

坡体几何参数与弹性模量对岩质斜坡地震动力响应的影响：IBEM 求解

巴振宁^{1,2}, 吴孟桃^{1,2}, 梁建文^{1,2}

(1. 天津大学 土木系, 天津 300350; 2. 天津大学 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300350)

摘要: 提出一种用于求解层状半空间中斜坡动力响应的间接边界元方法, 研究坡体几何参数和弹性模量对岩质斜坡场地地震效应的影响规律。本方法通过在边界上施加斜线和水平线虚拟均布荷载来模拟斜坡地形产生的散射波场, 避免了传统边界元方法中的奇异性问题, 具有计算精度高、求解速度快的显著优点。文中对该方法的正确性和模型的收敛性进行验证与讨论, 进而开展相应的数值计算分析。研究表明: (1) 地震作用下岩质斜坡动力响应具有显著的高程放大效应, 随着相对高程的增加, 斜坡坡面加速度峰值(PGA)放大系数呈非线性增大, 且水平向大于竖直向, 算例中软质岩和硬质岩对应的最大水平加速度分别是其竖向的 1.51 和 1.14 倍; (2) 坡体几何参数和弹性模量对岩质坡顶斜坡动力响应均有重要影响, 随着坡角和坡高的增加, PGA 放大系数表现为增大趋势, 而随着弹性模量的增加, PGA 放大系数表现为衰减趋势; (3) 经比较发现, 《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010) 给出的放大系数未考虑岩性的影响, 同时也在一定程度上低估了地形效应; (4) 根据不同输入地震波的分析结果, 提出斜坡坡顶动力响应规律随几何参数和弹性模量变化的经验公式, 方便了结果的定量描述; (5) 通过分析斜坡坡顶的傅里叶谱特征(峰值、形状和卓越频率), 得到了斜坡动力响应随几何参数和弹性模量变化的频谱规律, 进而引入谱比曲线定量评估了不同坡角、坡高和弹性模量对应的斜坡坡顶地震动谱放大效应。

关键词: 边坡工程; 斜坡场地; 地震响应; 间接边界元; 放大系数; 频谱特性

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2019)08 - 1578 - 15

Influence of geometric parameters and elastic modulus on seismic dynamic response of rock slopes by IBEM

BA Zhenning^{1,2}, WU Mengtao^{1,2}, LIANG Jianwen^{1,2}

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: An indirect boundary element method for solving the dynamic response of slopes in layered half-space was proposed, and the influence of geometric parameters and elastic modulus on seismic effect of rock slopes was studied. The method simulates the scattered wave field generated by the slope topography by applying inclined and horizontal fictitious distributed loads on corresponding boundaries, avoiding the singularity problem in the conventional boundary element method and thus obtaining higher calculation accuracy and faster solution speed. The correctness and convergence of the developed method were analyzed, and the corresponding numerical calculations were carried out. Results show that the seismic dynamic response of rock slopes has significant

收稿日期: 2018 - 12 - 20; **修回日期:** 2019 - 03 - 12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778413, 51578373, 51578372)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51778413, 51578373 and 51578372)

作者简介: 巴振宁(1980 -), 男, 2008年毕业于天津大学土木工程专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事地震工程与工程波动方面的研究工作。

E-mail: bazhenning_001@163.com. 通讯作者: 吴孟桃(1993 -), 男, 现为博士研究生。E-mail: wumengtao@tju.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1511

elevation amplification effect, i. e., the peak acceleration(*PGA*) amplification factor of the slope surface increases nonlinearly with increasing the relative elevation and the horizontal acceleration response is greater than the vertical. The ratios of the horizontal amplification factor to the vertical respectively corresponding to soft rock and hard rock can reach 1.51 and 1.14 in the calculation examples. The geometric parameters and elastic modulus of the slope have important influence on the dynamic response of the top of the slope. The *PGA* amplification factor increases with increasing the angle and height of the slope while attenuates with rising the elastic modulus. Comparisons indicate that the amplification factor calculated by the *Code for Seismic Design of Buildings* (GB50011—2010) does not take into account the influence of lithology and at the same time underestimates the topographic effect to some extent. According to the analysis results with different input seismic waves, an empirical formula for evaluating the dynamic response of the rock slope with the changes of geometric parameters and elastic modulus was proposed, which facilitates the quantitative description of research results. By analyzing the Fourier spectrum characteristics(of rock slopes such as peak value, shape and predominant frequency), the spectrum law of dynamic response at the top with changing geometric parameters and elastic modulus was obtained, and then the spectral ratio curve was introduced to quantitatively evaluate the spectral amplification effect of ground motion with different angles, heights and shear wave velocities.

Key words: slope engineering; slope site; seismic response; indirect boundary element; amplification factor; spectrum characteristics

1 引言

地震在山岳地区往往诱发斜坡次生灾害,如崩塌、滑坡、泥石流等,造成了严重的人员伤亡和财产损失。以汶川地震震害为例^[1-2],其主震及余震共触发滑坡 15 000 多处,由此造成的人员伤亡数占总伤亡数的 1/3,直接经济损失数千亿。此外,相较于土质斜坡,岩质斜坡灾害的动力成因机制更加复杂,震后造成的交通阻碍给救援和修复工作带来了极大困难^[3-4]。因此,研究地震作用下斜坡尤其是岩质斜坡的动力响应规律,对山地区域的震害预测和抗震设防等具有重要的理论意义及工程应用价值。

一般认为,斜坡动力响应与斜坡地形、地质和震源参数等密切相关,研究方法主要有现场调查及监测、物理模型试验和数值计算。现场调查及监测方面,L. L. Davis 和 L. R. West^[5]早在 1971 年就采用强震仪对 San Fernando 地震的余震进行记录,分别在某山顶、山腰和山脚布设多个观测点,证实了山顶相对山脚的地震动放大效应。V. D. Gaudio 和 J. Wasowski^[6]对一潜在滑坡长期监测表明,地震动谱能量集中分布的频段与地震波方向及坡向有关,而地形和地质条件会导致能量的重分布。汶川 M_s 8.0 特大地震发生后,斜坡动力响应及失稳问题更加备受国内外地震地质研究者的关注。M. Chigira 等^[7]通过调查发现,具有良好成层性的碳酸盐岩(极易被

地下水所含碳酸溶解)斜坡在汶川地震中的滑坡发生率最高,而其滑动面通常沿层理面发育。黄润秋等^[8-9]通过对 2008 年汶川地震和 2013 年庐山地震震后现场调查及遥感解译发现,地震作用下斜坡失稳与地形条件密切相关,绝大部分灾害集中在 $20^\circ \sim 50^\circ$ 范围内,地震波在传播过程中具有显著的地形场地放大效应,坡顶与斜坡突出部分由于放大效应明显而最易失稳。物理模型试验方面,杨国香等^[10]通过大型振动台模型试验,研究了不同地震波频率下岩质边坡的动力响应特征。刘汉香等^[11-13]基于振动台试验,进一步研究了地震动强度、地震动参数和地震波频率对岩质斜坡加速度放大系数的影响。张泽林等^[14-15]采用离心机振动台技术,研究了黄土-泥岩边坡的加速度放大效应及震后变形模式。梁双庆等^[16]通过小型振动台模型试验,研究了不同坡面角度下碎石土斜坡的加速度响应及变形破坏等。以上研究均取得了一些有益的规律性认识,然而,由于斜坡动力响应的现场监测影响因素众多,且需要大量强震记录的积累,目前尚难以从有限的数据中准确获取斜坡响应的具体规律,而室内振动台试验虽已广泛地应用到相关研究中,但由于尺寸效应、重力失真、物理边界条件、材料相似比和试验经费等的限制,常有坡体监测数据不完善、与实际状况不完全相符(如低边坡响应^[17])等问题,得出的规律亦有一定局限性。

随着计算理论的不完善,数值解法在斜坡场

地动力问题求解中得到广泛应用, 郑颖人等^[18]采用动力强度折减法结合 FLAC^{3D} 软件研究了具有风化层的岩/土质边坡的地震破坏机制, 崔芳鹏等^[19]采用 DEM 方法, 研究了纵横波耦合下的斜坡失稳机制。李 勇^[20]采用 CDEM 耦合方法研究了岩质边坡的动力放大系数。何蕴龙等^[21-24]相继采用有限元方法研究了地震作用下岩质坡地的加速度、速度、位移等响应特征, 获取了放大效应和频谱特性等随地形地质条件的基本变化规律。上述研究均取得了具有重要学术价值的成果, 并形成了部分共识, 但大多是一些定性认识, 如: (1) 斜坡对地震波具有显著的高程放大效应; (2) 斜坡加速度响应以水平向为主, 竖向次之; (3) 坡面角度和岩性对加速度时程及频谱有重要影响等。鉴于岩质斜坡动力响应问题的复杂性, 目前对斜坡放大效应的机制研究和参数定量分析仍需不断积累和完善。

基于以上现状, 本文在笔者前期工作^[25-27]的基础上, 对所建立间接边界元方法(IBEM)进行拓展, 使之可以求解斜坡场地地震效应问题。文中首先对方法的实现和精确性进行了讨论, 进而深入研究了坡体几何参数和弹性模量对岩质斜坡放大影响的定量规律, 以期对斜坡场地上工程抗震提供一定参考。

2 模型与计算方法

2.1 计算模型及其求解

地震作用下岩质斜坡动力响应计算模型如图 1 所示, 斜坡坡高为 H , 坡面角度为 $\alpha(0^\circ < \alpha \leq 90^\circ)$, 坡体及其下介质均可水平成层(所用格林函数为层状半空间格林函数), 所有材料参数包括剪切波速 c_s 或弹性模量 $E(E = G(1 + 2\nu), G = \rho c_s^2)$ 、泊松比 ν 、阻尼比 ζ 以及质量密度 ρ , 入射地震波由基岩面垂直入射。图 1 所示问题本质上是斜坡地形对地震波的散射, 其自由边界构成于斜坡坡面和平坦地表面(无限延伸), 本文采用 IBEM 方法求解该无限边界散射问题。值得指出的是, 这里的无限边界与采用有限元法(FEM)截取有限域进行分析是不同的, 事实上本文 IBEM 方法相较 FEM, 有着降维和自动满足无穷远辐射条件的优点。

该问题求解的难度在于无限边界时域动力问题的求解: 一是无限边界的处理, 二是边界单元的离散及其求解精度。本文在满足精度的前提下将水平半无限边界截取到 C 点, 如图 1(b)所示, 而 C 点的位置将通过数值试验确定, 具体见下文, 在此基础

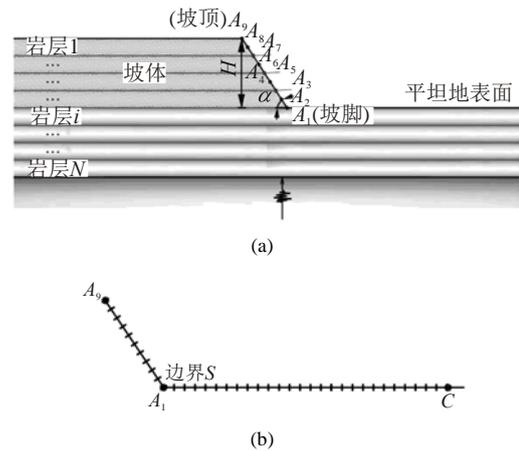


图 1 层状半空间中岩质斜坡模型

Fig.1 Rock slope model in a layered half space

上进行合理的单元划分以及合适的积分区间设定, 在保证精度的同时尽可能提高求解效率。

模型求解步骤为: (1) 将总波场分解为散射波场和自由波场两部分; (2) 在倾斜和水平边界上分别施加虚拟均布荷载于边界单元上, 求解动力格林函数, 以模拟斜坡地形产生的散射波场。自由波场可由直接刚度法方便求得; (3) 引入斜坡地表面零应力边界条件, 确定虚拟荷载密度, 求得散射波场, 进而得到总波场响应。

2.2 动力刚度矩阵及自由波场求解

自由波场可由直接刚度法求解得到:

$$Q = S_{P-SV} U \quad (1)$$

式中: S_{P-SV} 为层状半空间整体动力刚度矩阵, 可通过集整层刚度矩阵 S_{P-SV}^L 和半空间刚度矩阵 S_{P-SV}^R 得到, S_{P-SV}^L 和 S_{P-SV}^R 具体元素见 J. P. Wolf^[28]的研究; $Q = \{P_1, iR_1, P_2, iR_2, \dots, P_{N+1}, iR_{N+1}\}^T$ 为由层交界面上外荷载幅值组成的向量, $U = \{u_1, iw_1, u_2, iw_2, \dots, u_{N+1}, iw_{N+1}\}^T$ 为相对应的位移幅值向量。对于由基岩面入射地震波情况(露头选在基岩面), Q 的最后二个元素由下式确定(其余元素为 0):

$$\begin{Bmatrix} P_b \\ iR_b \end{Bmatrix} = S_{P-SV}^R \begin{Bmatrix} u_0 \\ iw_0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中: P_b 和 R_b 分别为 x, z 向的基岩面处荷载幅值; u_0 和 w_0 为相对应的位移幅值。将式(2)代入式(1), 可求得层交界面上的位移幅值, 进而可得到边界上任意点 $x = (x, z)$ 的位移 $u^f(x)$, $w^f(x)$ 和牵引力 $t_x^f(x)$, $t_z^f(x)$, 上标“f”表示自由波场。

2.3 动力格林函数及散射波场模拟

如前所述, 散射波场通过施加虚拟均布荷载于边界单元产生的动力响应模拟。如图 1(b)所示, 假

定模型边界为 $S = S_1 + S_2$, S_1 表示斜坡面, S_2 表示平坦地表面。将边界 S_1 离散为有限 K_1 个线单元, 每个单元的长度为 $\Delta S_l (l \in [1, K_1])$, 而边界 S_2 理论上无限个线单元, 为在求解上进行合理简化, 引入截断点 C , 同时, 将截取后的边界离散为有限 K_2 个线单元, 每个单元的长度为 $\Delta S_m (m \in [1, K_2])$ 。则求解域内由散射波场引起的位移和牵引力可表示为

$$\left. \begin{aligned} u_i^t(\mathbf{x}) &= u_i^{s_1}(\mathbf{x}) + u_i^{s_2}(\mathbf{x}) = \\ & \sum_{l=1}^{K_1} g_{ij}(\mathbf{x}, \xi_l) \phi_j(\xi_l) + \sum_{m=1}^{K_2} g_{ij}(\mathbf{x}, \xi_m) \phi_j(\xi_m) \\ t_i^t(\mathbf{x}) &= t_i^{s_1}(\mathbf{x}) + t_i^{s_2}(\mathbf{x}) = \\ & \sum_{l=1}^{K_1} t_{ij}(\mathbf{x}, \xi_l) \phi_j(\xi_l) + \sum_{m=1}^{K_2} t_{ij}(\mathbf{x}, \xi_m) \phi_j(\xi_m), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$(i, j = x, z)$

式中: 上标“t”表示总散射波场; $g_{ij}(\mathbf{x}, \xi_l)$, $t_{ij}(\mathbf{x}, \xi_l)$ 分别为斜线均布荷载的位移和牵引力动力格林函数; $g_{ij}(\mathbf{x}, \xi_m)$, $t_{ij}(\mathbf{x}, \xi_m)$ 分别为水平线均布荷载的位移和牵引力动力格林函数, 表示在边界 $S_1(S_2)$ 上第 $l(m)$ 个单元(中点为 $\xi_l(\xi_m)$) 施加沿 j 方向的密度为 $\phi_j(\xi_l)$ ($\phi_j(\xi_m)$) 的斜线(水平)均布荷载时, 点 \mathbf{x} 处产生的沿 i 方向的位移和牵引力。

本文采用的格林函数包括斜线均布荷载格林函数和水平线均布荷载格林函数。对于斜线格林函数, Z. Ba 等^[27-28]中已给出了详细的求解过程, 在此不再赘述。对于水平格林函数, 求解时只需将虚拟均布荷载直接作用在水平边界单元上, 运用“直接刚度法”得出各层的动力响应。

2.4 边界条件

边界 S 上的零牵引力条件可由下式求得, 边界条件取为在每个单元上独立满足:

$$\int_S [t_i^t(\mathbf{x}_n) + t_i^f(\mathbf{x}_n)] dS = 0 \quad (i = x, z) \quad (4)$$

式中: n 为求解时离散边界上的总单元数。

将式(3)代入式(4)可得到施加在边界上的虚拟均布荷载密度, 进而可求得场地任意位置的响应。而以上分析都是在频域内进行的, 时域结果可经由快速傅里叶逆变换叠加频域结果求得。

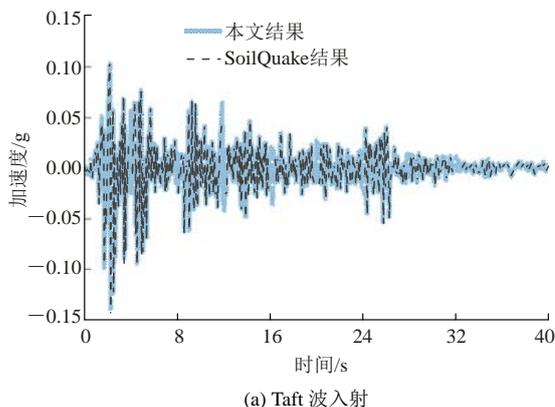
3 方法实现与精度讨论

如图 1 所示, 无论坡角如何变化, 距离坡体足

够远处的场地反应均可看作自由场, 本节以坡面与平坦地表面垂直($\alpha = 90^\circ$)的情况为例, 将距离坡体 $100H$ 的地表响应与土层地震反应分析程序 SoilQuake^[29]的自由场求解结果进行比较, 以验证本文方法正确性。需要指出的是, 尽管 SoilQuake 主要用于土体非线性地震响应求解, 但对于线弹性假设, 无论土体还是岩体都是适用的, 所得结果也可与经典地震波自由场求解程序 EERA^[30]相互验证。假定层状斜坡场地由 3 层不同岩性材料组成, 验证参数取为: 各层厚度 $d_1 = d_2 = d_3 = 20 \text{ m}$; 弹性模量 $E_1 = 5.03 \text{ GPa}$, $E_2 = 16.6 \text{ GPa}$, $E_3 = 31.6 \text{ GPa}$; 泊松比 $\nu_1 = 0.32$, $\nu_2 = 0.27$, $\nu_3 = 0.23$; 密度 $\rho_1 = 2350 \text{ kg/m}^3$, $\rho_2 = 2550 \text{ kg/m}^3$, $\rho_3 = 2650 \text{ kg/m}^3$; 阻尼比 $\zeta_1 = \zeta_2 = \zeta_3 = 0.05$ 。分别选取 Taft 波(0.1g)、El Centro 波(0.1g)和 Loma Pretia 波(0.1g)作为输入地震波作用于基岩露头。图 2 给出了波垂直入射时自由场地表加速度时程曲线, 从图中可以看出, 本文计算结果与 SoilQuake 给出的结果十分吻合, 与 SoilQuake 相比, 本文方法在 3 种地震波下的加速度峰值误差均小于 1%, 验证了 IBEM 求解结果的正确性和计算精度。

本文给出了一种用于求解层状半空间中岩质斜坡场地地震响应的 IBEM, 在程序实现时可结合 OpenMP 高性能并行技术, 具有计算精度高、求解速度快的显著特点。以下分析所建立 IBEM 求解模型的收敛性, 假定斜坡由均质岩体组成, 分析参数取为: 坡体介质与上述第一层岩体相同, 坡高为 80 m , 坡面与地表面的夹角为 70° 。图 3 给出了不同入射频率下具有代表性的斜坡观测点地表位移幅值随截断距离 D_{\max} 的变化。

从图 3 中可以看出, 随着截断距离的增大, 计算结果逐渐趋于稳定, 无论是低频率($f = 2.5 \text{ Hz}$)还



(a) Taft 波入射

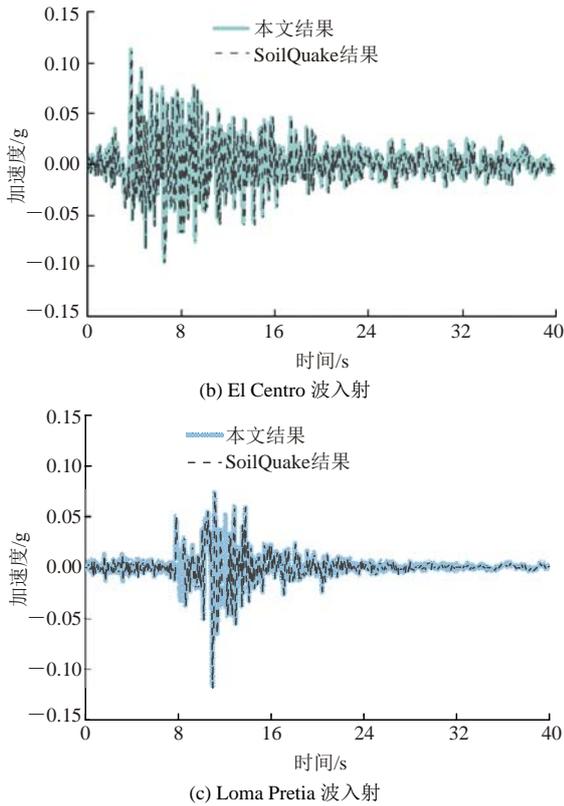


图2 自由场地表加速度时程曲线

Fig.2 Acceleration time history curves of the surface of free field

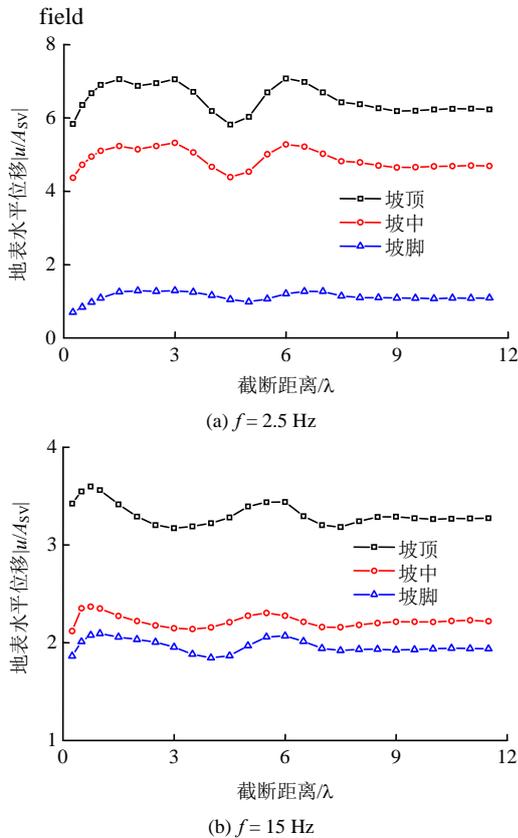


图3 不同入射频率下各位置点位移随截断距离 D_{max} 收敛情况

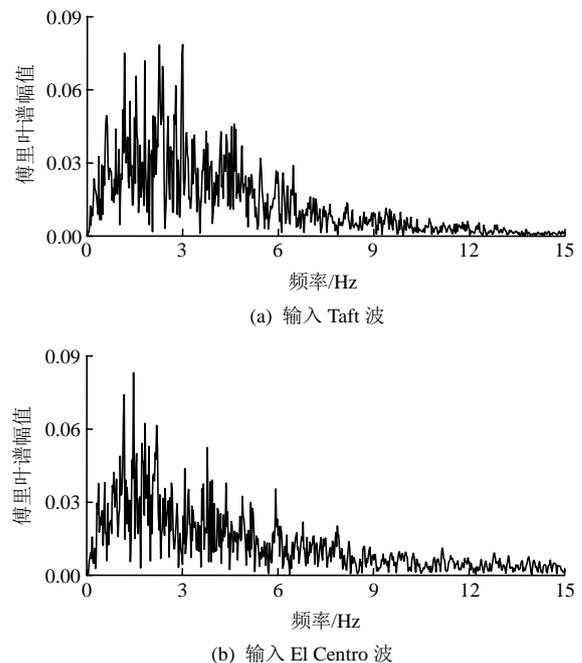
Fig.3 Convergence of the displacement amplitude versus the cutoff distance at some positions with different incident frequencies

是高频率($f = 15 \text{ Hz}$), 位移幅值随截断距离的增大均有较好的收敛性, 当截断距离大于 8 倍波长时, 地表位移的幅值变化已很小。可见, 间接边界元法具备的快速收敛特性是一个在工程分析中值得借鉴的方法。后文计算中, 取 $D_{max} = 10\lambda$ 来满足离散距离的精度要求。其次, 对于边界单元离散的精度和由波数域到空间域积分的精度保证, 本文经过验算, 采用每波长 12 个单元来离散, 最大积分波数段取为 $k_{max} = 200 \sim 500$, 最小的积分间隔取为 $\Delta k = 0.000\ 05 \sim 0.000\ 1$, 以达到满意的计算精度。

4 地震输入与计算工况

近震中地震波能量较大, 对岩质斜坡具有巨大的破坏性, 为研究真实地震波作用下斜坡场地的时域地震反应问题, 本文选取 3 条不同地震波作为输入地震动由基岩面入射, 假定理想基岩为刚性, 其弹性模量 $E_R = 39.8 \text{ GPa}$ 、密度 $\rho_R = 2\ 650 \text{ kg/m}^3$ 、泊松比 $\nu_R = 0.2$ 。为方便对比分析, 计算时所有地震波的水平加速度峰值均取为 0.2 g , 持时均为 40 s , 相应的傅里叶频谱特性(FFT 曲线)如图 4 所示。其次, 实际斜坡场地效应(包含地形的放大效应和地层的放大效应)受不同条件的影响, 因素众多, 本文选择斜坡坡体几何参数和弹性模量两个重要因素进行分析研究。

首先, 研究几何参数对岩质斜坡动力响应的影响, 具体考虑斜坡坡高 H 和坡角 α 的变化。依据规



(b) 输入 El Centro 波

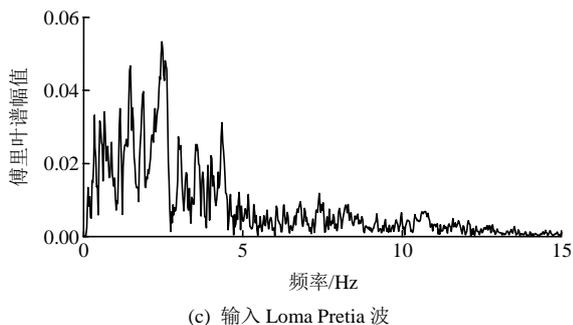


图 4 输入地震波的 FFT 曲线

Fig.4 FFT property of the earthquake wave used as input

范^[31]相关规定，为便于后文讨论，本文选取坡高研究范围为 15~80 m，坡角研究范围为 14°~70°，计算工况如表 1 所示。同时，为获得一般性规律，排除岩体因素的影响，考虑岩性分别为软质岩和硬质岩两种情况，参数取值如下：弹性模量 $E_{软} = 5.03$ GPa, $E_{硬} = 31.6$ GPa; 泊松比 $\nu_{软} = 0.32$, $\nu_{硬} = 0.23$; 密度 $\rho_{软} = 2\ 350$ kg/m³, $\rho_{硬} = 2\ 650$ kg/m³; 阻尼 $\zeta_{软} = \zeta_{硬} = 0.05$ 。

表 1 计算工况

Table 1 Calculation conditions

序号	参数名称	参数取值
①	斜坡坡高 H/m	15, 30, 50, 80
②	斜坡坡角 $\alpha(^{\circ})$	14, 28, 42, 56, 70
③	岩性	软质岩(IV 级)、硬质岩(II 级)
④	输入地震波	Taft 波(0.2g), El Centro 波(0.2g), Loma Pretia 波(0.2g)

其次，研究弹性模量对岩质斜坡动力响应的影响。假定斜坡几何参数为定值($H = 80$ m, $\alpha = 70^{\circ}$)，仅讨论弹性模量的变化。取值原则如下：参照分级标准^[32]，将岩体按基本质量定性特征分为 I~V 级，根据各级岩体物理力学参数的取值范围，每级选取具有代表性的 2 组材料参数，共 10 组参数。需要指出的是，这里的材料参数仅考虑弹性模量的变化以方便结果的定量分析，其余参数取为均值，如表 2 所示。

计算时，在斜坡坡面分别设置 9 个监测点 $A_1 \sim A_9$ (见图 1)，其位置(以相对高程表示)依次为 $h/H = 0.0, 0.125, 0.25, 0.375, 0.5, 0.625, 0.75, 0.875$ 和 1.0，其中，监测点 0.0 和 1.0 分别代表坡脚和坡顶位置，其余点均位于斜坡坡面上。

表 2 岩体材料参数

Table 2 Material parameters of rock mass

岩性	分级	弹性模量 E/Pa	泊松比 ν	密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$
硬质岩 (I~II 级)	坚硬岩	3.89×10^{10}	0.27	2 450
		3.44×10^{10}		
	较硬岩	3.01×10^{10}	0.27	2 450
软质岩 (III~V 级)	较软岩	1.48×10^{10}	0.27	2 450
		9.72×10^9		
	软岩	5.04×10^9	0.27	2 450
		3.05×10^9		
极软岩	1.26×10^9	0.27	2 450	
	7.62×10^8			

5 结果与讨论

5.1 斜坡加速度时域响应分析

计算结果表明，不同输入地震波的斜坡加速度响应具有相似的规律，限于篇幅本节仅给出 Taft 波的响应结果。分析时，以加速度峰值(PGA)放大系数来反映斜坡场地的动力响应，其定义为斜坡表面任一点的 PGA 与自由场的 PGA 之比(即参考点取在自由场)。根据本文在斜坡坡面上的观测点数，可得到 9 个高程放大系数来反映每一坡面的加速度变化情况，相比已有研究(杨国香等^[10, 13]、张泽林等^[15]和李勇^[20])的 3~5 个布设点，可更好地分析斜坡响应规律。

5.1.1 水平向与竖向加速度响应

同一坡角($\alpha = 14^{\circ}$)不同坡高下的斜坡水平加速度响应和竖向加速度响应的比较结果如图 5 所示，可以发现，无论是软质岩还是硬质岩，对应斜坡的水平向加速度响应均明显大于竖向加速度响应，与刘汉香等^[11-16]的研究结果相符。笔者在数值计算的基础上，对文中所有工况(不同地震波、岩性和几何参数)的结果进行了统计，得到以下结论：在本文参数研究范围内，对于软质岩斜坡，其水平向的 PGA 放大系数是竖向的 1.04~1.51 倍；对于硬质岩斜坡，其水平向的 PGA 放大系数是竖向的 1.0~1.14 倍。鉴于此，后文主要讨论水平加速度放大效应。

5.1.2 坡体几何参数对加速度响应的影响

图 6 给出了坡体几何参数不同时，岩质斜坡坡面 PGA 放大系数随相对高程的变化。由图可见：

- (1) 地震作用下斜坡加速度具有显著的高程放

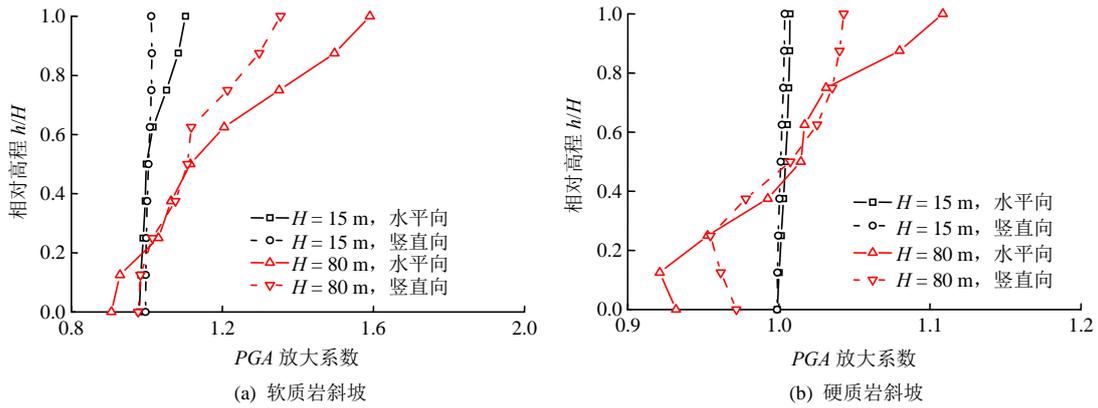


图5 斜坡水平加速度响应与竖向加速度响应的比较

Fig.5 Comparison between the horizontal and vertical acceleration responses

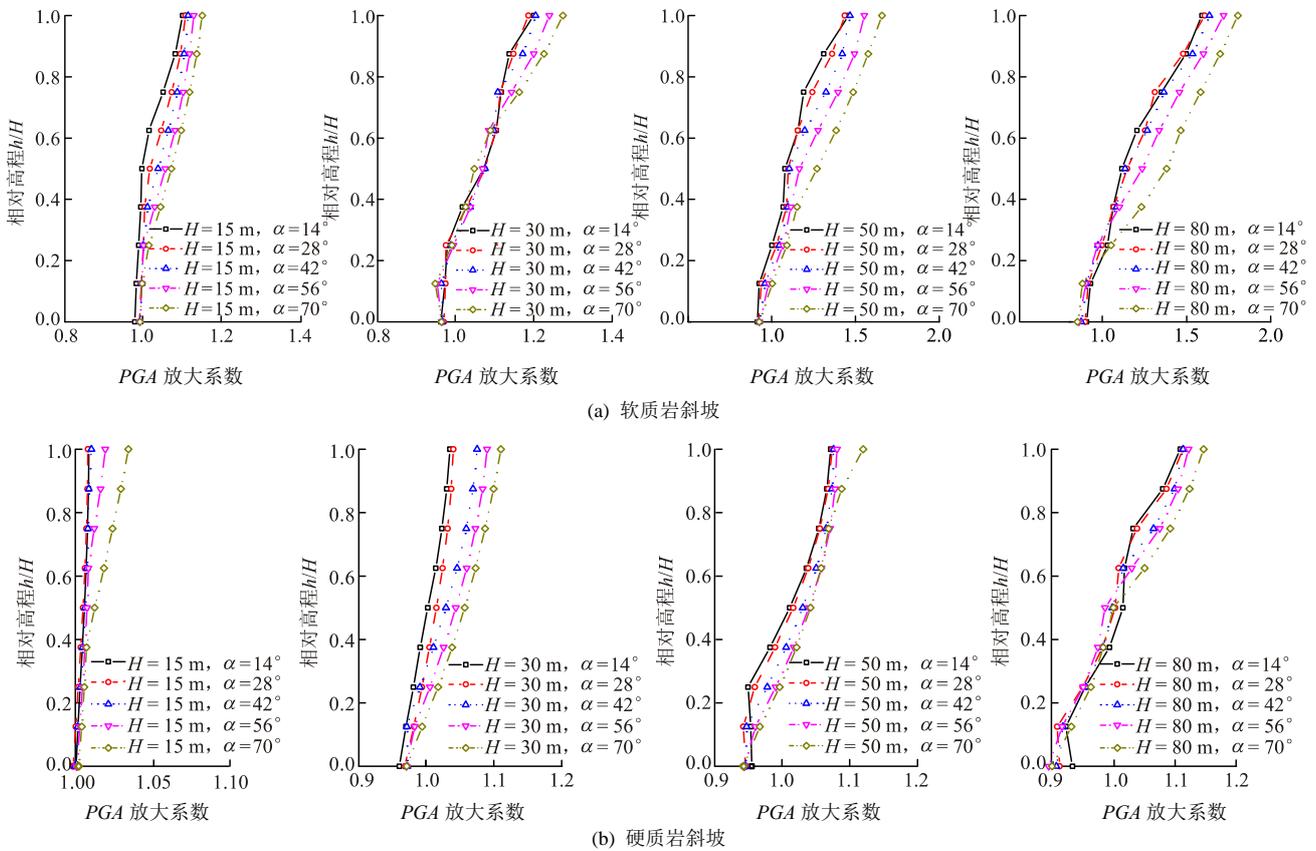


图6 坡体几何参数变化对斜坡加速度响应的影响

Fig.6 Effect of geometry parameters of slope on the ground acceleration response

大效应。随着相对高程的增加，斜坡坡面 PGA 放大系数呈现非线性增大的趋势，其峰值一般出现在坡顶位置。

(2) 斜坡动力响应的高程放大效应主要集中在坡体中上部。总体上，当 $h/H < 0.3$ ，PGA 放大系数的变化较小，当 $h/H \geq 0.3$ ，PGA 放大系数增大迅速，且坡高越低、坡度越缓时，这种规律越明显。

(3) 靠近坡脚位置的动力响应存在缩小效应。这是由于上部突出地形与下部半空间体的相互作用，改变了斜坡场地的动力特性，使得坡脚处及坡

体下部的 PGA 略小于自由地表面的 PGA。可见，若将放大系数的参考点取在坡脚处，可能会严重高估整体放大效应。

为便于分析，图 7，8 进一步分别给出了坡顶 PGA 放大系数随坡角和坡高的变化曲线。由图可见：

(1) 总体而言，坡角和坡高对斜坡坡顶加速度响应均有重要影响，且在不同岩性下其加速度响应具有相似的变化规律，但软质岩斜坡的地震效应更为显著。

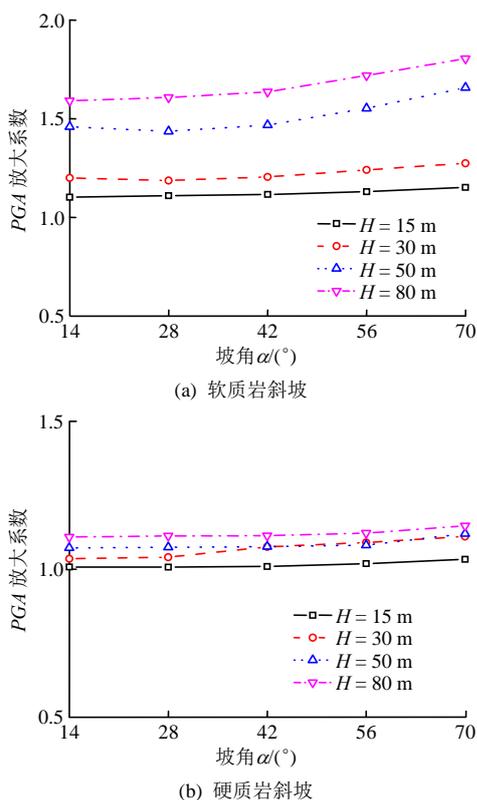


图 7 斜坡坡顶 PGA 放大系数与坡角的关系

Fig.7 Relationships between the PGA magnification factor of the top of the slope with the slope angle

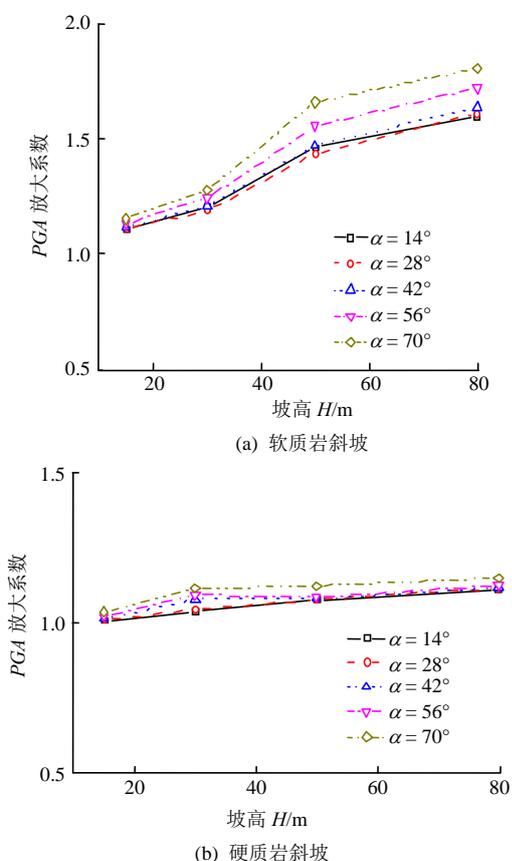


图 8 斜坡坡顶 PGA 放大系数与坡高的关系

Fig.8 Relationship between the PGA magnification factor of the top of the slope with the slope height

(2) 随着斜坡坡角的增大, *PGA* 放大系数表现为增大的趋势。当坡角较小时, *PGA* 放大系数的变化幅值不大, 同时出现了 $\alpha = 14^\circ$ 斜坡的 *PGA* 放大值略大于 $\alpha = 28^\circ$ 的情况, 仅坡高为 80 m 斜坡的 *PGA* 放大系数随坡角变化而增大明显。这体现了低坡动力响应的强烈非线性特征, 但整体上仍可视作坡角的增大对斜坡加速度的放大影响有促进作用。

(3) 随着斜坡坡高的增大, *PGA* 放大系数也逐渐增大。当坡高低于 50 m 时, 斜坡 *PGA* 放大系数随坡高变化增大较迅速, 当坡高高于 50 m 时, 斜坡 *PGA* 放大系数增大趋势有所减弱, 这表明斜坡的动力响应不会随着坡高的增加而一直增大。

5.1.3 弹性模量对加速度响应的影响

图 9 给出了坡体介质弹性模量不同时, 岩质斜坡坡面 *PGA* 放大系数随相对高程的变化。由图可见, 弹性模量的变化对斜坡加速度动力响应有显著的影响, 具体表现为:

(1) 弹性模量大于 5.04 GPa 时, 随着相对高程的增加, 斜坡坡面 *PGA* 放大系数的非线性特征较弱, 高程放大效应集中在坡体上部($h/H > 0.5$)。

(2) 弹性模量小于 5.04 GPa 时, 随着相对高程的增加, 斜坡坡面 *PGA* 放大系数的非线性特征十分明显。相对坡高较低时, 放大系数略小于 1, 且变化不明显; 随着相对坡高的增大, 放大系数迅速非线性增大, 至坡顶达到峰值。

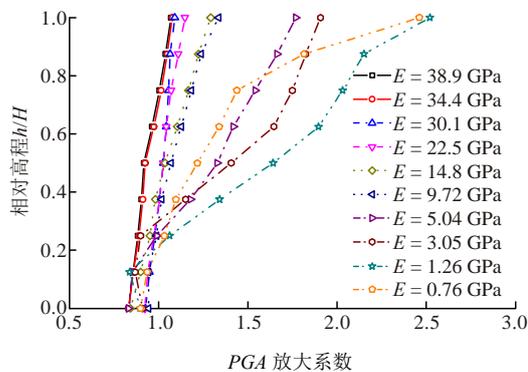


图 9 弹性模量变化对斜坡加速度响应的影响

Fig.9 Effect of the elastic modulus of the slope on the ground acceleration response

根据工程岩体分级标准, 弹性模量小于 6 GPa 的岩体可对应到软岩和极软岩, 其工程性质具有强度低、易软化和稳定性弱的特点, 因此, 在规范制定和工程应用中应尤其注意到这两类斜坡的潜在破坏。

图 10 进一步给出了坡顶 *PGA* 放大系数随弹性模量的变化曲线。由图可见:

(1) 随着弹性模量的增大, *PGA* 放大系数表现

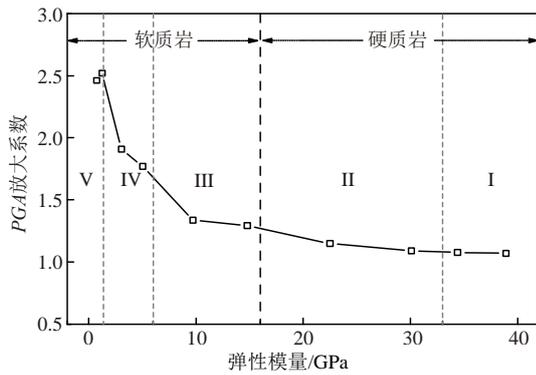


图 10 斜坡坡顶 PGA 放大系数与弹性模量关系

Fig.10 Relationship between the PGA magnification factor of the top of the slope with the elastic modulus

为衰减趋势。因弹性模量的差异，具有相同几何特性的斜坡放大系数最大相差近 2.5 倍，可见地震作用下斜坡体的地层放大效应十分显著。

(2) 软质岩 PGA 放大系数的衰减程度更明显。以工程岩体分级标准对结果分段，可以看出，PGA 放大系数的衰减发生段主要集中在 III 级和 IV 级岩质斜坡上，后续研究可对这 2 类斜坡的响应规律作深入分析。

5.1.4 结果与相关规范比较

设计规范^[31]归纳了突出地形(包括非岩质地层和岩质地层两类，本文考虑后者)顶部加速度放大系数随坡高 H 和坡度 H/L 变化的参考值，将其换算为放大系数与坡高 H 和坡角 α 的关系，并与本文不同地形(斜坡几何参数)的计算结果进行比较，结果如表 3 所示。由表 3 可知，规范给定的放大系数参考值以四类坡高、四类坡度(角)为归类基准，每组规范值的分类间隔为 0.1，最大放大系数规定为 1.6。基于本文计算结果，对规范提出以下建议，可供参考：

(1) 目前规范在一定程度上低估了地形效应的影响，应扩大或细分放大系数对坡度(角)和坡高的规定。对于前者，规范将坡度 $H/L > 1.0$ 、即坡角 45° 以上的情况均归为一类，而计算结果显示坡角

70° 时放大系数明显大于坡角 56° (见图 7)；对于后者，规范将坡高 $H > 60\text{ m}$ 的情况均归为一类，而王斌等^[33]结果表明，坡高大的斜坡放大系数可能远远大于规范值。因此，建议扩大或细分规定的范围。

(2) 目前规范未考虑岩性的影响，应对不同类型的斜坡进行分类，给出相应范围。本文和刘汉香等^[13]结果均显示，岩性对放大系数有重要影响，同一地形的斜坡，软质岩与硬质岩的放大系数相差较大(见图 9)。

由此可见，对于不同地形地质条件，不能简单套用该参考规范，否则会对工程设计造成不利影响：取值过大，则会增加投资、影响工期；取值过小，则会产生潜在危险。

5.2 斜坡坡顶动力响应规律的拟合分析

以上分析揭示了斜坡动力响应的一些基本规律，为使本文研究能为抗震设计和后续工程应用提供直接参考，以下通过拟合方法给出坡顶地震动放大规律的定量结果。

5.2.1 几何特性趋势拟合

图 11 给出了不同入射地震波的斜坡坡顶放大系数随坡高和坡角而变化的三维曲面，为方便给出定量结果，图中的坡角单位已换算为弧度制。可见，不同地震波作用下几何参数变化对斜坡地震动放大影响趋势相似，根据三维曲面走势，以坡高 H 和坡角 α 为自变量，放大系数 F 为因变量，提出下式作为斜坡坡顶动力响应规律的计算公式，并对几何特性趋势进行拟合：

$$F = F_0 + aH + b\alpha + c\alpha^2 + dH\alpha \quad (5)$$

式(5)中的待求解系数为 F_0, a, b, c, d ，根据拟合结果，得到相应的非线性拟合参数如表 4 所示。为适应不同输入地震波，以参数平均值作为建议取值，得到本文工况下几何参数对放大系数影响的拟合结果为：对于软质岩斜坡，有 $F_0 = 1.100, a = 0.006, b = -0.191, c = 0.171, d = 0.003$ ；对于硬质岩斜坡，有 $F_0 = 1.029, a = 0.001, b = -0.075, c = 0.060, d = 0.001$ 。

表 3 斜坡坡顶 PGA 放大系数计算结果与规范比较

Table 3 Comparison between the PGA magnification factors of the top of the slope calculated by the method and the specification

坡高/m	硬质岩~软质岩(括号内为规范参考值)				
	$\alpha = 14^\circ$	$\alpha = 28^\circ$	$\alpha = 42^\circ$	$\alpha = 56^\circ$	$\alpha = 70^\circ$
$H < 20$	1.004~1.267(1.0)	1.007~1.264(1.1)	1.009~1.343(1.2)	1.018~1.448(1.3)	1.033~1.570(1.3)
$20 < H < 40$	1.035~1.450(1.1)	1.040~1.484(1.2)	1.075~1.549(1.3)	1.090~1.618(1.4)	1.110~1.732(1.4)
$40 < H < 60$	1.065~1.559(1.2)	1.067~1.567(1.3)	1.076~1.737(1.4)	1.108~1.768(1.5)	1.119~1.831(1.5)
$H > 60$	1.109~1.598(1.3)	1.113~1.694(1.4)	1.146~1.793(1.5)	1.194~1.858(1.6)	1.240~2.015(1.6)

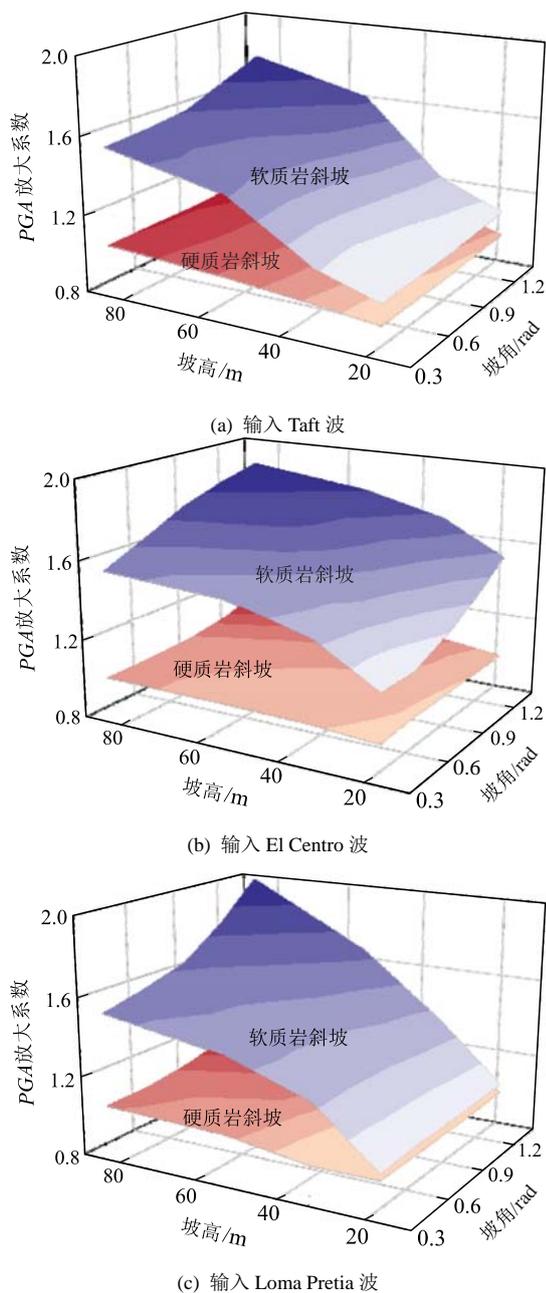


图 11 斜坡坡顶动力响应随坡高和坡角变化的规律
Fig.11 Dynamic responses of the top of the slope with the height and angle of the slope

5.2.2 弹性模量趋势拟合

图 12 给出了不同入射地震波的斜坡坡顶放大系数随弹性模量的变化情况。可见，不同地震波作用下弹性模量变化对斜坡地震动放大影响趋势相似，在弹性模量 $E \in [1.26 \text{ GPa}, 38.9 \text{ GPa}]$ 范围内，放大曲线均为非线性减小，因此，根据该范围内图形的变化特征，以弹性模量 E 为自变量，放大系数 F 为因变量，提出下式作为斜坡坡顶动力响应规律的计算公式，并对弹性模量趋势进行拟合：

$$F = Ax^B \quad (6)$$

表 4 几何参数对放大系数影响的拟合参数

Table 4 Fitting parameters of the influence of geometric characteristics on the amplification factor

岩性 (地震波)	拟合参数					拟合精度
	F_0	a	b	c	d	
软质岩 (T/E/L)	1.037	0.007	-0.284	0.194	0.003	0.965
	1.127	0.006	0.183	0.084	0.000	0.958
	1.137	0.005	-0.471	0.235	0.006	0.987
建议取值	1.100	0.006	-0.191	0.171	0.003	-
硬质岩 (T/E/L)	0.980	0.002	-0.021	0.049	0.000	0.927
	1.066	0.000	-0.091	0.059	0.001	0.916
	1.040	0.000	-0.113	0.072	0.002	0.955
建议取值	1.029	0.001	-0.075	0.060	0.001	-

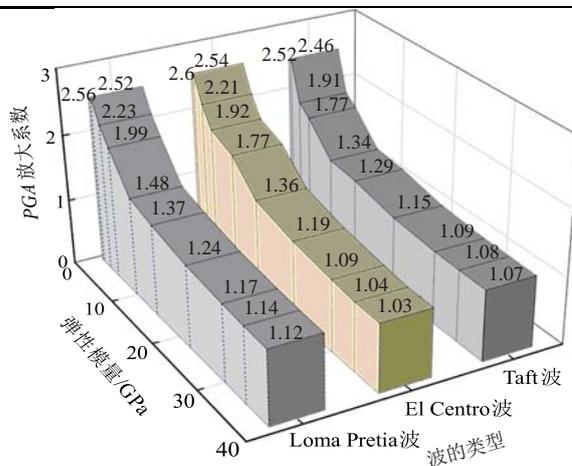


图 12 斜坡坡顶动力响应随弹性模量变化的规律
Fig.12 Dynamic response of the top of the slope with the elastic modulus

根据不同输入地震波的计算结果，采用并置拟合的方法，得到放大系数的拟合曲线，如图 13 所示。求解待定系数 A, B ，得到本文工况下弹性模量对放大系数影响的拟合结果为 $F = 2.77x^{-0.26}$ 。

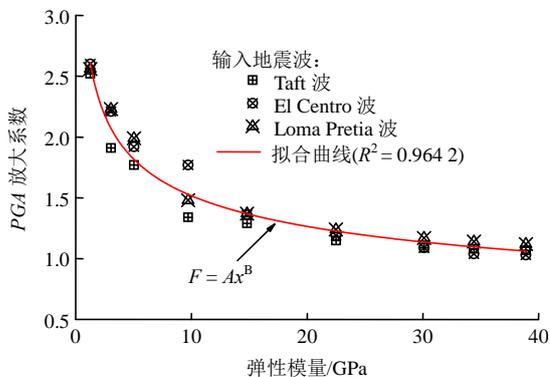


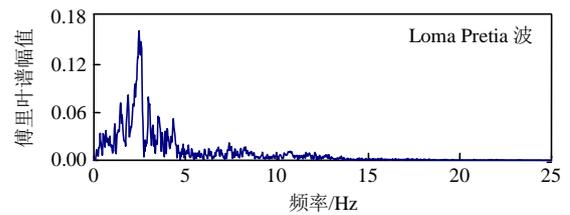
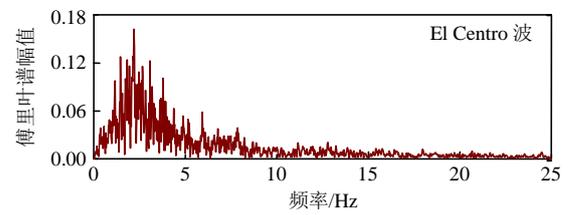
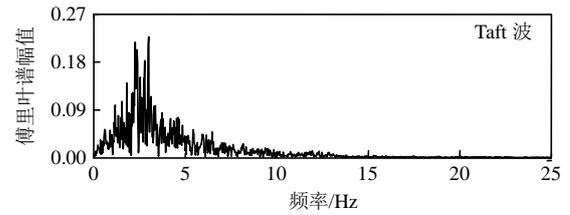
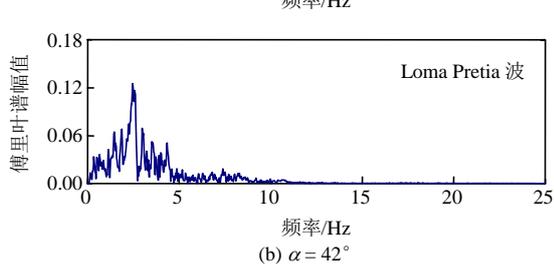
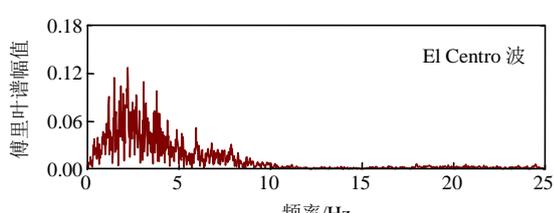
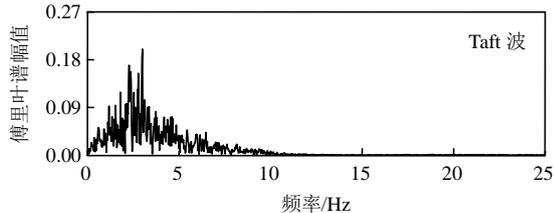
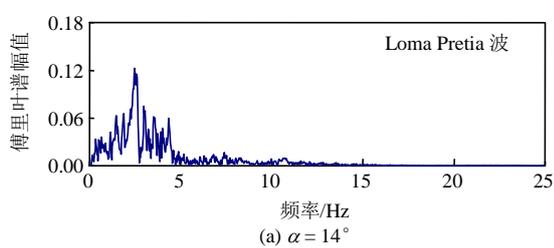
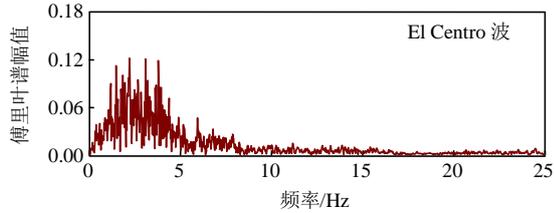
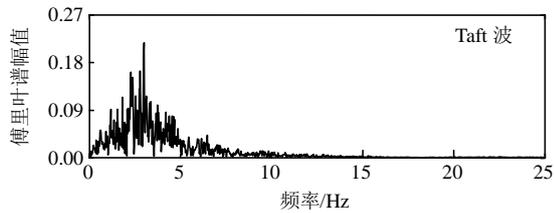
图 13 弹性模量对放大系数影响的拟合曲线
Fig.13 Fitting curve of the influence of the elastic modulus on the amplification factor

5.3 斜坡坡顶动力响应的频谱分析

5.3.1 傅里叶谱

为分析地形地质条件对斜坡地震动谱特性的影响，计算得到不同坡角、坡高和弹性模量下斜坡坡顶的傅里叶谱分别如图 14~16 所示，其中，在分析某一变量的影响规律时，其余变量已取为定值。由图可见：

(1) 坡体几何参数和弹性模量对斜坡坡顶响应的频谱特征均有重要影响，变化趋势与时域 PGA 放大系数反映的规律基本一致。不同输入地震波下的斜坡坡顶傅里叶谱变化规律均为：随着坡角的增大，坡顶的傅里叶谱幅值有增大趋势，而形状无明显



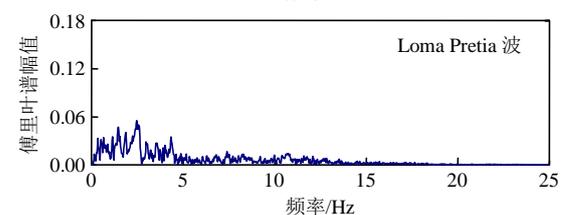
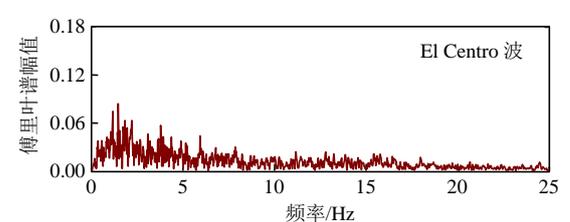
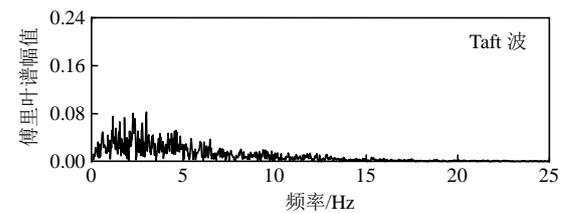
(c) $\alpha = 70^\circ$

图 14 不同坡角下斜坡坡顶的傅里叶谱

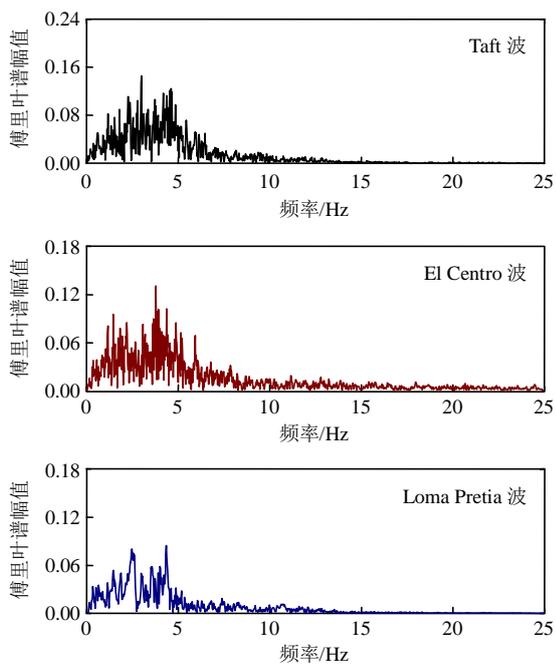
Fig.14 Fourier spectrums of the top of the slope with different angles

显变化；随着坡高的增大和弹性模量的减小，坡顶的傅里叶谱幅值逐渐增大，且形状上表现为由多峰特征向单峰特征转变。

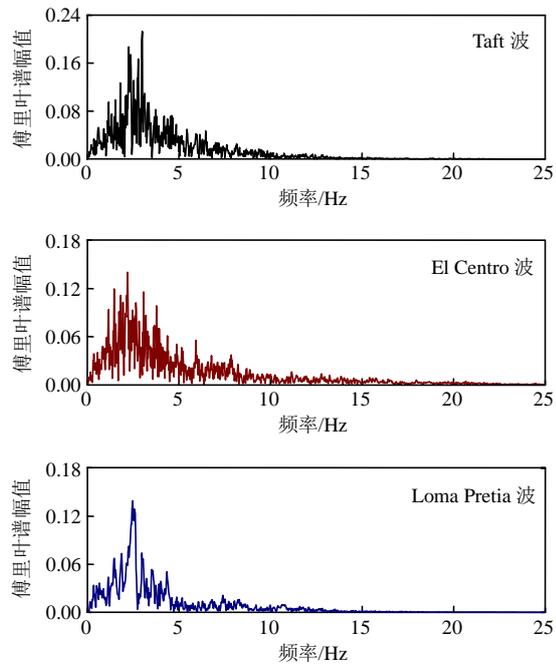
(2) 坡高和弹性模量的变化改变了场地地表的卓越频率。由于傅里叶谱形的不同，谱峰值对应的主频段发生变化，已知 3 种输入地震波下自由场地表的卓越频率分别为 3.0、2.2 和 2.5 Hz，可见，坡角的变化未影响斜坡的卓越频率，而坡高和弹性模



(a) $H = 15$ m



(b) $H = 50\text{ m}$



(c) $H = 80\text{ m}$

图 15 不同坡高下斜坡坡顶的傅里叶谱

Fig.15 Fourier spectrums of the top of the slope with different heights

量的变化使得斜坡的卓越频率明显改变。

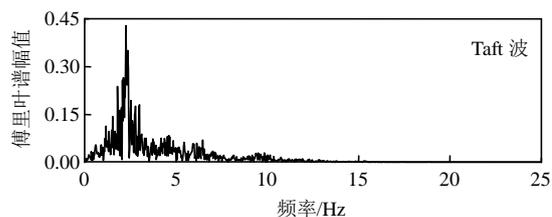
5.3.2 谱比曲线

由于傅里叶谱特征并不能反映地形地质对地震动的放大程度，故引入谱比曲线来定量评估斜坡场地的放大效应，谱比的定义为斜坡地表地震动与基岩输入地震动的傅里叶谱之比，同时，根据 $a = \omega^2 u$ 及 FFT 的定义可知，谱比曲线可等效于位移幅值放大谱曲线，其变化趋势与输入地震波无关。图 17

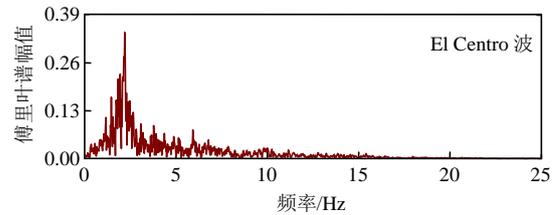
给出了不同条件下斜坡坡顶的傅里叶谱比曲线，限于篇幅，坡角(见图 17(a))、坡高(见图 17(b))及弹性模量(见图 17(c))的影响仅给出了具有代表性的计算结果。由图可见：

(1) 坡角的影响。总体上不同坡角的谱比曲线随频率的变化规律相似，其影响主要体现在谱比峰值上，综合本文所有坡角的结果，得到如下定量结论：坡角对应的斜坡坡顶地震动谱放大效应最大为 3.11、最小为 2.46，放大倍数相差 1.26 倍。

(2) 坡高的影响。随着坡高的增大，低频段的谱比值逐渐增大，表现为频谱图中的低频成分更为



(a) $E = 1.26\text{ GPa}$



(b) $E = 9.72\text{ GPa}$

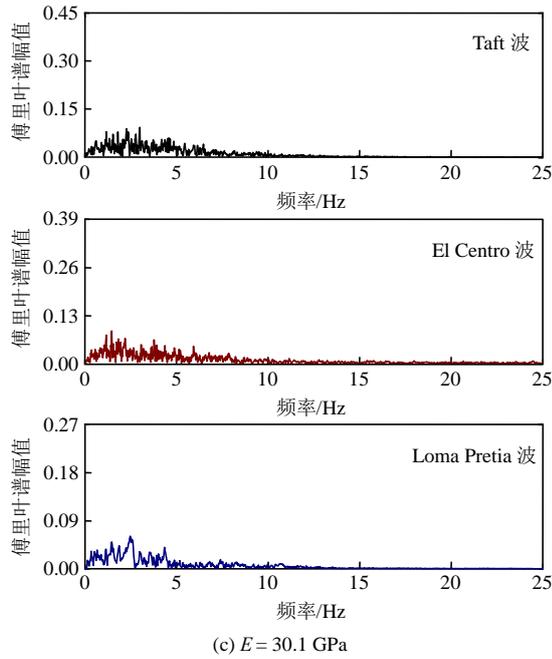


图 16 不同弹性模量下斜坡坡顶的傅里叶谱

Fig.16 Fourier spectrums of the top of the slope with different elastic moduli

丰富, 可见, 坡高的影响主要体现在峰值对应的振动频率上, 综合本文所有坡高的结果, 得到如下定量结论: 坡高对应的斜坡坡顶地震动第一峰值频率最大为 15.7 Hz、最小为 2.6 Hz, 频率差值比为 6.0 倍。

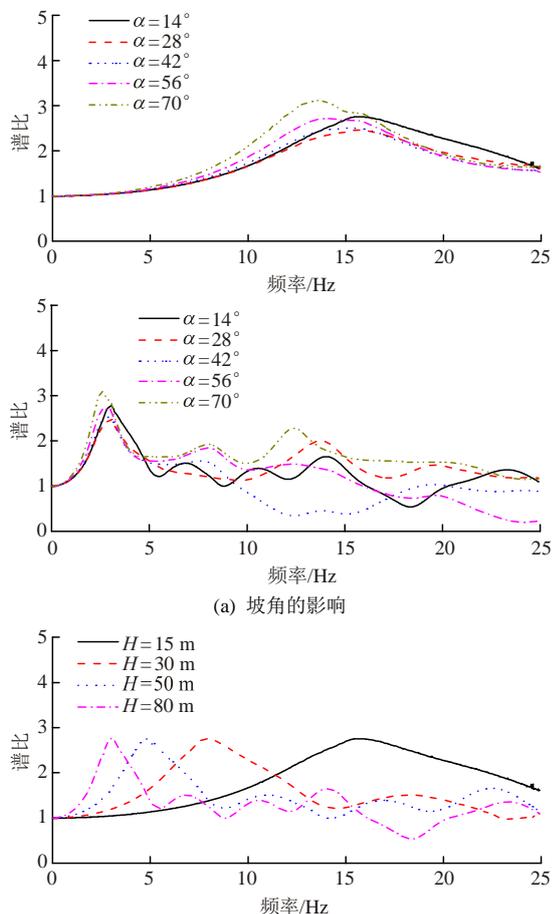


图 17 斜坡坡顶傅里叶谱比曲线

Fig.17 Fourier spectral ratio curves of the top of the slope

(3) 弹性模量的影响。随着弹性模量的增大, 谱比峰值逐渐减小, 第一峰值频率由低频向高频移动, 且存在分界值 $E = 5.04 \text{ GPa}$: 当弹性模量低于该值时, 峰值衰减十分迅速, 振动主频以低频为主; 当弹性模量超过该值时, 峰值衰减变缓, 振动主频向中高频迁移, 且具有明显的单峰特征, 这与时域加速度分析和傅里叶谱所反映的结果是一致的。同时, 可得到如下定量结论: 弹性模量对应的斜坡坡顶地震动谱放大效应最大为 5.56、最小为 1.45, 放大倍数相差 3.83 倍; 弹性模量对应的斜坡坡顶地震动第一峰值频率最大为 7.7 Hz、最小为 2.2 Hz, 频率差值比为 3.5 倍。

另外, 谱比曲线也更加清晰地体现出岩性对场地效应的影响, 即软质岩斜坡具有显著的低频放大效应对高频成分的“隔震效应”。

6 结 论

(1) 地震作用下岩质斜坡的水平向加速度响应均明显大于竖直向加速度响应, 基于本文的参数分析, 对于软质岩斜坡, 其水平向的 PGA 放大系数最大为竖直向的 1.51 倍, 对于硬质岩斜坡, 其水平向的 PGA 放大系数最大为竖直向的 1.14 倍。

(2) 地震作用下岩质斜坡动力响应具有显著的高程放大效应, 随着相对高程的增加, 斜坡坡面 PGA 放大系数呈现非线性增大的趋势; 水平向的加

速度高程放大效应主要表现在坡体中上部, 且坡高越低、坡度越缓时, 这种规律越明显; 但由于上部突出地形与下部半空间体的相互作用, 靠近坡脚位置的动力响应存在缩小效应。

(3) 坡体几何参数和弹性模量对岩质坡顶斜坡加速度响应均有重要影响, 随着坡角和坡高的增加, *PGA* 放大系数表现为增大趋势, 随着弹性模量的增加, *PGA* 放大系数表现为衰减趋势。同时, 根据不同输入地震波的经验结果, 提出了斜坡坡顶动力响应规律随几何参数和弹性模量变化的计算公式, 可为后续深入定量分析提供参考建议。

(4) 基于本文研究结果与相关规范比较发现: 目前规范在一定程度上低估了地形效应的影响, 应扩大或细分放大系数对坡度(角)、坡高的规定; 其次, 规范未考虑岩性的影响, 应对不同类型的斜坡进行分类, 给出相应范围。

(5) 对斜坡坡顶动力响应的频谱特性分析发现: 斜坡坡顶的傅里叶谱随几何参数和弹性模量的变化与时域 *PGA* 放大系数的规律一致, 坡角对谱峰值、形状和卓越频率影响较小, 而坡高和弹性模量对谱峰值、形状和卓越频率影响较明显。其次, 引入谱比曲线定量评估了斜坡场地的放大效应, 分别得到坡角、坡高和弹性模量对应的斜坡坡顶地震动放大倍数及峰值频率。

参考文献(References):

- [1] 李宏男, 肖诗云, 霍林生. 汶川地震震害调查与启示[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 10 - 19.(LI Hongnan, XIAO Shiyun, HUO Linsheng. Damage investigation and analysis of engineering structures in the Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 10 - 19.(in Chinese))
- [2] CHEN Y, LI L, LI J, et al. Wenchuan earthquake: way of thinking is changed[J]. Episodes, 2008, 31(4): 374 - 377.
- [3] QI S, XU Q, ZHANG B, et al. Source characteristics of long runout rock avalanches triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40(4): 896 - 906.
- [4] TANG H, JIA H, HU X, et al. Characteristics of landslides induced by the great Wenchuan earthquake[J]. Journal of Earth Science, 2010, 21(1): 104 - 113.
- [5] DAVIS L L, WEST L R. Observed effects of topography on ground motion[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1973, 63(1): 283 - 298.
- [6] GAUDIO V D, WASOWSKI J. Directivity of slope dynamic response to seismic shaking[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(12): 107 - 124.
- [7] CHIGIRA M, WU X Y, INOKUCHI T, et al. Landslides induced by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China[J]. Geomorphology, 2010, 118(3): 225 - 238.
- [8] 黄润秋, 李为乐. “5·12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2 585 - 2 592.(HUANG Runqiu, LI Weile. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan earthquake on 12th May, 2008[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2 585 - 2 592.(in Chinese))
- [9] 黄润秋, 王运生, 裴向军, 等. 4·20 芦山 *M_s7.0* 级地震地质灾害特征[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(4): 581 - 589.(HUANG Runqiu, WANG Yunsheng, PEI Xiangjun, et al. Characteristics of co-seismic landslides triggered by the Lushan *M_s7.0* Earthquake on the 20th of April, Sichuan Province, China[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(4): 581 - 589.(in Chinese))
- [10] 杨国香, 伍法权, 董金玉, 等. 地震作用下岩质边坡动力响应特性及变形破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 696 - 702.(YANG Guoxiang, WU Faquan, DONG Jinyu, et al. Study of dynamic responses characteristics and failure mechanism of rock slope under earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 696 - 702.(in Chinese))
- [11] 刘汉香, 许强, 范宣梅, 等. 地震动强度对斜坡加速度动力响应规律的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1 357 - 1 365.(LIU Hanxiang, XU Qiang, FAN Xuanmei, et al. Influence of ground motion intensity on dynamic response laws of slope accelerations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1 357 - 1 365.(in Chinese))
- [12] 刘汉香, 许强, 范宣梅. 地震动参数对斜坡加速度动力响应规律的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(2): 41 - 47.(LIU Hanxiang, XU Qiang, FAN Xuanmei. Effects of seismic parameters on acceleration responses of slopes[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(2): 41 - 47.(in Chinese))
- [13] 刘汉香, 许强, 王龙, 等. 地震波频率对岩质斜坡加速度动力响应规律的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 125 - 133.(LIU Hanxiang, XU Qiang, WANG Long, et al. Effect of frequency of seismic wave on acceleration response of rock slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 125 - 133.(in Chinese))
- [14] 张泽林, 吴树仁, 王涛, 等. 地震作用下黄土泥岩边坡动力响应及破坏特征离心机振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(9): 1 844 - 1 853.(ZHANG Zelin, WU Shuren, WANG Tao, et al. Centrifugal shaking table test on dynamic response and failure characteristics of loess-mudstone slopes under earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(9): 1 844 - 1 853.(in Chinese))
- [15] 张泽林, 吴树仁, 王涛, 等. 地震作用下黄土滑坡加速度深度放

- 大效应及震后变形模式研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(4): 102 - 110.(ZHANG Zelin, WU Shuren, WANG Tao, et al. Study on acceleration depth amplification effect and deformation model of loess landslide under earthquakes[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(4): 102 - 110.(in Chinese))
- [16] 梁双庆, 苏立君, 王 洋. 不同坡面角度碎石土斜坡动力响应特征研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(21): 153 - 158.(LIANG Shuangqing, SU Lijun, WANG Yang. Dynamic response characteristics of gravel soil slope with different angles of inclination[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(21): 153 - 158.(in Chinese))
- [17] 刘汉香. 基于振动台试验的岩质斜坡地震动力响应规律研究[博士学位论文][D]. 成都: 成都理工大学, 2014.(LIU Hanxiang. Seismic responses of rock slopes in a shaking table test[Ph. D. Thesis][D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.(in Chinese))
- [18] 郑颖人, 叶海林, 黄润秋. 地震边坡破坏机制及其破裂面的分析探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1 714 - 1 723.(ZHENG Yingren, YE Hailin, HUANG Runqiu. Analysis and discussion of failure mechanism and fracture surface of slope under earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1 714 - 1 723.(in Chinese))
- [19] 崔芳鹏, 胡瑞林, 殷跃平, 等. 纵横波时差耦合作用的斜坡崩滑效应离散元分析——以北川唐家山滑坡为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 319 - 327.(CUI Fangpeng, HU Ruilin, YIN Yueping, et al. Discrete element analysis of collapsing and sliding response of slope triggered by time difference coupling effects of P and S seismic waves—taking Tangjiashan landslide in Beichuan County for example[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 319 - 327.(in Chinese))
- [20] 李 勇. 岩质边坡动力放大系数及近似计算方法的研究[硕士学位论文][D]. 成都: 西南交通大学, 2013.(LI Yong. The study of the dynamic magnification factor of the rock slope and approximate calculation method[M. S. Thesis][D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.(in Chinese))
- [21] 何蕴龙, 陆述远. 岩石边坡地震作用近似计算方法[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 66 - 68.(HE Yunlong, LU Shuyuan. A method for calculating the seismic action in rock slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(2): 66 - 68.(in Chinese))
- [22] 李英民, 王丽萍, 赵 耀. 坡地地形对竖向地震动反应谱特性的影响分析[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(5): 156 - 161.(LI Yingmin, WANG Liping, ZHAO Yao. Influence of slope terrain on characteristics of vertical ground motion response spectra[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(5): 156 - 161.(in Chinese))
- [23] 张国栋, 陈 飞, 金 星, 等. 边界条件设置及输入地震波特性对边坡动力响应影响分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30(1): 102 - 105.(ZHANG Guodong, CHEN Fei, JIN Xing, et al. Effect of different boundary conditions and seismic waves on seismic response of a slope[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(1): 102 - 105.(in Chinese))
- [24] 刘立波, 李海波, 刘亚群. 单面均质岩体边坡地震放大效应的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增 1): 229 - 237.(LIU Libo, LI Haibo, LIU Yaqun. Numerical simulation of ground motion amplification effect of single-faced homogeneous rock slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(Supp.1): 229 - 237.(in Chinese))
- [25] 梁建文, 张 季, 巴振宁. 层状半空间中洞室群对地震动的时域放大作用[J]. 土木工程学报, 2012, 45(增 1): 152 - 157.(LIANG Jianwen, ZHANG Ji, BA Zhenning. Time-domain amplification of seismic ground motion by group cavities in layered half-space[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(Supp.1): 152 - 157.(in Chinese))
- [26] 巴振宁, 印 泉, 梁建文. 沉积层序对谷地地震反应的影响-SH波入射[J]. 土木工程学报, 2017, 50(1): 95 - 107.(BA Zhenning, YIN Xiao, LIANG Jianwen. Effects of sedimentary sequence on the seismic response of valley sites-incident SH waves[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(1): 95 - 107.(in Chinese))
- [27] BA Z N, YIN X. Wave scattering of complex local site in a layered half-space by using a multidomain IBEM: incident plane SH waves[J]. Geophysical Journal International, 2016, 205(3): 1 382 - 1 405.
- [28] WOLF J P. Dynamic soil-structure interaction[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1985: 312 - 327.
- [29] 袁晓铭, 李瑞山, 孙 锐. 新一代土层地震反应分析方法[J]. 土木工程学报, 2016, 49(10): 95 - 102.(YUAN Xiaoming, LI Ruishan, SUN Rui. A new generation method for earthquake response analysis of soil layers[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(10): 95 - 102.(in Chinese))
- [30] BARDET J P, ICHII K, LIN C H. EERA: a computer program for equivalent-linear earthquake site response analyses of layered soil deposits[M]. California, USA: Department of Civil Engineering, University of Southern California, 2000: 1 - 38.
- [31] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2016.(in Chinese))
- [32] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T 50218—2014 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50218—2014 Standard for engineering classification of rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.(in Chinese))
- [33] 王 斌, 车爱兰, 葛修润. 岩质高陡边坡动力响应及失稳机制大型振动台模型试验研究[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(7): 951 - 956.(WANG Bin, CHE Ailan, GE Xiurun. Shaking table test on earthquake response of discontinuous medium high and steep rock slope[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2015, 49(7): 951 - 956.(in Chinese))