

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. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.05.012.
Hao M H, Zhang Y S. 2014. Analysis of terrain effect on the properties of ground motion. *Acta Seismologica Sinica*, 36(5): 883-894. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.05.012.

凸起地形对地震动特性的影响^{*}

郝明辉^{*} 张郁山

(中国北京 100029 中国地震灾害防御中心)

摘要 采用基于 ABAQUS 平台的显式有限元动力学分析方法, 结合人工黏弹性边界理论, 研究了局部凸起地形对地震动特性(包括反应谱、峰值加速度、峰值速度和峰值位移等)的影响, 分析了台地宽度对地形放大效应的影响. 结果表明: 凸起地形平台段空间点地震动受地形效应影响较大, 在零阻尼条件下, 其谱比曲线呈双峰特点, 即在 0.8—0.9 s 的中长周期段谱比达到一个较大值 1.6, 在 0.08—0.09 s 的高频段谱比超过 2.0, 且最大值出现在平台中点; 对于凸起地形斜坡段, 在大部分周期点处, 顶点的谱比高于其它斜坡点, 而且在周期超过 0.4 s 的频段, 斜坡段观测点的谱比表现出较明显的规律性, 即越靠近顶点的观测点, 其谱比值越大; 坡底段地表不同观测点的谱比基本在脚点与计算边界点(人工边界点)对应的谱比值之间变化, 在不同的频段均表现出较明显的规律性. 凸起地形平台段宽度对地震动高频成分的放大效应具有较大影响, 但只局限在一定的宽度范围内, 随着宽度的增大, 其对地形放大效应的影响逐渐减弱. 此外, 台地宽度的变化对地震动峰值加速度的放大效应有一定的影响, 而对峰值速度、峰值位移的放大效应的影响则不明显.

关键词 地形效应 地震动特性 地形宽度 人工黏弹性边界

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.05.012 中图分类号: P315.9 文献标志码: A

Analysis of terrain effect on the properties of ground motion

Hao Minghui^{*} Zhang Yushan

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

Abstract: The explicit finite element analysis method combined with the artificial viscous-elastic boundary theory based on the platform ABAQUS is performed to evaluate the terrain effects on ground motion (such as the response spectrum, peak acceleration, peak velocity and peak displacement), and the influence of the terrain width on its amplification effects is studied. The results show that the ground motions on the platform are affected most seriously by the topography; in the zero damping conditions, the spectral ratio curves present the characteristics of double peaks, with their values being a higher value of 1.6 in the long period range of 0.8—0.9 s and exceeding 2 in the high-frequency

^{*} 基金项目 国家科技支撑项目(2012BAK15B01)和地震科技星火计划项目(XH14061Y)共同资助.

收稿日期 2013-10-12 收到初稿, 2014-02-19 决定采用修改稿.

^{*} 通讯作者 e-mail: minghuimail@126.com

range of 0.08—0.09 s, and the maximum ratio appearing at the midpoint of the platform. For the slope section, as to most natural periods of response spectrum, the spectral ratios of the vertices are higher than the other surface points on the slope. In addition, in the natural period beyond 0.4 s, the spectral ratios of the spatial points on the slope show some regularity: the closer to the vertex the observation point, the greater the spectral ratio. Spectral ratios of different observation points on the bottom change between spectral ratios corresponding to basic foot point and those to the boundary point, or the artificial boundary point, which is obvious in different frequency bands. The width of terrain imposes significant influence on its amplification effects on high-frequency components of ground motion. However, such influence is limited in some range of width, and with the increase of width, the influence of width on the topographic amplification effects becomes weak. In addition, the width of terrain influences the amplification effect on the peak acceleration of ground motion to some extent, while its influences on the amplification effects on the peak ground velocity and peak ground displacement are not distinct.

Key words: terrain effect; property of ground motion; terrain width; artificial viscous-elastic boundary

引言

大量震害调查、强震观测以及理论研究表明,地形条件对地震动的影响较大,不容忽视.对这一问题,许多学者在解析法(袁晓铭,廖振鹏,1996;梁建文等,2003;张郁山,2009,2010)和数值法等方面已开展了卓有成效的工作.其中,解析法主要是波函数展开法,在分析波动问题物理本质上具有数值法不可替代的作用;而数值法在计算机仿真技术及数值分析算法日新月异的今天,能够满足各种实际工程中复杂地形的地震动力响应分析,并在定量上给出结果,已成为主流分析方法.在地震学中常用的数值方法主要有有限差分法(Fuyuki, Matsumoto, 1980; Zhang, Chen, 2006)、边界元法(林皋,关飞,1990; Ge, Chen, 2008)、局部离散波数边界积分法(Zhou, Chen, 2006, 2008)等. Fuyuki 和 Matsumoto(1980)利用有限差分法模拟了楔形地形对瑞雷面波的散射;赵成刚等(1991)提出一种复变量半解析试函数,并将其应用于边界元法中,建立一种可对三维波动问题在频域进行分析的半解析边界元法,用以研究凹陷地形对地震动的影响;Zhou 和 Chen (2006, 2008)提出的局部离散波数边界积分法,不仅保留了原 Bouchon-Campillo 离散波数法的计算精度,而且在计算效率上至少提高了一个量级,并得出了地形对面波影响的部分规律.在地震工程中常用的方法主要是有限元法.刘晶波(1996)将有限元法与修正的透射边界相结合,研究了不同入射波传播时局部孤突地形和相邻地形对地面运动的影响;荣棉水和李小军(2007)及荣棉水等(2009)采用有限元-有限差分法结合人工透射边界,研究了斜坡地形对地震动频谱特性的影响,并以位移傅里叶谱比的形式给出了其影响规律;李英民等(2010a, b)采用 ANSYS 有限元软件,针对坡地地形对场地水平和竖向地震动反应谱特性影响规律展开研究.

在已有的大量研究工作中,地形对地震动频谱特性,尤其是反应谱特性的研究一直是一个薄弱环节.局部突出台地是工程中常见的凸起地形,建筑抗震设计规范(中华人民共

和国建设部, 2010)考虑地形的条目就是专门针对该类地形. 研究这类地形对地震动的放大效应, 对于揭示该地形波动效应的物理机制以及更合理确定位于该类地形上工程结构的抗震设防要求具有重要的理论和实际意义. 因此, 本文以局部突出台地为例, 采用 ABAQUS 有限元计算软件结合人工黏弹性边界(郝明辉等, 2011), 在 SV 波入射的假定下, 研究地形对地震动特性(包括反应谱、峰值加速度、峰值速度和峰值位移等)的影响, 并在此基础上研究地形宽度对其放大效应的影响.

1 模型及分析方法

局部突出台地的模型如图 1 所示. 台地地表包括顶部平台、斜坡面和坡底 3 部分, 不同部分的控制空间点如图中所示. 利用人工边界从无限大场地中切取包含局部突出台地在内的有限元计算区域, 计算区域的宽和高取坡高的 10 倍, 足以满足计算精度的要求, 以减小人工边界的影响. 地震动输入为垂直入射的 SV 波(图 1).

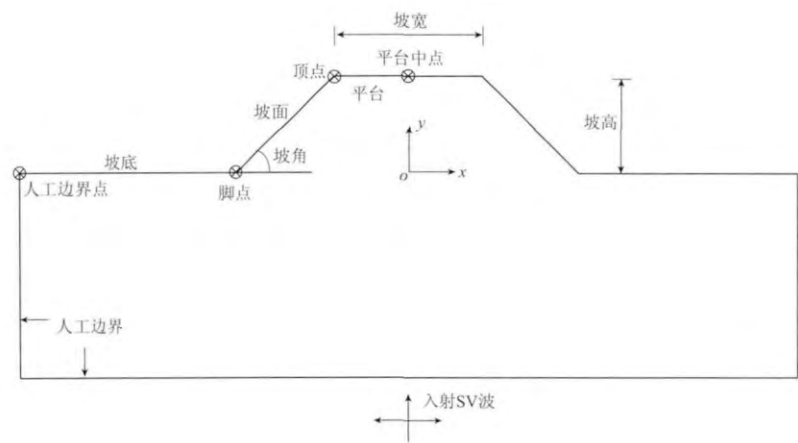


图 1 局部突出台地模型
Fig. 1 A model with local terrain

模型的几何参数: 坡高为 100 m, 坡角为 45°. 为研究凸起地形平台宽度对其放大效应的影响, 凸起台地的宽度分别取 25, 50, 75, 100, 150, 200, 400 m. 采用四边形有限元网格离散, 网格尺寸大小为 2 m×2 m, 以获取对高频成分可靠的数值模拟结果. 模型的材料参数: 弹性模量 $E=2.5\times10^9$ Pa, 泊松比 $\nu=0.25$, 密度 $\rho=2.5\times10^3$ kg/m³.

本文采用 ABAQUS 有限元软件, 并编制了相应的黏弹性人工边界接口子程序, 输入每组地震动样本求解凸起地形的动力反应, 即可得到所有空间点地震反应的时间过程. 将该时间过程的反应谱除以自由场反应谱, 即可得到不同空间点的谱比曲线, 用以描述凸起地形对地震动的放大效应, 即

$$r_i(T, \boldsymbol{x}) = \frac{S_{a,i}(T, \boldsymbol{x})}{S_{a,f}(T, \boldsymbol{x})}. \tag{1}$$

其中, $S_{a,i}(T, \boldsymbol{x})$ 为第 i 个地震动样本引起的空间点 $\boldsymbol{x}=(x, y)$ 处地震动的反应谱, $S_{a,f}(T, \boldsymbol{x})$ 为空间点 \boldsymbol{x} 处自由场地震动(即弹性半空间地震动)的反应谱, $r_i(T, \boldsymbol{x})$ 为相应的谱比. 将所有地震动样本(本文选取 10 组地震动样本)的计算结果进行平均即可得到不同空间点处

的平均谱比

$$r(T, x) = \sum_{i=1}^{10} r_i(T, x). \quad (2)$$

本文所涉及的计算工况较多, 计算工作量较大, 所有数值模拟工作均在北京市计算中心平台上开展.

为了验证本文计算方法的正确性及计算结果的精度, 首先计算了如下规则地形具有解析解的算例.

从二维半无限空间中截取 $6 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 的有限范围, 顶端自由, 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 $\nu = 0.2$, 质量密度 $\rho = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. 在底部垂直向上入射 x 方向单位脉冲剪切位移波和 y 方向的单位脉冲压缩位移波:

$$u(t) = \frac{1}{2} [1 - \cos(2\pi ft)]. \quad (3)$$

式中, $f = 4.0 \text{ Hz}$, $0 \leq t \leq 0.25$, 其波形如图 2 所示. 人工边界地震动输入方法参见郝明辉等(2011).

图 3 给出了黏弹性人工边界计算得到的模型底部、中部、顶部的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, 自由地表处的位移幅值为输入波幅值的两倍. 本文的计算结果与理论解吻合得很好, 证明了本文计算方法的正确性和有效性.

本文所研究的图 1 所示的凸起地形在平面 SV 波入射下动力响应的解析解很难获得. 因此, 为验证其计算方法对凸起地形的计算精度, 本文采用李英民等(2010a)的验证方法. 该方法认为, 当图 1 中坡底段地表点距离凸起地形足够远时, 局部凸起地形产生的散射波

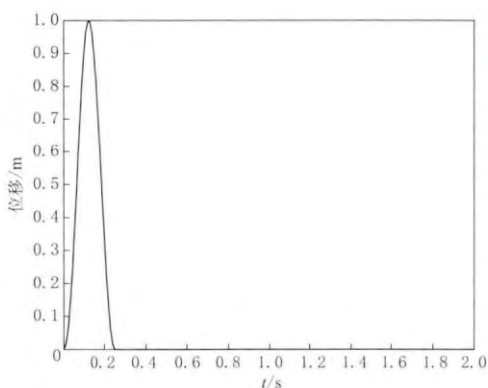


图 2 入射位移波

Fig. 2 Input displacement

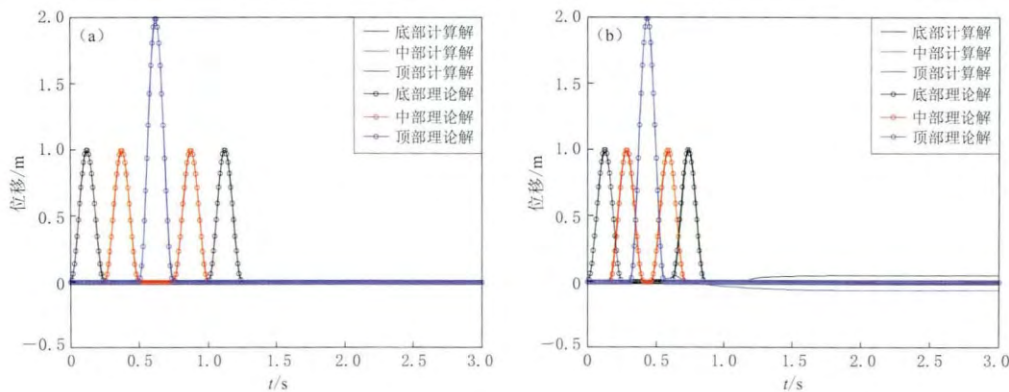


图 3 黏弹性边界计算结果与理论解比较

(a) 水平向; (b) 竖直向

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

(a) Horizontal; (b) Vertical

传播到该点需要一定的时间，散射波与自由场波(包括入射波和反射波)之间存在相位差，因此，该地表点地震反应的最大值应为输入地震动最大值的 2 倍。基于这种认识，本文具体的验证结果如下。

从无限大场地中切取包含凸起台地在内的有限元计算区域，计算区域的宽和高分别取坡高的 10 倍，以满足计算精度的需求。模型的几何参数：坡高为 100 m，坡角为 45°，凸起台地的宽度为 100 m。采用四边形有限元网格离散，网格尺寸为 2 m×2 m。模型的材料参数：弹性模量 $E=2.5\times10^9$ Pa，泊松比 $\nu=0.25$ ，密度 $\rho=2.5\times10^3$ kg/m³。依然采用图 2 所示的脉冲作为输入。图 4 给出了模型底部空间点的入射位移脉冲以及坡底段中点的地表位移反应时程。可以看出，入射波由模型底部到达地表需要 1.0 s(坡底与模型底部的距离为 1000 m，剪切波速为 1 000 m/s)，之后坡底自由面产生反射波，与入射波叠加，导致坡底段中点的地表位移时程曲线在 1.0—1.25 s 内出现幅值为 2.0 的脉冲。在 1.25 s 之后，凸起地形产生的散射波传播至该点，产生了如图 4 所示的位移波形曲线中幅值逐渐减小的波串。因此，本文的计算结果与凸起地形对入射平面 SV 波散射的物理过程是一致的，从而验证了本文数值结果的可靠性。

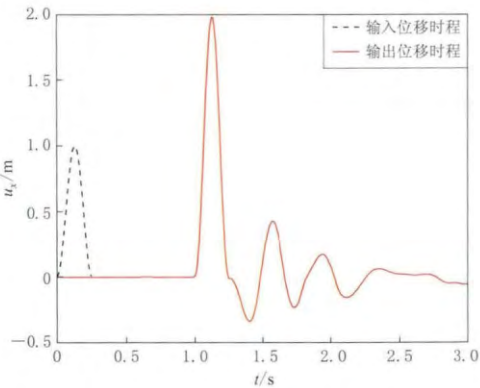


图 4 脉冲输入与输出位移对比图
Fig. 4 Comparison of displacement between input and output for a pulse

2 输入地震动

1) 人工地震动。以下式规定的标准反应谱为目标谱，合成 10 条人工地震动样本，作为图 1 所示模型的输入：

$$S_a(T) = \begin{cases} A_{\max}[1 + 10(\beta_{\max} - 1)T] & T \leq 0.1 \\ A_{\max}\beta_{\max} & 0.1 < T \leq T_g \\ A_{\max}\beta_{\max}(T_g/T)^\gamma & T > T_g \end{cases}, \quad (4)$$

式中， A_{\max} 为地震动峰值加速度，取为 1 m/s²； β_{\max} 为地震动反应谱放大倍数最大值，取为 2.5； T_g 为特征周期，取为 0.3 s； γ 为地震动加速度反应谱曲线下降段衰减系数，取为 0.9。式(4)所示反应谱的形式参照了不同抗震设计规范规定的标准谱形式以及实际工程中场地地震危险性分析工作所确定的场地相关标准谱的常用形式。事实上，由于本文所研究的介质为线弹性介质，最终所得的谱比排除了输入地震动频谱对分析结果的影响，其主要反映的是局部地形自身的动力特性。

利用基于小波函数的反应谱拟合法(张郁山，赵凤新，2014)，合成出 10 条人工地震动时程，时程总离散点数为 4096，离散时间间隔为 0.01 s，目标反应谱控制周期点为 80 个，均匀分布在 0.01—6.0 s 的对数坐标轴上。人工地震动反应谱与目标反应谱的最大相对误差不超过 5%。第一个人工地震动样本的加速度、速度和位移波形曲线如图 5 所示，人工地震动反应谱与目标反应谱的对比如图 6 所示。

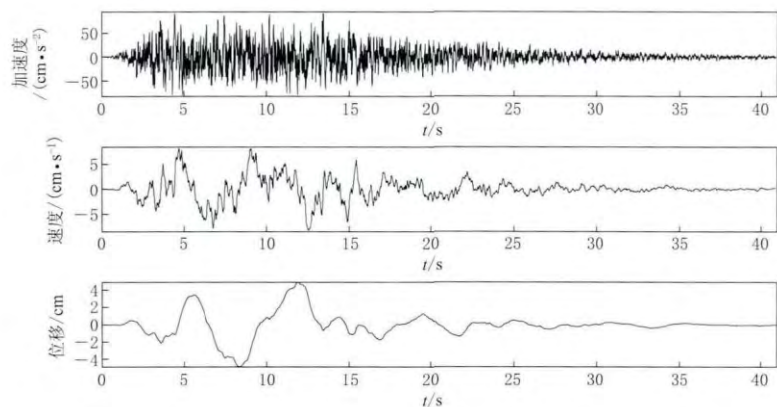


图 5 人工地震动样本的加速度、速度和位移曲线

Fig. 5 Acceleration, velocity and displacement curves of artificial ground motion samples

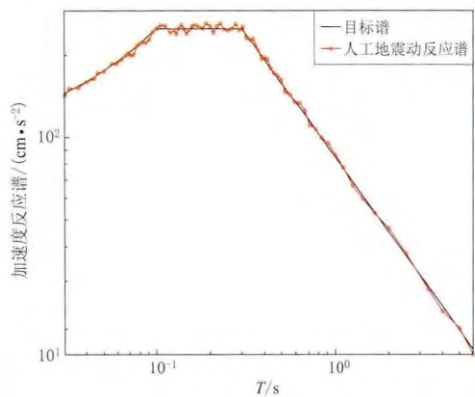


图 6 输入地震动反应谱

Fig. 6 Input ground motion response spectra

应用中实际地震动记录的有限性，本文的研究与分析均采用人工地震动输入。

2) 实际地震动. 以天然地震动为“种子”，利用基于希尔伯特变换的非平稳地震动模拟方法(Zhang *et al*, 2012)，生成 10 条地震动样本，这些地震动样本具有原始天然地震动的非平稳特性. 图 7 为模拟 El-Centro 波生成的 1 个地震动样本.

3) 不同地震动输入对计算结果的影响分析. 以宽度 100 m 的台地为例，分析了不同地震动输入对地震动反应谱特性的影响. 图 8 给出了不同周期点处顶点的谱比曲线. 由该图可知，人工地震动与实际地震动输入对计算结果影响不大. 鉴于工程

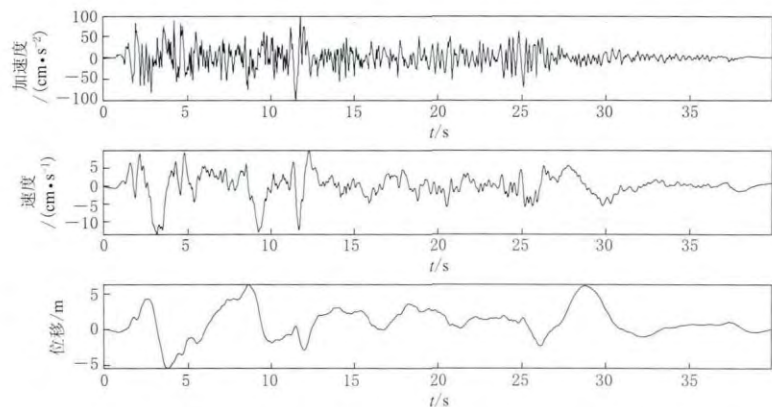


图 7 模拟 El Centro 波所得的地震动样本

Fig. 7 El Centro wave simulated ground motions resulting sample

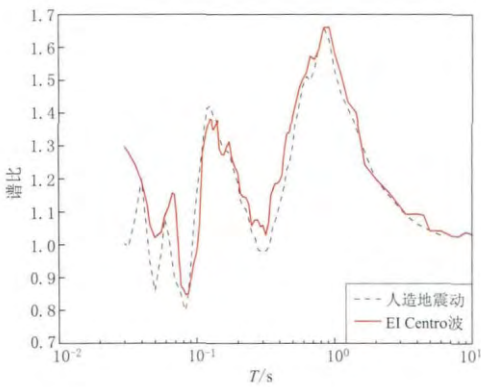


图 8 不同输入下顶点的谱比
Fig. 8 Spectral ratio under different input vertices

3 台地地形对地震动反应谱特性的影响

以宽度 100 m 的台地为例，分析地形效应对地震动反应谱特性的影响效应。由于模型的对称性，仅考虑图 1 所示平台中点左侧地表点的谱比，如图 9 所示。图中给出了不同地表点的谱比曲线(介质的阻尼比取为零)。可以看出，针对该台地，在平台中点(即 $x=0$)，谱比达到一个比较高的水平，在 0.08—0.09 s 的最大谱比值超过了 2.0，在 0.8—0.9 s 的最大谱比值超过了 1.6。随着远离台地中点，谱比值在 1.0 附近波动，而且波动主要集中在周期小于 0.1 s 的高频部分；对于周期大于 1.0 s 的长周期部分，谱比值趋于 1.0。

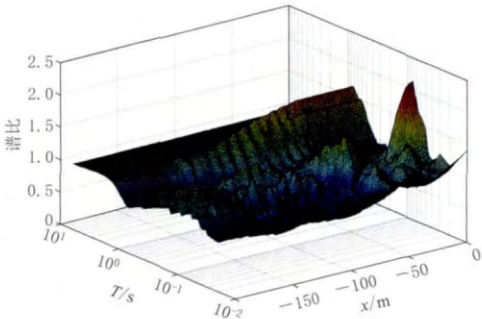


图 9 地表谱比图
Fig. 9 Surface spectral ratio chart

从图 9 中可以提取不同空间点处的谱比曲线。平台段、斜坡段和坡底段不同空间点的谱比曲线如图 10—12 所示。图 10 中，对于平台段的空间点而言，其谱比曲线呈现出明显的双峰特点，除了在 0.8—0.9 s 的中长周期段谱比达到一个较大值外，在 0.08—0.09 s 的高频段谱比值超过了 2.0，而且当周期超过 0.4 s 时，平台段地表点谱比值相差不大。图 11 中，对于斜坡段，在大部分周期点处，顶点的谱比值高于其它斜坡点，而且在周期超过 0.4 s 的频段，斜坡段观测点的谱比值表现出较为明显的规律性：越靠近顶点的观测点，其谱比值越大。图 12 中，坡底段地表不同观测点的谱比基本在脚点和计算边界点(人工边界点)对应的谱比值之间变化，在不同的频段均表现出较为明显的规律性。

不同反应谱控制周期点($T=0.1$ s, $T=1.0$ s)、峰值加速度(PGA)、峰值速度(PGV)和峰值位移(PGD)对应的谱比值在地表的变化如图 13 所示。可以看出，由于峰值位移主要受地震动长周期成分的影响，而长周期地震波波长较长，对尺度相对较小的局部地形不敏感，因此，宽度为 100 m 的凸起地形对峰值位移的放大效应不显著，而且不同地表点峰值位移的放大系数变化不大。如图 13 所示，频率越高(如 $T=0.1$ s 对应的谱比和 PGA 对

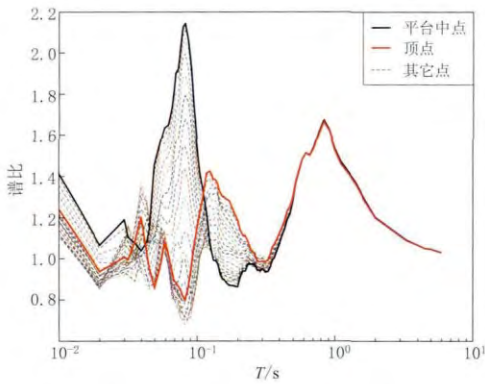


图 10 平台段地表点的谱比曲线图
Fig. 10 Spectral ratio chart of the surface point on the platform

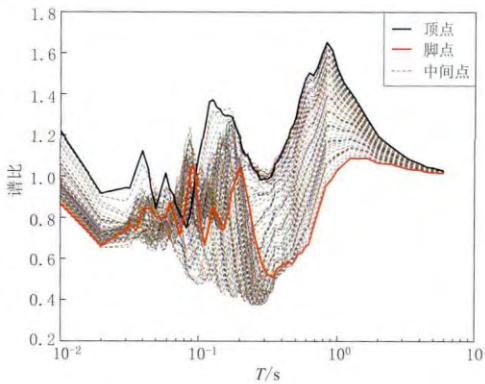


图 11 斜坡段地表点的谱比曲线图
Fig. 11 Spectral ratio chart of surface point on the slope section

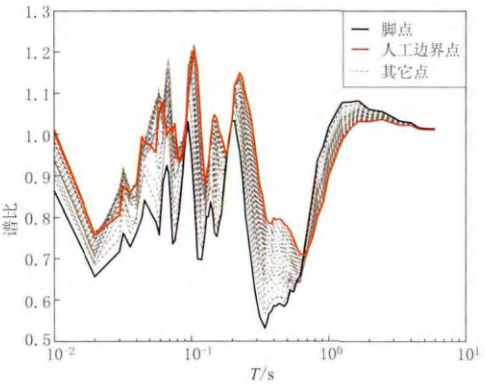


图 12 坡底段地表点的谱比曲线图
Fig. 12 Spectral ratio chart of surface point on bottom

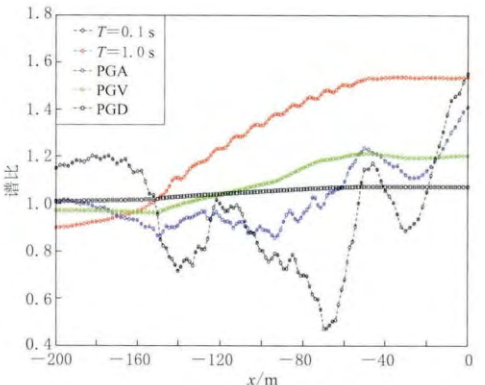


图 13 不同周期点的谱比随距离的变化
Fig. 13 Change of spectral ratio of different cycle points with the distance x

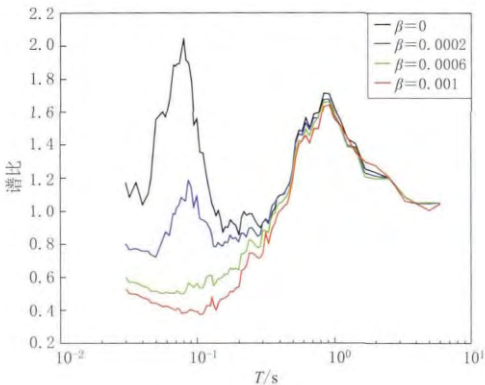


图 14 阻尼系数变化对谱比 β 的影响
Fig. 14 Impact of damping ratio β changes on the spectral ratio

应的放大系数), 不同地表点的放大系数变化越剧烈, 而且对于宽度为 100 m 的凸起地形而言, 其谱比的最大值出现在平台的中点.

以上利用数值方法研究了凸起台地地形对地震动特性的影响, 得出平台段空间点地震动受地形效应影响较大, 其谱比曲线呈现双峰特点. 原则上讲, 数值方法可以处理具有任意复杂边界的几何模型, 解析法用较为规则的几何形状模拟不规则地形得出一般规律, 而解析法在阐释波动问题本质上具有数值法无法替代的优势. 本文上述基于数值法所得出的结论与袁晓铭和廖振鹏(1996)采用解析法研究任意圆弧型凸起地形对平面 SH 波的

散射的结论基本一致。

需要指出的是，上述计算均未考虑阻尼的影响，对于黏弹性场地，介质黏性阻尼的存在使得介质对波动有能耗效应，下面研究阻尼对计算结果的影响。本文考虑介质的阻尼效应时采用瑞雷阻尼形式($\alpha=0, \beta \neq 0$)。图 14 给出了台地宽度为 100 m 的情况下，瑞雷阻尼系数变化时平台中点的谱比曲线。从该图中可以看出，阻尼系数 β 从 0 变化到 0.001 时，谱比值约在 0.2 s 之后基本不受阻尼系数变化的影响。在 0—0.2 s 之间，随着阻尼系数的增大，谱比值逐渐减小，而谱比曲线的形状比较相似。上述反应谱谱比的研究结果与荣棉水和李小军(2007)采用傅里叶谱比研究地形对地震动影响中的结论基本一致。

4 地形宽度对计算结果的影响

为了研究地形宽度对计算结果的影响，将台地的宽度分别取为 25, 50, 75, 100, 150, 200, 400 m，计算结果取 10 组人工地震动样本计算结果的平均值。图 15—19 给出了不同控制周期点($T=0.1$ s, $T=1.0$ s, PGA, PGV 和 PGD)的放大倍数与台地宽度的关系，并

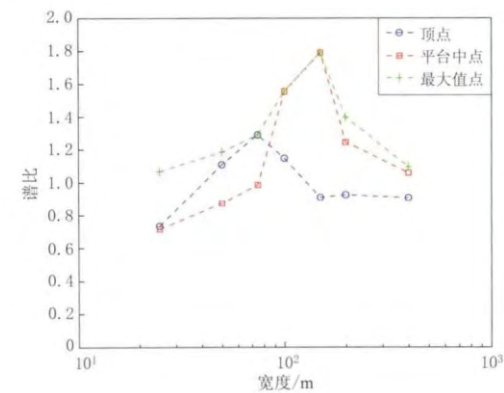


图 15 周期 0.1 s 处谱比随宽度的变化

Fig. 15 Changes of spectral ratio of 0.1 s cycle point with the width

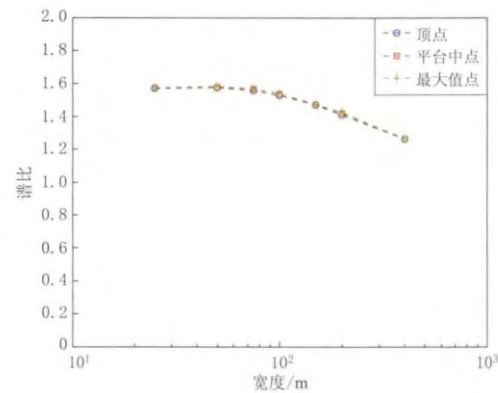


图 16 周期 1.0 s 处谱比随宽度的变化

Fig. 16 Change of spectral ratio of 1.0 s cycle point with the width

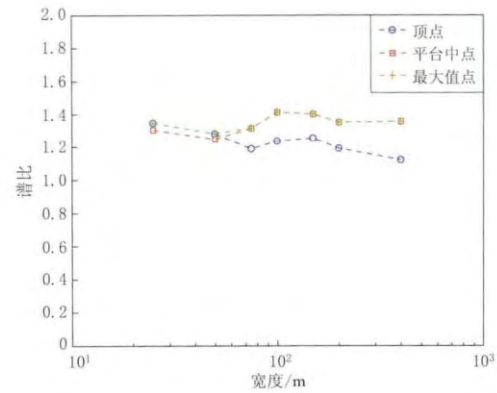


图 17 峰值加速度放大倍数随宽度的变化图

Fig. 17 Change of peak ground acceleration magnification with the width

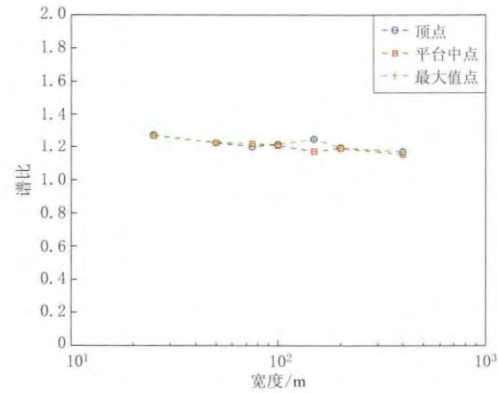


图 18 峰值速度放大倍数随宽度的变化

Fig. 18 Change of peak ground velocity magnification with the width

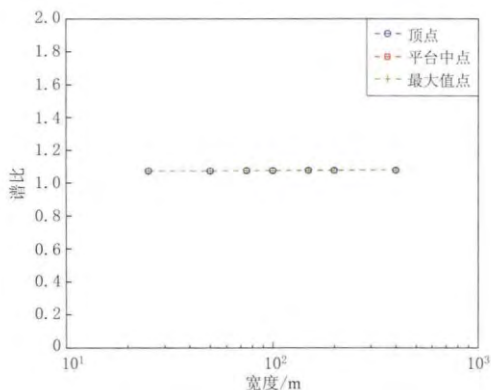


图 19 峰值位移放大倍数随宽度的变化

Fig. 19 Change of peak ground displacement magnification with the width

线。由该图可以看出,顶点和平台段中点随宽度变化趋势基本一致。随着宽度的增大,低频波的反应谱谱比值呈现减小的趋势,但当宽度增加到 400 m 时,反应谱谱比值仍大于 1.2,明显高于图 15 给出的相同宽度下的谱比值,说明随着宽度的增大,地形对低频地震动的放大效应显著高于对高频地震动的放大效应。

从图 17—19 中可以看出,随着宽度的增加,峰值加速度对应的放大倍数最大值基本上落在平台段中点,且平台段中点的峰值加速度对应的放大倍数大致在宽度增加到一定数值后保持在 1.35 左右,而顶点的峰值加速度对应的放大倍数随宽度变化也有一定的波动,说明宽度变化对峰值加速度的放大效应具有一定的影响,但该影响远低于图 15 所示的对 0.1 s 处谱比的影响。不同宽度下,峰值速度放大倍数最大值基本保持在 1.20 左右,峰值位移放大倍数最大值基本保持在 1.05 左右,说明台地宽度变化对峰值速度、峰值位移的放大效应影响不明显。

5 讨论与结论

本文采用基于 ABAQUS 平台的显式有限元动力学分析方法,结合人工黏弹性边界理论研究了台地地形对地震动反应谱特性的影响。首先分析了不同地震动输入及阻尼参数对计算结果的影响,其结果表明,人工地震动与实际地震动输入对台地顶点反应谱谱比影响不大,鉴于工程应用中实际地震动记录的有限性,可采用人工地震动输入研究凸起地形对地震动的放大效应。对于黏弹性场地,阻尼系数的变化对反应谱谱比有一定的影响,阻尼系数 β 从 0 变化到 0.001 时,在 0—0.2 s 之间,随着阻尼系数的增大,平台中点的谱比值逐渐减小,而谱比曲线的形状则比较相似;在 0.2 s 之后反应谱谱比基本不受阻尼系数变化的影响。

基于上述结果,本文采用人工地震动输入,在零阻尼条件下研究了 SV 波入射下台地宽度变化对地形放大效应的影响。结果表明:平台段空间点地震动受地形效应的影响较大,谱比曲线呈现双峰特点,在 0.8—0.9 s 的中长周期段谱比达到一个较大值 1.6,在 0.08—0.09 s 的高频段谱比值超过 2.0,且最大值出现在平台段中点;对于斜坡段,在大部分周期点处,顶点的谱比值高于其它斜坡点,而且在周期超过 0.4 s 的频段,斜坡段观测点

分别给出了图 1 所示平台中点、顶点对应的谱比以及不同地形对应的所有地表点谱比的最大值。

由图 15 周期 0.1 s 处谱比随宽度的变化曲线可以看出,反应谱谱比最大值出现在台地宽度为 150 m 的平台段中点处,最大值为 1.8;顶点和平台段中点的反应谱谱比值均呈现先增大后减小的趋势,顶点的谱比值在宽度增加到 75 m 后逐渐减小,平台段中点的谱比值在宽度增加到 150 m 后逐渐减小,这说明宽度对高频波的影响仅在一定宽度范围内较为显著。图 16 给出了周期 1 s 处反应谱谱比随宽度的变化曲线。

的谱比表现出较为明显的规律性, 即越靠近顶点的观测点, 其谱比值越大; 坡底段地表不同观测点的谱比值基本在脚点与计算边界点(人工边界点)对应的谱比值之间变化, 在不同的频段均表现出较为明显的规律性。此外, 宽度对高频波的影响只在一定的范围内比较显著, 随着宽度的增大, 其影响逐渐由高频波向低频波移动, 而且台地宽度变化对地震动峰值加速度的放大效应有一定的影响, 而对峰值速度和峰值位移的放大效应的影响则不明显。

参 考 文 献

- 郝明辉, 张艳红, 陈厚群. 2011. 基于 ABAQUS 的黏弹性人工边界在重力坝分析中的应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 10(2): 120–126.
- Hao M H, Zhang Y H, Chen H Q. 2011. Application of viscous-spring artificial boundary in dynamic response analysis of gravity dam with ABAQUS[J]. *Journal of China Institute Water Resource and Hydropower Research*, 10(2): 120–126 (in Chinese).
- 李英民, 王丽萍, 赵耀. 2010a. 岩质坡地建筑设计水平地震动放大系数的确定[J]. 地震工程与工程振动, 30(4): 11–17.
- Li Y M, Wang L P, Zhao Y. 2010a. Amplification factors of design horizontal ground motions for structures on rock slopes[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 30(4): 11–17 (in Chinese).
- 李英民, 王丽萍, 赵耀. 2010b. 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, 30(5): 156–161.
- Li Y M, Wang L P, Zhao Y. 2010b. Influence of slope terrain on characteristics of vertical ground motion response spectra[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 30(5): 156–161 (in Chinese).
- 梁建文, 张郁山, 顾晓鲁, Lee V W. 2003. 圆弧形层状凹陷地形对平面 SH 波的散射[J]. 振动工程学报, 16(2): 158–165.
- Liang J W, Zhang Y S, Gu X L, Lee V W. 2003. Scattering of plane SH waves by a circular-arc layered canyon[J]. *Journal of Engineering Vibration*, 16(2): 158–165 (in Chinese).
- 林皋, 关飞. 1990. 用边界元法研究地震波在不规则地形处的散射问题[J]. 大连理工大学学报, 30(2): 145–152.
- Lin G, Guan F. 1990. Scattering of seismic waves at irregular topographies by boundary element method[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 30(2): 145–152 (in Chinese).
- 刘晶波. 1996. 局部不规则地形对地震地面运动的影响[J]. 地震学报, 18(2): 239–245.
- Liu J B. 1996. Impact on earthquake ground motion by local irregular terrain[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 18(2): 239–245 (in Chinese).
- 荣棉水, 李小军. 2007. 局部地形对入射 P 波谱特性的影响分析[J]. 西北地震学报, 29(4): 297–302.
- Rong M S, Li X J. 2007. Effect analysis of topography on the spectrum property of incident P waves[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 29(4): 297–302 (in Chinese).
- 荣棉水, 李小军, 吕悦军, 尤红兵. 2009. 平台地形对地震地面运动特征周期值的影响[J]. 中国地震, 25(2): 178–182.
- Rong M S, Li X J, Lü Y J, You H B. 2009. Effect of protruding topography on characteristic period of ground motion [J]. *Earthquake Research in China*, 25(2): 178–182 (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[J]. 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[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 16(2): 1–13 (in Chinese).
- 赵成刚, 王前信, 董刚. 1991. 三维半解析边界元法及其在地震波动问题中的应用[J]. 地震工程与工程振动, 11(2): 53–61.
- Zhao C G, Wang Q X, Dong G. 1991. Three dimensional semi-analytical boundary element method and its application to seismic wave problems[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 11(2): 53–61 (in Chinese).

- 张郁山. 2009. 圆弧状多层沉积谷地在平面 SV 波入射下的动力响应[J]. 地球物理学报, **52**(6): 1547–1555.
- Zhang Y S. 2009. Dynamic response of alluvial valley containing multiple circular-arc layers incident by plane SV waves [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(6): 1547–1555 (in Chinese).
- 张郁山. 2010. 圆弧状多层沉积谷地在 Rayleigh 波入射下动力响应的解析解[J]. 地球物理学报, **53**(9): 2129–2143.
- Zhang Y S. 2010. Analytical solution to dynamic response of circular-arc-shaped multi-layered valley due to incidence of Rayleigh wave[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **53**(9): 2129–2143 (in Chinese).
- 张郁山, 赵凤新. 2014. 基于小波函数的地震动反应谱拟合方法[J]. 土木工程学报, **42**(1): 70–81.
- Zhang Y S, Zhao F X. 2014. Matching method of ground-motion response spectrum based on the wavelet function[J]. *China Civil Engineering Journal*, **42**(1): 70–81 (in Chinese).
- 中华人民共和国建设部. 2010. GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 21.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. 2010. *GB50011-2010 Code for Seismic Design of Buildings* [S]. Beijing: China Building Industry Press, 21 (in Chinese).
- Fuyuki M, Matsumoto Y. 1980. Finite difference analysis of Rayleigh wave scattering at a trench[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **70**(6): 2051–2069.
- Ge Z X, Chen X F. 2008. An efficient approach for simulating wave propagation with the boundary element method in multilayered media with irregular interfaces[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **98**(6): 3007–3016.
- Zhang W, Chen X F. 2006. Traction image method for irregular free surface boundaries in finite difference seismic wave simulation[J]. *Geophys J Int*, **167**(1): 337–353.
- Zhang Y S, Zhao F X, Yang C H. 2012. Generation of non stationary artificial ground motion based on the Hilbert transform[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **102**(6): 2405–2419.
- Zhou H, Chen X F. 2006. A new approach to simulate scattering of SH waves by an irregular topography[J]. *Geophys J Int*, **164**(2): 449–459.
- Zhou H, Chen X F. 2008. The localized boundary integral equation-discrete wave number method for simulating P-SV wave scattering by an irregular topography[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **98**(1): 265–279.

作者简介



研究地下结构等方面的研究。

武 岩 中国地震局地球物理研究所助理研究员。2006 年南京大学地质专业毕业，获学士学位；2011 年中国地震局地球物理研究所固体地球物理专业毕业，获博士学位。主要从事

层析成像和利用接收函数



博士學位。現從事高拱壩抗震分析及地震動輸入等相關方面的研究工作。

郝明輝 中国地震灾害防御中心助理研究员。2006 年山东大学工程力学专业毕业，获学士学位；2009 年山东大学固体力学专业毕业，获硕士学位；2012 年中国水利水电研究院水工结构工程专业毕业，获

博士学位。现从事高拱坝抗震分析及地震动输入



张 攀 武汉大学测绘学院固体地球物理专业在读硕士研究生。2008 年武汉大学地球物理专业毕业，获学士学位。主要从事接收函数方面的研究。



李兴旺 长安大学固体地球物理专业在读硕士研究生。2012 年长安大学地球物理专业毕业，获理学学士学位。目前主要从事有限频射线层析成像的理论及方法研究。



主要从事与地球动力学相关的数值模拟研究。

张 晨 武汉大学测绘学院在读博士研究生。2008 年武汉大学测绘学院大地测量学与测量工程专业毕业，获工学学士学位；2010 年武汉大学中国边界与海洋研究院国际法学专业毕业，获法学硕士学位。现主



刘 芳 内蒙古自治区地震局测震台网中心高级工程师。1990 年中国科学技术大学应用化学专业毕业。长期从事大震速报、地震编目、数字地震及地震预测预报等方面的工作。内蒙古自治区地震学会会员。