

局部地形对入射 P 波谱特性的影响分析

荣棉水¹, 李小军^{1,2}, 卢滔¹

(1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;

2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:利用显式有限元有限差分方法研究了局部突出平台状粘弹性场地的地形影响, 比较了高宽比不同、体波入射角度不同时谱特性的差异, 分析了相邻地形的存在对地面运动谱特性的影响。研究表明, 对于局部突出地形, 高宽比和体波入射角度对地震动的谱特性有较大影响, 入射角度的影响更为显著; 相邻地形的存在使地面运动进一步放大。

关键词: 显式有限元有限差分方法; 粘弹性场地; 地形影响; 谱特性

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2007)04-0297-06

Effect Analysis of Topography on the Spectrum Property of Incident P Waves

RONG Mian-shui¹, LI Xiao-jun^{1,2}, LU Tao¹

(1. Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China; 2. Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, China)

Abstract: An explicit finite element-finite difference method is performed to evaluate the part-projecting topography effects on the seismic response of visco-elastic sites. The different spectrum properties under the conditions of different high-width ratios (H/L value) and different angles of incidence are compared, the effect of multi-mesa is analysed also. The results show that for presence of part-projecting topography, the H/L value and the direction of incident waves significantly affect the spectrum property, the effect of the direction of the incident wave is especially remarkable, the presence of multi-mesa also increases the amplification effect of sites.

Key words: Explicit finite element-finite difference method; Visco-elastic site; Topography effect; Spectrum property

0 引言

工程上十分关注地形对地震动的影响, 研究方法大体上分为解析方法和数值方法两种。解析方法对问题的提法要求较高, 解决的问题较数值法更抽象。从目前发表的论文来看, 主要集中于解决场地边界条件比较规则, 介质性质和分布比较均匀, 线弹性介质的情况。对于非均匀, 非弹性和边界条件较复杂的情况, 由于地震波的散射折射和波形转换的影响, 问题变得非常复杂, 因而应用受到极大的限制。对于局部介质非均匀非线性影响问题, 切实可行的方法应该还是数值分析方法^[1]。

刘晶波研究了局部孤突地形和三个山梁组成的

相邻地形这两种二维不规则地形在 P 波, SV 波垂直入射和瑞利波传播时地面运动的数值解^[2-4], 给出了若干有价值的定性和定量的结果。但这些结果是在完全弹性均匀介质计算模型下获得的, 对于粘弹性介质下这些结论会是如何值得探讨。杨柏坡等研究了山体对地震地面运动的放大作用, 估算了盆地内软土表面地震动分布特点, 并研究了山体运动对附近土层地震反应的影响, 采用的计算模型为二维粘弹性模型, 但是给出的结论均为定性结果, 没有对计算模型的地表反应作定量的统计。此外还有若干问题: 如高宽比不同、体波入射角度不同、相邻地形

收稿日期: 2007-03-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50439030); 国家科技支撑计划课题(2006BAC13B01)

作者简介: 荣棉水(1982-), 男(汉族), 湖南岳阳人, 硕士, 主要从事地震工程研究工作。

个数不同时数值解差异多大,也值得研究。李小军等提出了一种时域高精度的显式有限元有限差分方法^[1,5],本文利用这一方法研究粘弹性均匀介质的局部突出平台在不同高宽比、不同的体波入射角度及相邻地形对入射体波谱特性的影响。

1 局部平台状突出地形对地面运动的影响

1.1 计算模型及输入脉冲的确定

为便于讨论更为复杂的地形,首先分析均匀粘弹性半空间上简单突出平台地形的影响。地形模型

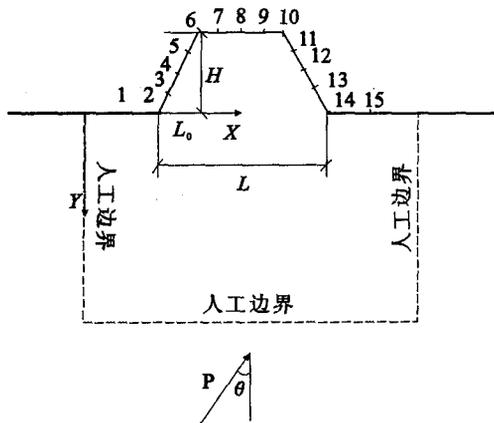


图1 局部孤突地形计算模型

Fig.1 Computing model for port-projecting topography.

如图1所示,为一个单一的突出平台,模型的物理参数取P波波速为2000 m/s,平台宽度 $L=400$ m,高度 $H=200$ m, $L_0=100$ m。采用透射人工边界从无限介质中切取包括平台在内的有限计算区,用有限元离散化,规则区中正方形有限单元的边长为10 m,计算时间步长取0.001 s。

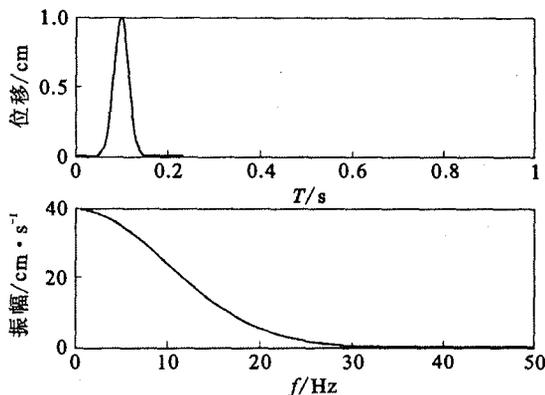
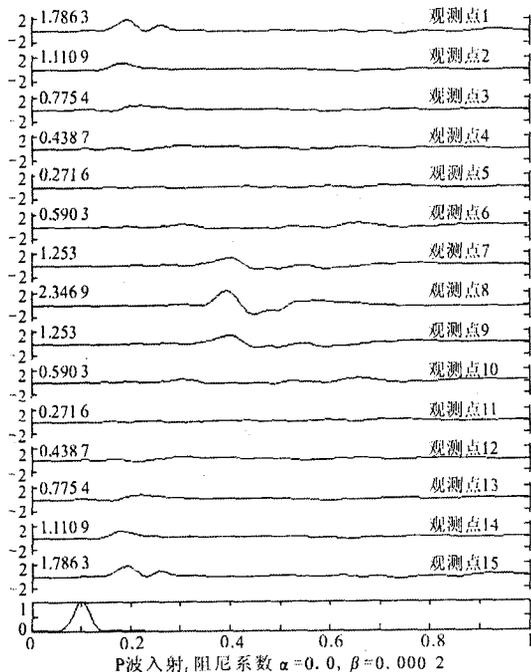


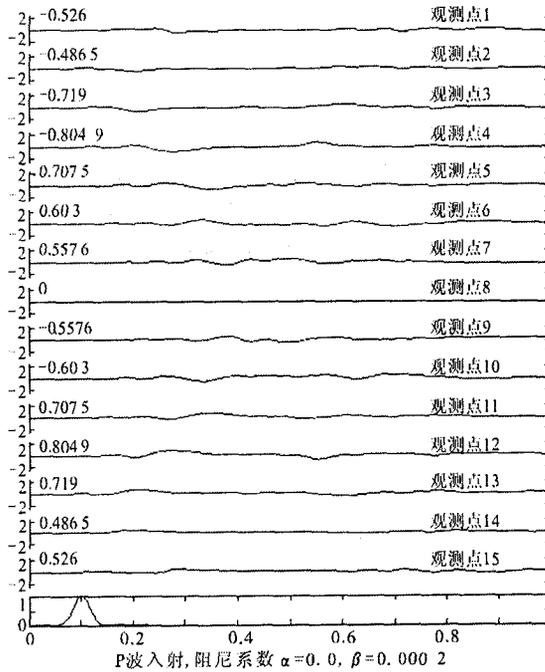
图2 位移脉冲及其傅氏谱

Fig.2 Displacement impulse wavelet and its Fourier spectra.

由于实际地震动往往包含的频段较宽,为了此后研究频域内各不同观测点地面运动谱比的差异,本文采用钟形脉冲作为输入的P波。图2示出了钟形脉冲时程 $a(t)$ 及其傅立叶谱 $A(\omega)$ 。将此钟形脉



(a) 竖直位移时程



(b) 水平位移时程

图3 P波垂直入射时各观测点的位移时程

Fig.3 Displacement time histories of different observation points with vertical incident P wave.

冲做为 P 波从模型底部输入即可计算得到不同情况下观测点的位移时程(图 3)。

钟形脉冲时程的数学表达式如下:

$$\begin{aligned}
 a(t) &= a_0 e^{-\gamma(t-t_0)^2} \\
 A(\omega) &= \sqrt{\frac{\pi}{\gamma}} a_0 e^{-\frac{\omega^2}{4\gamma} + i\omega t_0} \\
 a_0 &= 1 \text{ cm} \\
 \gamma &= 2000 \\
 t_0 &= 0.1 \text{ s}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

从图 3 可以发现:(1)由于计算模型是以测点 8 为中心的轴对称模型,而且输入波垂直入射,所以计算得到的各观测点位移时程也具有对称性;(2)平台

顶部的几个观测点(点 7、8、9)跟平台脚下附近的观测点(点 1、15)的最大位移均大于输入脉冲波的最大位移,其中平台顶部正中央的观测点(点 8)的位移幅值最大;(3)平台两侧坡形中央及其附近的观测点(点 3、4、5、11、12、13)位移时程曲线比较平缓,最大位移值均小于入射波最大位移;(4)平台脚点(点 2、14)最大位移略大于入射波的最大位移。从观测点位移时程的波形及幅值这些明显的结果可以初步判断:局部突出平台地形的存在使得不同的观测点对入射体波产生了不同的影响;这种影响使得山顶地面运动放大,山腰处地面运动变小;地形对不同类型

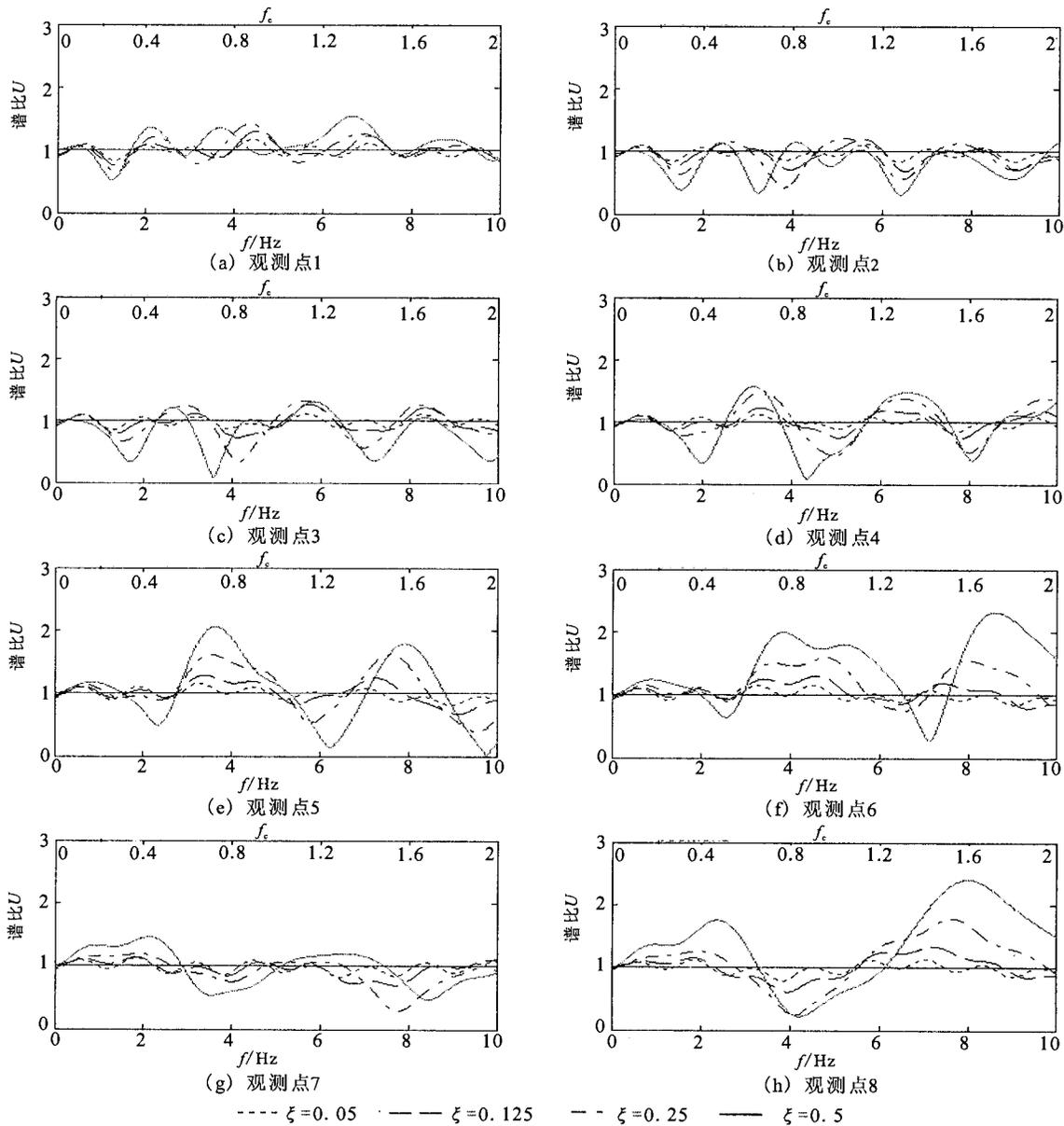


图 4 高宽比变化时不同观测点的谱比

Fig. 4 The effect of $\xi(H/L)$ on spectrum ratio at different observation points.

型的入射体波影响程度各不相同。为了进一步研究各种类型体波入射下地形对各观测点的影响,沿用谱比方法在频域内观测地形对入射波各频段的影响程度。谱比定义为参数 U , $U = |G(\omega, x)/G_0(\omega)|$, $G(\omega, x)$ 为地形场地下观测点的地震动位移傅氏谱, $G_0(\omega)$ 为相同地震动输入下半空间自由地表的震动位移傅氏谱。

1.2 高宽比对局部突出平台状地形地面运动的影响

定义 $\xi = \frac{H}{L}$ 为高宽比。考虑到计算结果的普适性,有必要将输入的脉冲时程无量纲化。引入无量纲频率 f 。以反映局部地形特征尺寸与入射波波长之间的关系, $f_c = (L/2\pi c_p)\omega = L/\lambda_p$ 。计算得到若干具有代表性的观测点的谱比如图4。由于垂直入射时计算模型的对称性,仅给出观测点1~8的结果。

分析这种简单地形下不同观测点在不同高宽比地形下的响应曲线,可发现一些现象:(1)如果把谱

比值1作为一条区分地形影响放大缩小效应的分界轴的话,高宽比越大,即地形坡度越大,谱比曲线波动的幅度越大。(2)高宽比越大产生放大的频段范围增大;(3)坡形下部的点(点2、3)在计算频段内分频段缩小的趋势占主导地位,坡形上部的点及平台顶部的观测点(点5、6、7、8)分频段放大的趋势占主导地位,坡形的中点(点4)似乎处于过渡状态;(4)平台顶部中点宽频带放大效应最显著,在 ξ 为0.5时,最大谱比达到了2.5。

1.3 入射角度的变化对局部突出平台状地形地面运动的影响

入射角度 θ 如图1所示, θ 取不同值时不同观测点的谱比见图5($\xi=0.25$)。计算结果表明:入射角度的增大使各观测点谱比减小,大于 30° 的入射就使得平台顶部几乎完全丧失了放大效应,这说明体波

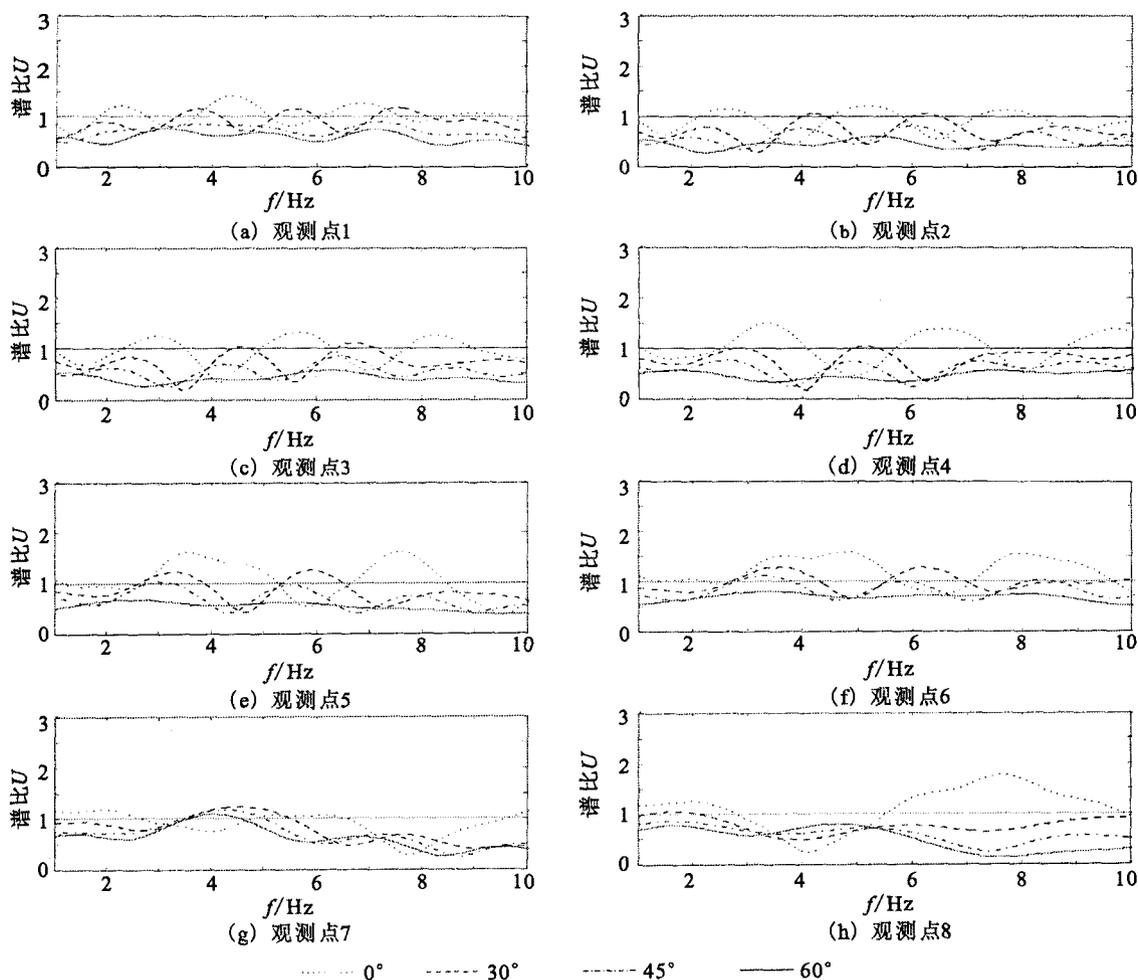


图5 入射角度变化时不同观测点的谱比($\xi=0.25$)

Fig.5 The effect of angle of incidence (θ) on spectrum ratio($\xi=0.25$).

入射角度对地形影响非常显著。体波入射角度不但影响各观测点谱比的幅值,也影响着各观测点谱比曲线的形状,即影响产生放大或缩小的频段范围。各观测点的最大谱比出现在体波垂直入射的情形,最大谱比不会超过 2。

对于粘弹性场地,介质粘性阻尼的存在使得介质对波动有能耗效应。由于考虑介质的阻尼效应时采用的 Rayleigh 阻尼形式($\alpha=0, \beta \neq 0$),介质的能耗程度随介质中传播波的频率的增大而增加,介质对高频波有较大的滤波效应。图 6 给出了高宽比为 0.25 的情况下, Rayleigh 阻尼系数 β 变化时观测点 8 的传递函数,可见阻尼系数的变化对谱比也有明显的影响。阻尼系数 β 从 0 变化到 0.000 6 时,谱比约在 5 Hz 以内基本不受阻尼系数 β 变化的影响,说明在 0~5 Hz 的低频段内谱比方法基本上可以准确地反映纯地形的影响。在 5~10 Hz 的频率范围内 β 增大,放大频段内谱比的峰值减小,谱比曲线的形状比较相似,这说明用谱比来研究地形对地震动谱特性的影响能比较准确地给出地形特征尺寸的变化对地震动谱特性的影响趋势。

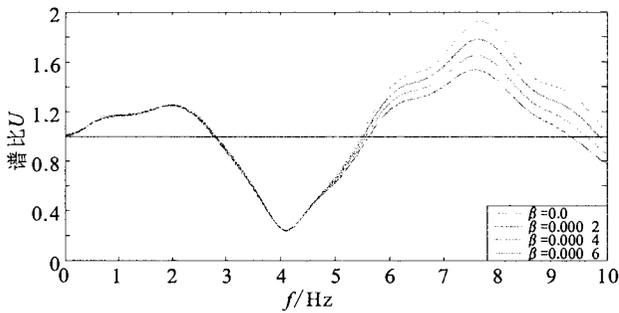


图 6 阻尼系数(β)的变化对谱比的影响($\xi=0.25$)

Fig. 6 The effect of the damping coefficient (β) on spectrum ratio($\xi=0.25$).

2 局部平台状突出相邻地形对地面运动的影响

2.1 计算模型的确定

在工程中经常遇到局部的相邻突出地形,研究此类地形对地面运动的影响对实际工程有较强的借鉴意义。计算模型如图 7 所示。计算输入体波脉冲仍采用上面单个地形的形式。

计算程序控制点及图示观测点坐标见表 1。

2.2 P 波入射下相邻地形对地面运动的影响

图 8 是 P 波垂直入射下有无相邻地形的观测点谱比的比较结果示意图,由于局部相邻地形的存在,

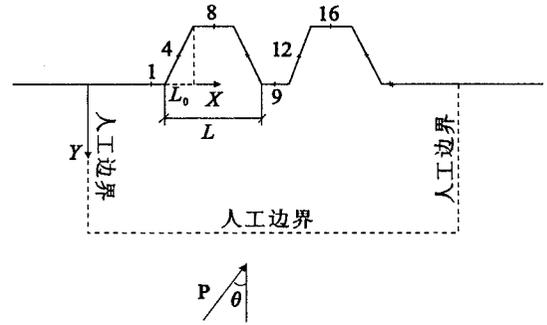


图 7 相邻地形计算模型

Fig. 7 Computing model for multi-mesa topography.

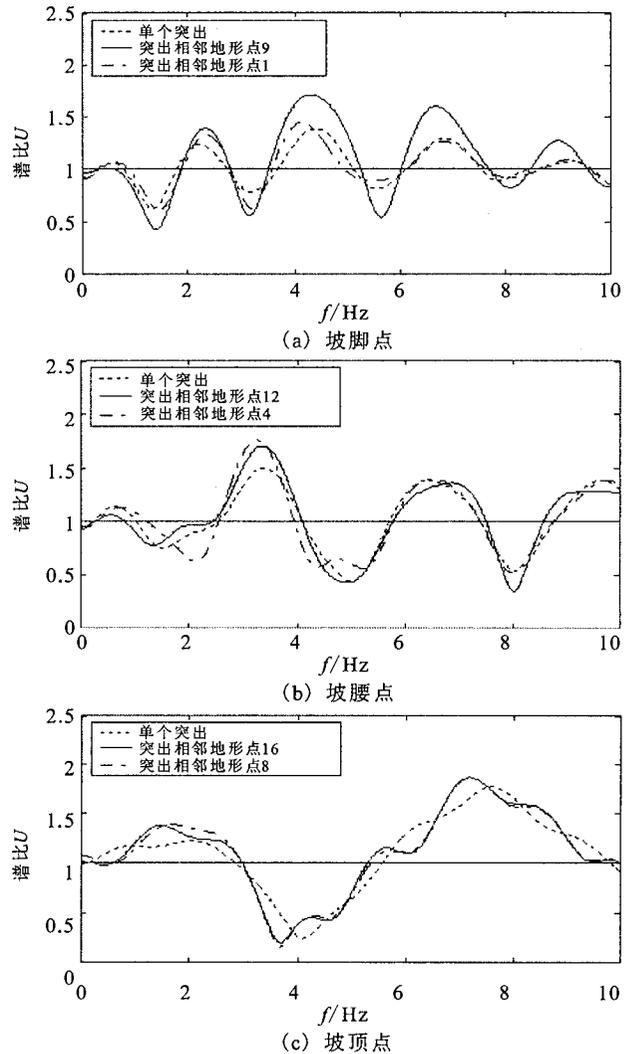


图 8 P 波垂直入射下有无相邻地形的谱比比较

Fig. 8 Comparison of spectrum ratio of observation points under different conditions(single-mesa and multi-mesa).

局部平台附近的观测点谱比幅值明显增大,但产生放大的各频段范围几乎没有变化,而对山腰及山顶的观测点而言,相邻地形也影响了观测点的谱比,使得谱比略有增大,但对放大频段的影响甚微。SV

波输入下也能得到类似的结果。因此,总的来说无论入射的是何种类型的体波,相邻地形的存在一般对观测点谱比的幅值产生影响,而且影响程度的大

小与观测点在局部不规则地形中所处的位置有关,而对观测点谱比形状,或者说对谱比分频段的放大缩小规律影响甚微。

表 1

控制点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
坐标 x/m	450	500	520	550	580	600	650	700	950	1000	1020	1050	1080	1110	1150	1200
坐标 y/m	0	0	-20	-50	-80	-100	-100	-100	0	0	-20	-50	-80	-100	-100	-100

3 结语

本文研究了局部突出的平台地形及平台相邻地形对输入地震动谱特性的影响,有如下结论:

(1) 对于局部突出地形而言,高宽比越大,谱比曲线在谱比为1的轴附近波动的幅度越大;高宽比越大,整个谱形有一种类似于朝低频平移的效应。

(2) 入射角度的增大使平台顶部宽频放大的趋势减小,基本上是角度越大,宽频放大效应越小;最大谱比出现在垂直入射的情况下,最大谱比不超过2。

(3) 由于相邻突出地形的存在,山顶地面运动增大更明显,山顶观测点的谱比进一步增大。

[参考文献]

- [1] 李小军,廖振鹏,关慧敏.粘弹性场地地形对地震动影响分析的显式有限元有限差分方法[J].地震学报.1995,17(3):362-369.
- [2] 廖振鹏,刘晶波.离散网格中的弹性波动(1)[J].地震工程与工程振动.1986,6(2):1-16.
- [3] 刘晶波,廖振鹏.离散网格中的弹性波动(2)[J].地震工程与工程振动.1989,9(2):1-11.
- [4] 刘晶波,廖振鹏.离散网格中的弹性波动(3)[J].地震工程与工程振动.1990,10(2):1-10.
- [5] 李小军.非线性场地地震反应分析方法的研究[D].国家地震局工程力学研究所博士学位论文.1993.
- [6] 陈丙午.不规则地形对地震动及震害的影响[J].地震工程与工程振动.1982,2(1):12-20.
- [7] D Assimaki, G Gazetas. Soil and topographic amplification on canyon banks and the 1999 Athens Earthquake[J]. JEE., 2004, 8(1):1-43.
- [8] D M Boore. The Effect of Simple Topography on Seismic Waves; Implicate on for the Acceleration Recorded at Pacoima Dam. San Fernando Valley California[J]. BSSA., 1973, 63(5):1603-1609.
- [9] Lee V W. A note on scattering of elastic plane waves by a hemispherical canyon[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1982, 1(3):122-129.
- [10] Liu D K, Han F. Scattering of plane SH-wave by a cylindrical canyon of arbitrary shape in anisotropic media[J]. ACTA Mechanica Sinica, 1990, 6(3):256-266.
- [11] Louis Geli, Pierre-Yves Bard, Beatrice Jullien. The effect of topography on earthquake ground motion: A Review and New Results[J]. BSSA., 1988, 78(1):42-63.
- [12] Sanchez-Sesma F. Elementary solutions for the response of a wedge-shaped medium to incident SH and SV waves[J]. BSSA., 1990, 80:737-742.
- [13] Trifunac M D. Surface motion of a semi-cylindrical valley for incident plane SH waves[J]. BSSA., 1971, 61:1755-1770.
- [14] Wong H L, Trifunac M D. Surface motion of a semi-elliptical alluvial valley for incident plane SH waves[J]. BSSA., 1974, 64:1389-1408.