

# 粘弹性浅圆弧形山谷地形对地震动谱特性的影响<sup>\*</sup>

荣棉水<sup>1</sup>, 李小军<sup>2</sup>, 吕悦军<sup>1</sup>, 尤红兵<sup>3</sup>

(1. 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085 2. 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080  
3. 中国地震局震害防御中心, 北京 100036)

摘要: 基于凹陷地形对 SV 波的散射进行了分析, 通过与解析解的对比, 对所采用的数值算法进行了检验, 然后利用钟形脉冲作为 SH 波输入, 获得了浅圆山谷地形的地表响应, 进而获得了不同观测点对自由场地点的谱比, 并利用谱比研究了浅圆弧形山谷地形特征尺寸(深宽比)、波的入射角度以及介质阻尼效应等几个因素对地震动特性的影响。结果显示, 浅圆弧形山谷地形的特征尺寸和地震波入射角度对地震动谱特性影响较大, 影响程度与入射地震波频率有关。其中, 入射角度的影响更显著。

关键词: 显式有限元有限差分方法; 粘弹性场地; 浅圆弧形山谷; 地形影响

中图分类号: P315.9 文献标志码: A 文章编号: 1000-0666(2009)01-0040-06

## 0 引言

山谷、河谷等局部凹陷地形是工程上常见的地形(梁建文等, 2003), 我国西南部地区地形条件复杂, 许多桥梁都须跨越山谷, 设计建造时必须考虑地形因素。针对浅圆山谷地形地震效应的研究很多, 根据方法的不同, 大体上可将其分为解析方法和数值方法两种。对边界条件比较规则、介质性质和分布比较均匀、介质为线弹性的情况, 解析方法具有较大优势。而对于非均匀、介质为非弹性和边界条件比较复杂的情况, 由于地震波的散射、折射和波形转换的影响, 解析方法会受到极大的限制, 这时数值方法会更为有效, 因而这种方法具有更广阔的应用前景。另外, 虽然对地形效应的研究很多, 但非弹性浅圆山谷地形的数值解还较少, 在这种地形条件下地震波入射角度、介质粘性阻尼等因素对地震动谱特性的影响目前仍停留在感性认识阶段。笔者利用李小军(1993)、廖振鹏和袁晓铭(1993)给出的适用于任何地形情况且具有较高计算精度和计算稳定性的显式有限元有限差分方法对粘弹性浅圆地形进行了研究, 力求获得该地形对出平面运动谱特性的影响规律, 此方法在研究其他地形的影响方面也有较大的借鉴意义。

## 1 浅圆山谷地形效应的研究进展

不同深宽比的浅圆弧常作为实际的山谷地形的简化模型, 大量针对二维浅圆形山谷在 SH 波入射下的解析解(Trifunac 1973, Wong 和 Trifunac 1974, 廖振鹏和袁晓铭, 1993)和三维半球形山谷在 SH 和 SV 波入射下的解析解(Lee 1982, 1984, Sanchez-Sesma 和 Eaqul 1979)都假定山谷为单一的凹陷地形。随着研究的深入, 对浅圆山谷地形效应的影响研究已经由研究弹性半空间中的各向同性介质发展到了研究各向异性介质对弹性波的传播和散射(Crampin 1981; 刘殿魁韩峰, 1988), 由单一山谷的散射问题发展到了相邻凹陷的散射问题(许贻燕和韩峰, 1992; 刘殿魁许贻燕, 1993), 由单一山谷的影响问题发展到层状凹陷山谷的影响问题(Yuan 和 Liao, 1995; 梁建文等, 2003)。对浅圆山谷地形影响的研究大多假定介质为完全弹性, 较少涉及介质粘性, 但实际上土体或岩体有不同程度的阻尼, 介质阻尼引起的能量损耗相当明显, 因此在地形影响问题中考虑介质的阻尼是很有必要的。另外, 大量的解析解和数值解关注的都是地形对地表位移和峰值加速度的影响, 对地震动频率成分的影响考虑相对较少, 而且定性结果较多, 定量结果较少, 因

\* 收稿日期: 2007-11-07

基金项目: 中国地震局地壳应力研究所基本科研业务专项基金(J2207831)和国家科技支撑计划课题(2006BAC13B02)联合资助。

此针对粘弹性的浅圆山谷地形进行地震动谱特性影响的定量研究对分析地形影响机理和影响程度有重要意义。

## 2 数值方法及算例

本文的数值分析采用显式有限元有限差分方法 (李小军等, 1995) 该方法在二维粘弹性场地地震反应分析中具有较高的计算精度, 由于引入了一种新的积分格式, 它有效地克服了计算中出现的高频误差的放大问题。在数值计算中将遵循如下规定:

(1) 用平面等参四节点四边形单元来模拟均质土体或岩体;

(2) 用瑞利阻尼来考虑介质的粘性:  $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$ , 式中  $[C]$ 、 $[M]$ 、 $[K]$  分别为阻尼矩阵、质量矩阵、刚度矩阵。为考虑介质阻尼的方便, 一般假定  $\alpha$  为零;

(3) 有限元网格的空间离散步距取为  $\Delta X < (1/10)\lambda T$  以保证弹性波动在离散体系中传播时的计算精度;

(4) 在模型底部和左、右两侧, 用二阶透射人工边界来模拟实际场地中地震波动能量的散射。

数值计算方法的合理性往往通过与解析解的比较来检验。笔者采用的算例是半圆形谷地地表的地震响应, 介质为均匀土体, 入射地震波为垂直入射的简谐 SV 波 (Wong 1982)。选用这个算例是因为该地形的解析解已被许多学者用来作为新的计算方法检验的标尺 (Bouckovalas 等, 1999)。图 1 分别给出了 Wong (1982) 采用的方法和本文方法得到的地表峰值位移与自由场地地表峰值位移的比值 (包括水平分量比值  $U_h$  和竖向

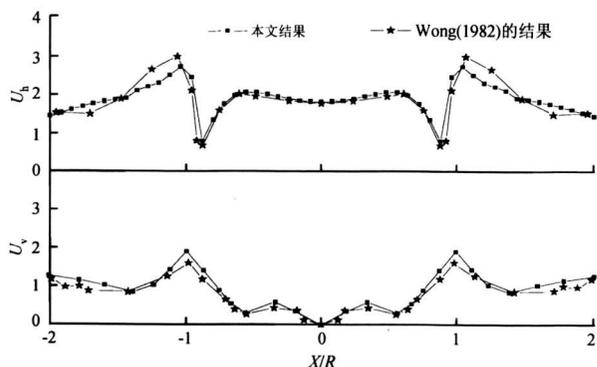


图 1 数值方法的验证

(SV 波入射,  $R=25m$ ,  $\lambda/R=2$ )

分量比值  $U_v$ )。由图可知本文方法获得的计算结果与解析解的计算结果比较符合。

## 3 计算模型及输入波

不规则场地对地震产生的地面运动及震害有很大的影响, 这已在国内外许多震后调查中得到证实 (李方杰, 2005)。为了探讨均匀粘弹性半空间上浅圆山谷地形的影响, 我们建立了如图 2 所示的计算模型, 并在整个浅圆弧上等间距地选取 9 个观测点。模型的物理参数如下: S 波波速为  $1000 m/s$  圆弧宽度为  $L$  深度为  $H$  半径为  $R$  采用透射人工边界从无限介质中切取包括凹陷在内的有限计算区, 对有限计算区采用有限元离散化。规则区中正方形有限单元的边长为  $5m$  计算时间步长取  $0.001s$ 。

实际地震动往往包含较宽的频段, 为研究频域内各不同观测点地面运动谱比的差异, 笔者采用频域内波形单一、带宽较宽 (约为  $0 \sim 50 Hz$ ) 的钟形脉冲 (荣棉水和李小军, 2007) 作为能比较直观地反映观测点地面运动概况的简单入射波时程 (图 3)。将此时程脉冲作为 SH 波, 从模型底部输入即可计算得到不同情况下 1~9 个观测点的位移时程。

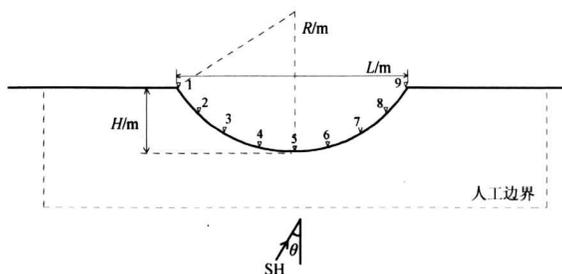


图 2 计算模型示意图

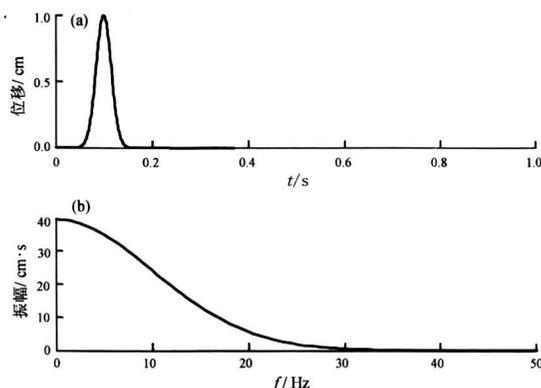


图 3 位移脉冲 (a) 及其傅氏谱 (b)

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  $f$  来反映局部地形特征尺寸与入射波波长之间的关系： $f = (L/2\pi C_s)\omega = L/\lambda_s$ 。定义表征地面运动放大系数的参数为谱比  $U = |G(\omega, x)/2G_0(\omega)|$ ， $G(\omega, x)$  为地面水平位移傅氏谱， $G_0(\omega)$  为波自下而上入射到均匀半空间时， $x$  位置对应点处的地面水平位移傅氏谱（坐标轴设于点 1 处，水平向右为  $X$  轴，竖直向上为  $Y$  轴）。

### 4 深宽比、入射角度及阻尼比的影响

对于给定的波动输入，取  $\beta=0.0002$  取计算时步长为  $0.001s$  所有的计算结果都取至  $10Hz$  观测点在位移脉冲下的位移如图 4 所示。

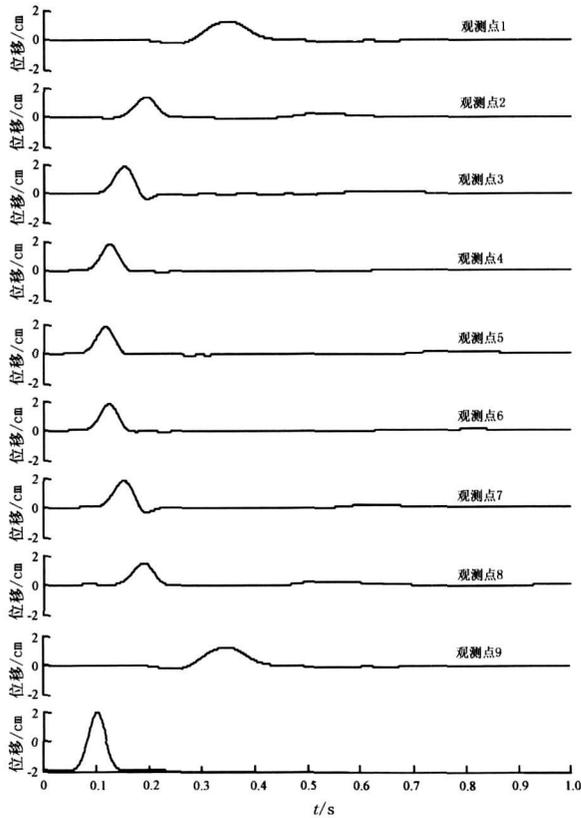


图 4 输入 SH 波时凹陷地形各观测点的位移时程 ( $\theta=0^\circ$ )

定义深宽比  $\xi = H/L$  ( $H$ 、 $L$  见图 2)。计算的深宽比从 0.1 (浅圆凹陷) 到 0.5 (半圆凹陷)，得到若干具有代表性的观测点的谱比。

由于图 2 所示的计算模型和观测点位置的对称性，在脉冲波垂直入射时仅给出第 1~5 个观测点不同深宽比得到的谱比曲线 (图 5、图 6)。

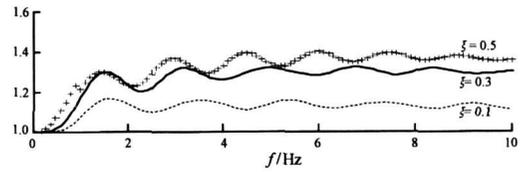


图 5 不同深宽比情况下观测点 1 谱比的比较 ( $L=500m, \theta=0^\circ, \beta=0.0002$ )

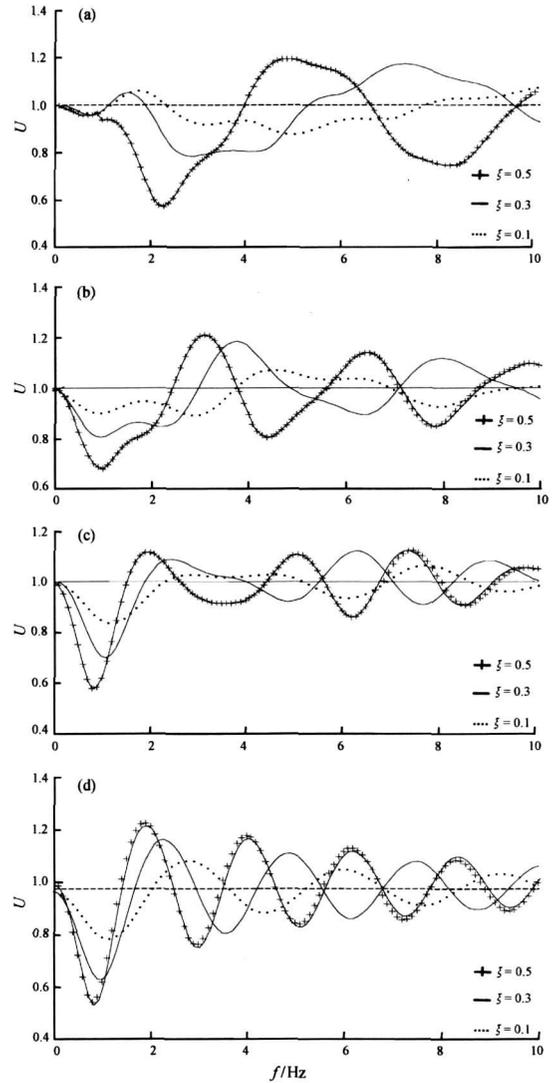


图 6 不同深宽比情况下观测点 2 (a)、3 (b)、4 (c)、5 (d) 谱比的比较 ( $L=500m, \theta=0^\circ, \beta=0.0002$ )

图 5 揭示了凹陷左侧观测点 1 在整个计算频段的放大效应，谱比随深宽比的增大而增大。从图 6 谱比曲线形状的变化趋势可以发现凹陷两侧及底部观测点谱比曲线变化的一些共同的规律。首先，这些观测点谱比随频率而变化，在谱比为 1 的轴 (可看做深宽比为 0) 附近波动，一般情况下既有

谱比大于 1 的频段, 又有谱比小于 1 的频段。这个现象说明了观测点上地震动的放大和减小是频率相关的。另外, 这些谱比曲线还附带揭示了不同的频率段地形放大和减小效应的强弱程度。计算结果是从具有确定的宽度和深度的浅圆山谷地形得到的, 但是笔者已经按照局部地形特征尺寸与入射波长之间的关系将频率做了无量纲化, 这些结论也能简单地推广到其它尺寸的地形。值得注意的是, 笔者提前假定了入射脉冲波的波速, 也就给出了特定频率的波的波长。改变入射波的波速将改变不同频率成分的波的波长, 谱比与无量纲频率的函数关系也就会随之发生改变, 因此, 笔者给出的结论依赖于模型的剪切波速。其次, 深宽比变化时同一观测点的谱比曲线产生了两个明显的效应, 即“放大”和“压缩”。“放大”表现在随着深宽比的增大, 谱比曲线的波动幅度增大。对于本文给出的三种情况, 谱比最大值出现在脉冲波垂直入射、深宽比为 0.5 时的情形, 观测点 5 的最大谱比出现在无量纲频率约为 0.6 处, 其值未超过 1.5。“压缩”体现在随着深宽比的增大, 放大或缩小的频段跨度变窄, 谱形类似于朝低频方向平移。在观测点 4、5 处, 这一现象比较明显。

笔者计算得到了浅圆山谷在脉冲波入射角度为  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $70^\circ$ 、 $80^\circ$  七种情况下地形各观测点谱比随频率的变化曲线。由于观测点较多, 只选取第 5 观测点 5 个不同入射角度的计算结果 (图 7)。分析发现, 入射角度在  $0^\circ \sim 45^\circ$  时谱比形状比较类似, 峰值大小也比较接近, 而入射角度为  $60^\circ$  时, 曲线形状会发生很大的变化。将计算角度在  $45^\circ$  到  $60^\circ$  之间加密, 我们发现, 大于  $45^\circ$  的若干入射角度时的谱比规律也较为类似, 各观测点都能得到这一结论, 由于篇幅的限制不能给出每个观测点的谱比图, 本文仅给出观测点 1 的结论 (图 8)。可以认为  $\theta$  为  $45^\circ$  是谱比规律发生变化的特殊的分界角度。另外, 通过对大量的计算数据分析可得到如下结论: ① 入射角度增大, 凹陷顶部的点 (如点 1) 宽频放大的趋势增大, 而凹陷底部的点 (点 5) 宽频缩小的效应增强。此结果与 Trifunac (1973) 用解析方法得出的半圆形山谷在 SH 波以不同角度入射时得出的结果相吻合; ② 对于半圆形凹陷, 当入射角度小于等于  $45^\circ$  时, 随着入射角的增大, 观测点谱比幅值略有增加, 谱比曲线也朝着高频方向移动 (图 9), 当入射角大于等于  $60^\circ$  时, 谱比曲线形状会发生很大的变化, 幅值变得很大; ③ 由观测点 2、3、4 的谱比曲线

形状随入射角度变化的规律可知, 离凹陷底部越近, 窄频段的放大效应会逐渐减弱, 而场地缩小效应会逐渐占据优势地位。

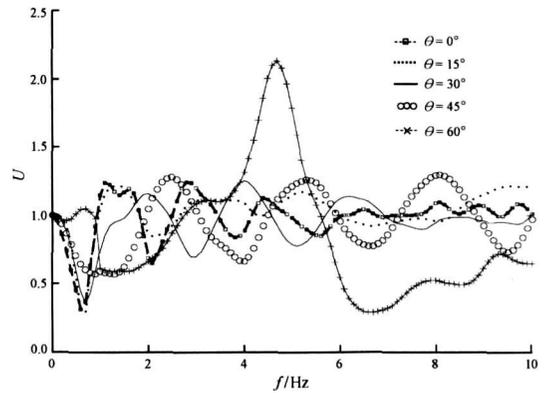


图 7 不同入射角度下观测点 5 的谱比  
( $L = 500 \text{ m}$ ,  $\beta = 0.0002$ )

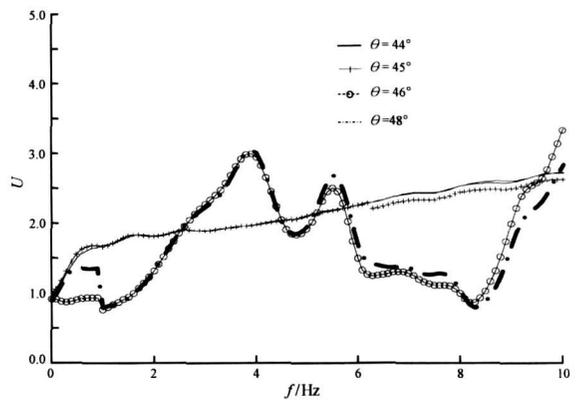


图 8 不同入射角度下观测点 1 的谱比  
( $L = 500 \text{ m}$ ,  $\beta = 0.0002$ )

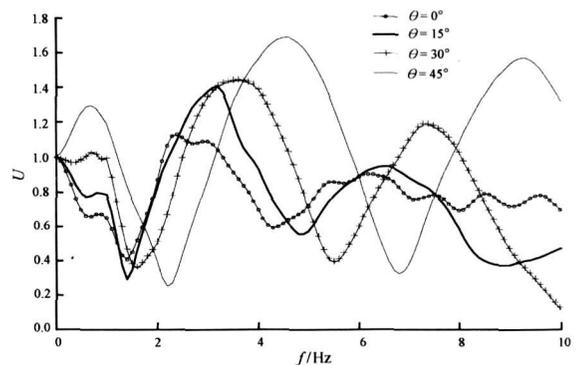


图 9 不同入射角度下观测点 2 的谱比  
( $L = 500 \text{ m}$ ,  $\beta = 0.0002$ )

为了获得阻尼系数的变化对粘弹性场地谱比的影响, 本文给出了阻尼系数  $\beta$  取 0.0002、0.0005、0.001、0.0015 四种情况 (对 10 Hz 的

单频入射波对应百分比阻尼为 0.6、1.6、3.1、4.7 下的谱比曲线, 限于篇幅, 仅给出观测点 5 的结果 (图 10)。由图可以看出, 谱比约在 4 Hz 以内基本不受阻尼系数  $\beta$  变化的影响, 在 4~10 Hz 频率范围内,  $\beta$  增大, 谱比曲线向上移动, 即频段放大的趋势略有增强。对于其它观测点, 4 Hz 以外的谱比曲线也会出现分叉现象, 这种分叉现象是由于不同阻尼比下  $G(\omega, \infty)$ 、 $2G_0(\omega)$  都发生变化而导致的。总的来说, 不同  $\beta$  的情形下谱比曲线的形状基本相似, 说明阻尼比对谱比的影响不大, 这也说明用谱比方法来研究地形效应在很大程度上可以剔除介质阻尼因素的影响。

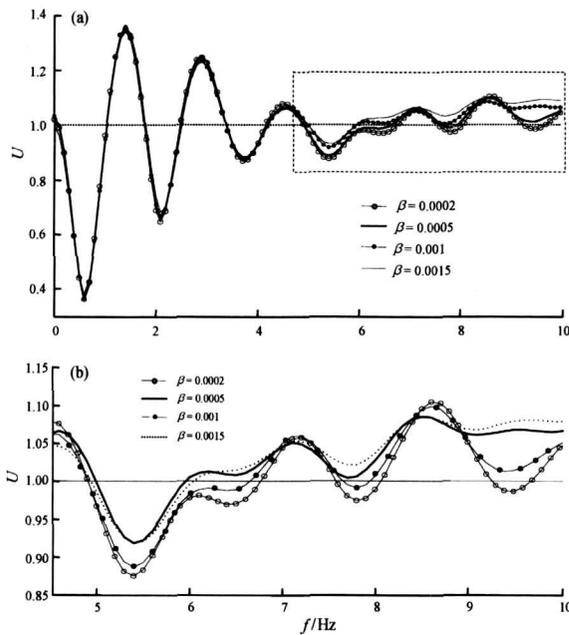


图 10 不同阻尼系数下观测点 5 的谱比 (a) 和谱比曲线局部放大 (b) ( $L=500\text{ m}$ ;  $\theta=0^\circ$ )

## 5 结语

(1) 对于 SH 波入射的凹陷地形, 凹陷顶部有明显的宽频带放大效应, 这种放大效应基本上是随着深宽比和体波入射角度的增大而增大的, 在较宽的无量纲频率范围内凹陷底部表现出场地缩小效应, 深宽比越大, 体波入射角度越大, 这种效应越明显。

(2) 对于 SH 波入射, 随着深宽比的增大, 整个谱比曲线形状变化激烈部分朝低频平移。入射角度小于  $45^\circ$  时, 随入射角度的增大各观测点谱比波形变化激烈部分向高频移动, 对本文设定的半圆凹陷模型, 入射角度  $45^\circ$  是观测点谱比规律发生

明显变化的分界角度。

本文给出的是粘弹性地形的数值解, 现阶段结论只是进一步验证或给出这种简单地形对地震动频谱特性的影响规律, 要得到更多定量结论, 还需要做更深入的研究。

## 参考文献:

- 李方杰. 2005. 局部不规则场地对 Rayleigh 波的散射 [D]. 天津: 天津大学.
- 李小军. 1993. 非线性场地地震反应分析方法的研究 [D]. 北京: 国家地震局工程力学研究所.
- 李小军, 廖振鹏, 关慧敏. 1995. 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, 17 (3): 362-369.
- 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 [J]. 振动工程学报, 16 (2): 158-165.
- 廖振鹏, 袁晓铭. 1993. 圆弧形凹陷地形对平面 SH 波散射问题的级数解答 [J]. 地震工程与工程振动, 13 (2): 1-14.
- 刘殿魁, 韩峰. 1988. SH 波对各向异性凹陷地形的散射 [J]. 地震工程与工程振动, 10 (2): 11-25.
- 刘殿魁, 许贻燕. 1993. 各向异性介质中 SH 波与多个半圆形凹陷地形的相互作用 [J]. 力学学报, 25 (1): 93-102.
- 荣棉水, 李小军. 2007. 局部地形对出平面运动谱特性的影响分析 [J]. 中国地震, 23 (2): 147-156.
- 许贻燕, 韩峰. 1992. 平面 SH 波在相邻多个半圆形凹陷地形上的散射 [J]. 地震工程与工程振动, 12 (2): 12-18.
- Bouckova I, Gazeas G, Papadimitriou A G. 1999. Geotechnical aspects of the Aegean (Greece) earthquake [C]. // Proceedings of second international conference on geotechnical earthquake engineering. Lisbon, 2: 739-48.
- Cranpin SA. 1981. Review of wave motion in anisotropic and cracked elastic media [J]. Wave motion, 3: 343-391.
- Lee V W. 1982. A note on scattering of elastic plane waves by a hemispherical canyon [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1: 122-129.
- Lee V W. 1984. Three dimensional diffraction of plane P, SV and SH waves by a hemispherical alluvial valley [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 3: 133-144.
- Sanchez-Sesma F J, Ewaquil J A. 1979. Ground motion on alluvial valleys under the incident plane SH waves [J]. BSSA, 69: 1107-1129.
- Trifundas M D. 1973. Scattering of plane SH wave by a semi-cylindrical canyon [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1 (3): 267-281.
- Wong H L. 1982. Effect of surface topography on the diffraction of P, SV and Rayleigh waves [J]. BSSA, 72 (4): 1167-83.
- Wong H L, Trifundas M D. 1974. Surface motion of a semi-elliptical alluvial valley for incident plane SH waves [J]. BSSA, 64: 1389-1408.
- Yuan X M, Liao Z P. 1995. Scattering of plane SH waves by a cylindrical alluvial valley of circular arc cross section [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 24: 1303-1313.

## Effect of Viscoelastic Local Canyon on the Spectrum Property of Ground Motion

RONG Mian-shui<sup>1</sup>, LIXiao-jun<sup>2</sup>, LU Yue-jun<sup>2</sup>, YOU Hong-bin<sup>3</sup>

(1. Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085, China)

(2. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

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

### Abstract

We apply explicit finite difference method to analyze the topography effect of viscoelastic site. In order to test the method we have used in this paper, we introduce the development about this method and make a numerical experiment on scattering of SV waves for local canyon. Then we obtain the response of ground surface under the excitation of bell shape impulse. We study the influence of several factors including the characteristic size of canyon (ratio of depth to width), the angle of incidence of impulse wave and the medium damping on spectrum property of ground motion. For a shallow canyon, the characteristic size and the angle of incidence have great effect on spectrum property of ground motion, and the extent of effect is related to the frequency of basic excitation. The effect of angle of incidence is more distinct than that of characteristic size.

Key words: explicit finite difference method, viscoelastic site, local canyon, topography effect