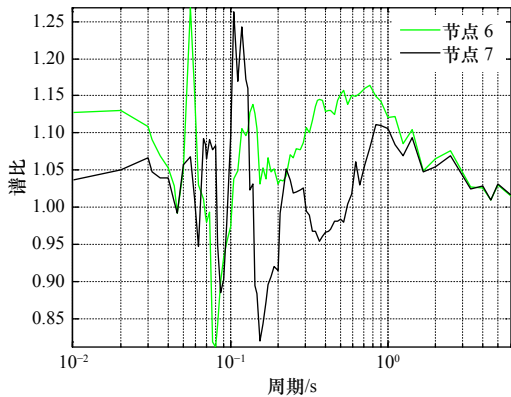


图 6 平台段地表点反应谱谱比曲线

Fig. 6 Spectral ratio chart of the surface point on the platform

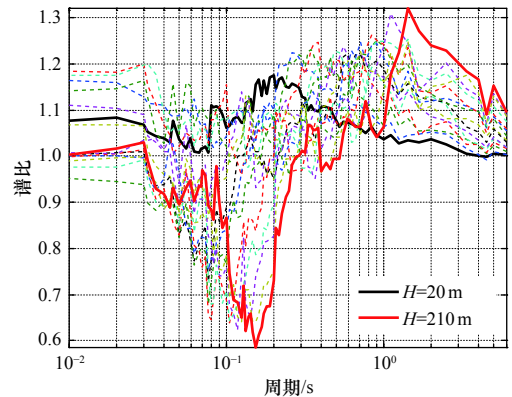


图 7 斜坡顶点反应谱谱比随坡高变化曲线

Fig. 7 Spectral ratio curve of the vertex with different heights

加呈增大趋势，最大值达 1.3，且随着周期的增大，反应谱谱比逐渐趋于 1.0，说明这一坡高范围对较长周期地震动成分的影响逐渐减弱，在反应谱上表现为斜坡顶点地震动反应谱与自由地表地震动反应谱相差较小。周期为 0.1~0.3 s 时，随着坡高的增加，反应谱谱比呈减小趋势。在其他周期范围内，反应谱谱比随坡高的变化不再呈单调变化趋势，变化规律较复杂。

图 8 所示为坡脚点反应谱谱比随坡高变化的曲线，由图 8 可知，不同坡高反应谱谱比曲线在大部分周期点对地震动的放大作用均不明显，基本呈减弱趋势，反应谱谱比最小值为 0.5。在本文研究的坡高范围内，所有周期范围内反应谱谱比随坡高的变化不再呈单调变化趋势，变化规律较复杂。

图 9 所示为斜坡顶点不同反应谱控制周期点处反应谱谱比随坡高的变化曲线，由图 9 可知，长周期范围（蓝线）反应谱谱比随坡高变化较明显，且反应谱谱比随坡高的增加呈增大趋势，最大值达 1.25 左右；当坡高 > 160 m 后，反应谱谱比随坡高的增加呈减小趋势；短周期范围（黑线）随坡高变化反应谱谱比基本呈减弱趋势，当坡高 > 60 m 后，峰值加速度基本随着坡高的增加而减弱，且当坡高 > 130 m 后峰值加速度放大系数基本保持不变；峰值速度随着坡高的增加呈增大趋势，PGV 放大倍数最大值达 1.2 左右，PGD 放大倍数基本在 1 左右。

图 10 所示为斜坡顶点阿里亚斯烈度比值随坡高变化曲线，由图 10 可知，对于宽度为 50 m、坡角为 45° 的计算模型，当坡高 < 30 m 时，斜坡顶点阿里亚斯烈度比值随着坡高的增加呈增大趋势；当坡高 > 30 m 时，斜坡顶点阿里亚斯烈度比值随着坡高的增加呈减小趋势。

图 11 所示为节点 1~7（坡高 50 m，坡角 45°）阿里亚斯烈度比值，由图 11 可知，地形对平台中点和平台顶点阿里亚斯烈度的放大作用较大，最大值达 1.2；地形对脚点、斜坡中点阿里亚斯烈度起减小作用；地形对自由地表点阿里亚斯烈度的放大系数基本为 1，这与地表点反应谱谱比放大规律基本一致。

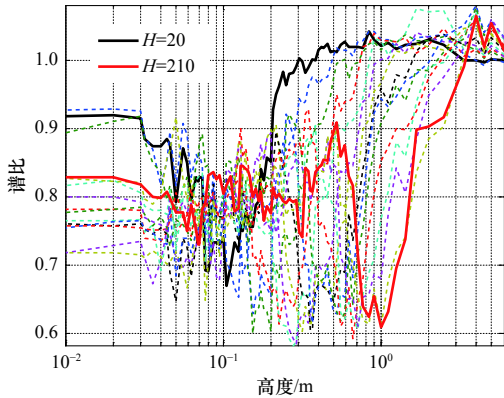


图 8 斜坡脚点反应谱谱比随坡高变化曲线

Fig. 8 Spectral ratio curve of the Slope toe with different heights

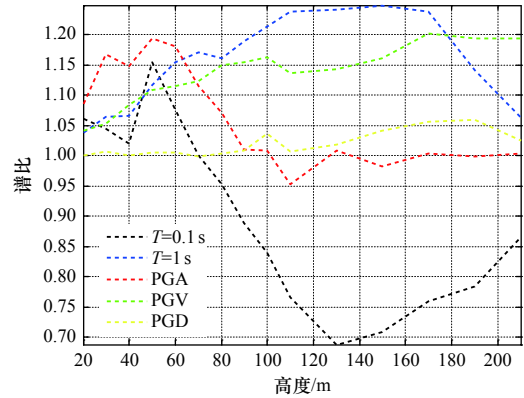


图 9 不同周期点处斜坡顶点反应谱谱比随坡高变化曲线

Fig. 9 Variation curve of slope peak spectral ratio with height at different periodic points

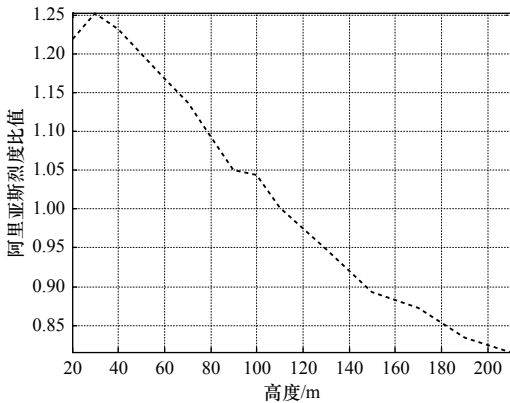


图 10 斜坡顶点阿里亚斯烈度比值随坡高变化曲线

Fig. 10 Curve of arias intensity ratio with height at the top of slope

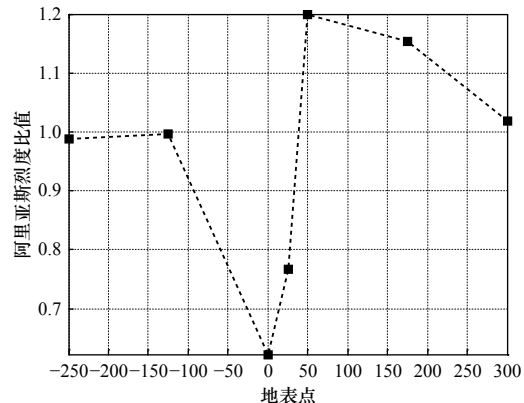


图 11 地表点阿里亚斯烈度比值

Fig. 11 Arias intensity ratio map of surface points

5 坡角对地震动特性的影响

将图 1 所示凸起地形模型宽度 B 取为 50 m，坡高 H 取为 50 m，研究坡角变化对地震动反应谱特性及阿里亚斯烈度的影响。入射地震波为垂直入射的 SV 波，参与计算的坡角分别取 20°、25°、30°、35°、40°、45°、50°、55°、60°。

不同坡角对应的斜坡顶点反应谱谱比曲线如图 12 所示，由图 12 可知，相比凸起台地地形，不同坡角反应谱谱比曲线变化规律不同（郝明辉等，2019），反应谱谱比最大值为 1.28 左右，说明坡角变化对反应谱某频段上的最大反应的影响较大。在坡高不变的情况下，随着坡角的增大，高频段（0.01~0.03 s）及低频段（0.3~6.0 s）放大倍数增大，中间频段（0.03~0.3 s）在不同周期点处放大倍数与坡角之间的变化规律较复杂。

图 13 所示为不同反应谱控制周期点处反应谱谱比随坡角变化曲线，由图 13 可知，长周期范围（蓝线）反应谱谱比随着坡角的增加呈增大趋势，反应谱谱比最大值为 1.1 左右；短周期范围（黑线）反应谱谱比随着坡角的变化较复杂，在坡角较大的情况下，反应谱谱比随着坡角的增加呈增大趋势；PGA 受坡角的影响较大，反应谱谱比最大值达 1.3 左右；PGV、PGD 随坡角变化不明显，PGV 放大倍数基本为 1.1 左右，PGD

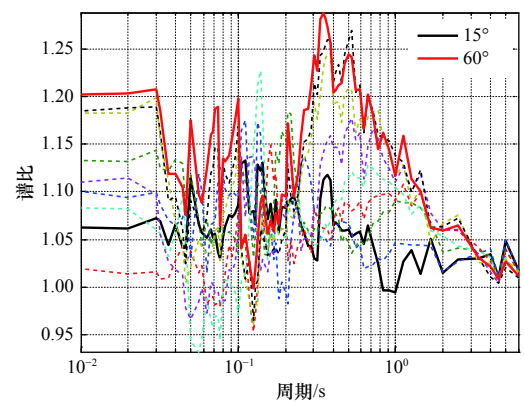


图 12 不同坡角对应的斜坡顶点的反应谱谱比曲线

Fig. 12 Spectral ratio curve of the vertex with different slopes

放大倍数基本为 1 左右。

图 14 所示为斜坡顶点阿里亚斯烈度随坡角变化曲线, 由图 14 可知, 对于宽度 50 m、坡角 45° 计算模型, 斜坡顶点阿里亚斯烈度比值在坡角 > 30° 后基本随着坡角的增加呈增大趋势, 最大值为 1.38。

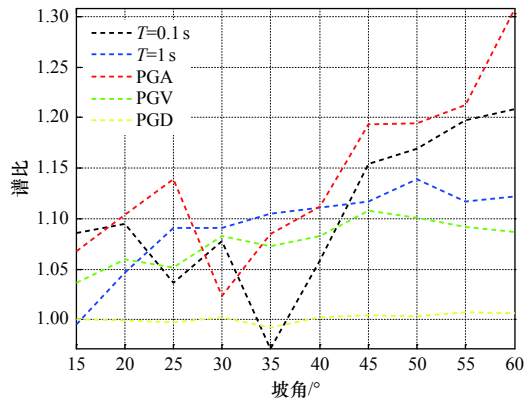


图 13 不同周期点处反应谱谱比随坡角变化曲线

Fig. 13 Variation curve of slope peak spectral ratio with slope at different periodic points

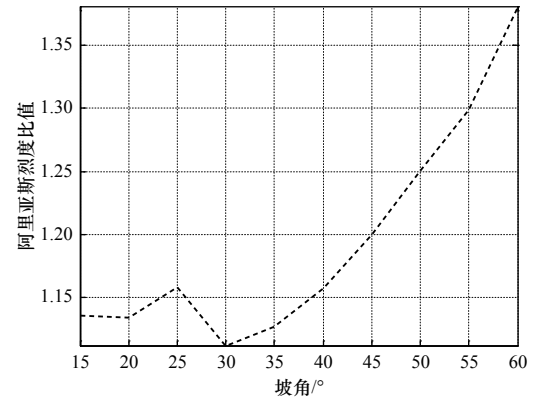


图 14 斜坡顶点阿里亚斯烈度比值随坡角变化曲线

Fig. 14 Curve of arias intensity ratio with slope at the top of slope

6 结论

本文基于有限元有限差分法, 结合人工透射边界理论, 研究了局部坡地地形对地震动特性的影响, 分析了坡高、坡角对地形放大效应的影响, 得出以下结论:

(1) 斜坡顶点地震动受地形效应的影响较大, 在零阻尼条件下, 反应谱谱比曲线呈双峰特点, 脚点在大部分周期点对地震动呈缩小效应。

(2) 在坡角一定的情况下, 斜坡顶点反应谱谱比峰值点对应的特征周期随着坡高的增加呈增长趋势, 对应的谱比随着坡高的增加呈增大趋势。斜坡顶点阿里亚斯烈度比值在斜坡坡高大于一定值后随着坡高的增加呈减小趋势, 与地震动高频成分受地形影响的规律基本一致。

(3) 当坡高不变时, 斜坡顶点反应谱谱比放大倍数与坡角之间的变化规律较复杂。此外, 斜坡顶点阿里亚斯烈度比值在坡角大于一定值后基本随着坡角的增加呈增大趋势。

参考文献

- 巴振宁, 陈昊维, 梁建文, 2018. 任意多个沉积谷地对平面 SV 波的散射. 振动与冲击, **37**(5): 98—107.
- Ba Z. N., Chen H. W., Liang J. W., 2018. Scattering of arbitrary alluvial valleys to incident plane SV waves. *Journal of Vibration and Shock*, **37**(5): 98—107. (in Chinese)
- 郝明辉, 张郁山, 2014. 凸起地形对地震动特性的影响. 地震学报, **36**(5): 883—894.
- Hao M. H., Zhang Y. S., 2014. Analysis of terrain effect on the properties of ground motion. *Acta Seismologica Sinica*, **36**(5): 883—894. (in Chinese)
- 郝明辉, 张郁山, 2019. 基于 DEM 数据的地形效应经验预测模型研究. 土木工程学报, **52**(2): 86—96.
- Hao M. H., Zhang Y. S., 2019. Research on empirical prediction model of terrain effects based on DEM. *China Civil Engineering Journal*, **52**(2): 86—96. (in Chinese)
- 蒋涵, 周红, 高孟潭, 2015. 三维地形中地震动的频域特征——以芦山地区为例. 震灾防御技术, **10**(1): 59—67.
- Jiang H., Zhou H., Gao M. T., 2015. The characteristics of frequency domain of ground motion in 3-D topography-A case study of Lushan area. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, **10**(1): 59—67. (in Chinese)
- 李家祥, 温瑞智, 刘启方等, 2021. SH 波垂直入射下的斜坡地形放大因子分析. 世界地震工程, **37**(1): 176—188.
- Li J. X., Wen R. Z., Liu Q. F., et al., 2021. Amplification factor analysis of slope topography under normal incidence of SH wave. *World Earthquake Engineering*, **37**(1): 176—188. (in Chinese)
- 李小军, 廖振鹏, 杜修力, 1992. 有阻尼体系动力问题的一种显式差分法. 地震工程与工程振动, **12**(4): 74—80.

- Li X. J., Liao Z. P., Du X. L., 1992. An explicit finite difference method for viscoelastic dynamic problem. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **12**(4): 74—80. (in Chinese)
- 李英民, 王丽萍, 赵耀, 2010. 岩质坡地建筑设计水平地震动放大系数的确定. *地震工程与工程振动*, **30** (4): 159—165.
- Li Y. M., Wang L. P., Zhao Y., 2010. Amplification factors of design horizontal ground motions for structures on rock slopes. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **30**(4): 159—165. (in Chinese)
- 李英民, 王肖巍, 宋维举, 2019. 动态子结构法在凸起地形地震动响应中的应用. *哈尔滨工业大学学报*, **51** (6): 156—161, 170.
- Li Y. M., Wang X. W., Song W. J., 2019. Application of dynamic substructure method to protruding topography on characteristics of ground motion. *Journal of Harbin Institute of Technology*, **51**(6): 156—161, 170. (in Chinese)
- 梁建文, 张郁山, 顾晓鲁等, 2003. 圆弧形层状凹陷地形对平面 SH 波的散射. *振动工程学报*, **16** (2): 158—165.
- Liang J. W., Zhang Y. S., Gu X. L., et al., 2003. Scattering of plane SH waves by a circular-Arc layered canyon. *Journal of Vibration Engineering*, **16**(2): 158—165. (in Chinese)
- 刘甲美, 高孟潭, 陈鲲, 2015. 地形效应影响下地震动参数与斜坡稳定性的相关性研究. *地震学报*, **37** (5): 865—874.
- Liu J. M., Gao M. T., Chen K., 2015. On the correlation of ground motion parameters with slope stability incorporating topographic effects. *Acta Seismologica Sinica*, **37**(5): 865—874. (in Chinese)
- 刘中宪, 张征, 王少杰等, 2019. 基于快速多极子间接边界元法的城市区域沉积盆地三维地震响应宽频模拟. *岩土力学*, **40** (10): 4101—4110.
- Liu Z. X., Zhang, Z., Wang, S. J., et al., 2019. 3D seismic response broadband-simulation of the alluvial basin in urban region based on the FMM-IBEM. *Rock and Soil Mechanics*, **40**(10): 4101—4110. (in Chinese)
- 孙纬宇, 汪精河, 严松宏等, 2019. SV 波斜入射下河谷地形地震动分布特征分析. *振动与冲击*, **38** (20): 237—243, 265.
- Sun W. Y., Wang J. H., Yan S. H., et al., 2019. Characteristic analysis of ground motions of a canyon topography under obliquely incident SV waves. *Journal of Vibration and Shock*, **38**(20): 237—243, 265. (in Chinese)
- 殷跃平, 2008. 汶川八级地震地质灾害研究. *工程地质学报*, **16** (4): 433—444.
- Yin Y. P., 2008. Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan Earthquake, Sichuan. *Journal of Engineering Geology*, **16**(4): 433—444. (in Chinese)
- 袁晓铭, 廖振鹏, 1996. 任意圆弧形凸起地形对平面 SH 波的散射. *地震工程与工程振动*, **16** (2): 1—13.
- Yuan X M, Liao Z P, 1996. Scattering of plane SH waves by a cylindrical hill of circular-arc cross-section. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **16**(2): 1—13. (in Chinese)
- 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. 2010. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范. 北京: 中国建筑工业出版社.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China (MOHURD), General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. 2010. GB 50011—2010 Code for Seismic Design of Buildings. Beijing: China Architecture & Building Press. (in Chinese)
- 周国良, 李小军, 侯春林等, 2012. SV 波入射下河谷地形地震动分布特征分析. *岩土力学*, **33** (4): 1161—1166.
- Zhou G. L., Li X. J., Hou C. L., et al., 2012. Characteristic analysis of ground motions of canyon topography under incident SV seismic waves. *Rock and Soil Mechanics*, **33**(4): 1161—1166. (in Chinese)
- Ashford S. A., Sitar N., Lysmer J., et al., 1997. Topographic effects on the seismic response of steep slopes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **87**(3): 701—709.
- Boore D. M., 1972. A note on the effect of simple topography on seismic SH waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **62**(1): 275—284.
- Borcherdt R. D., 1970. Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **60**(1): 29—61.