

# 局部不规则地形对地震地面运动的影响\*

刘晶波

(中国北京 100084 清华大学土木工程系)

**摘要** 用有限元法结合修正的透射人工边界, 研究了 P、SV 和 Rayleigh 波传播时局部不规则地形对地面运动的影响, 研究的理论模型包括局部孤突地形和相邻地形。研究结果表明: Rayleigh 波传播时孤突地形对地面运动的放大作用显著大于 P 和 SV 波传播时的结果; 相邻不规则地形的存在使地面运动进一步放大、持时延长和呈现窄频带放大特征。考虑相邻地形的影响和传播地震波中的 Rayleigh 波成分, 将使理论模型预测结果更接近实际地震观测结果。

主题词 地面运动 地震波 局部不规则地形

## 引言

局部不规则地形对地震地面运动的影响是一个有意义的研究课题, 一些工程问题中在研究局部场地条件对地震动的影响时需要考虑不规则地形的影响。对于这一问题, 许多学者曾采用现场实验(Davis, West, 1973; Gelebi, 1987)、理论模型分析(Bard, 1982; Boucchon, 1973; Sanchez-Sesma, 1983; Yuan, Men, 1992)和试验室模型试验(Rogers *et al.*, 1974; Bullitt, Toksoz, 1985)等方法进行了研究。然而, 到目前为止, 理论分析结果和现场观测结果之间仍存在量上的差别, 理论分析结果无法拟合实际观测到的地面运动高幅值的放大, 采用简单理论模型的分析结果也无法说明实际观测中地面运动呈现的频率相关的窄频带放大现象。对此, Gelebi(1987)和 Geli 等(1988)曾进行了详细的综述。引起这种差异的原因很多, 其中之一是理论分析中采用的不规则地形模型和假设的入射波场过于简单, 例如, 体波竖直入射下的一个孤突山梁。而实际地质构造模型并非由单一均匀介质及单一孤突地形构成, 可能存在复杂的地下非均匀构造和来自相邻不规则地形的影响。本文目的是通过采用较复杂的不规则地形模型, 试图减小理论分析和实际观测之间的差别, 使得不规则地形对地震影响的理论预测能接近于实际情况。

文中将有限元法和修正的透射人工边界相结合, 分析了二维不规则地形对地震地面运动的影响, 给出了 P 波、SV 波竖直入射和 Rayleigh 波传播时地面运动的数值解。力学模型包括局部孤突地形和由 3 个山梁组成的相邻地形。Bard 和 Tucker(1985)以及 Geli 等(1988)曾研究过此类模型, 但仅考虑了 SH 波入射情况。

\* 国家自然科学基金资助项目。

1994-11-14 收到初稿, 1995-11-21 收到修改稿, 1995-11-25 决定采用。

# 1 局部孤突地形对地面运动的影响

为便于讨论更复杂地形的结果,首先分析均匀弹性半空间上简单孤突地形的影响。孤突地形模型如图 1 所示,为单一突出的山梁。采用的坐标系亦示于图中。观测点位于地表

面之上、顺次排列,相邻观测点之间水平距离相等。表 1 给出若干观测点的坐标,由此可确定山梁的形状。模型的物理参数取 P 波波速为 2 425 m/s、SV 波波速 1 400 m/s,而山梁的宽度为  $L=400$  m。

采用修正的透射人工边界从无限介质中切取出包括局部孤突地形在内的有限计算区(廖振鹏,刘晶波,1992),对有限计算区用有限元法离散化。规则区中正方形单元边长  $\Delta=20$  m,时间步长  $\Delta t=0.005$  s,人工边界区内滤波系数取为  $\beta=0.85$ (廖振鹏,刘晶波,1992)。

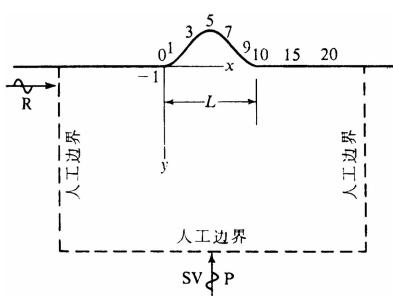


图 1 局部孤突地形模型

表 1 地面上观测点的坐标

观测点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
坐标 $x/m$	40	80	120	160	200	240	280	320	360	400
坐标 $y/m$	-16	-56	-104	-144	-160	-144	-104	-56	-16	0

P 波和 SV 波入射时取入射波时程  $g(t)$  为狄拉克  $\delta$  函数的有限差分近似(刘晶波,廖振鹏,1987)。图 2a 示出  $g(t)$  及其 Fourier 谱  $G(\omega)$ 。其中,  $T_0$  为  $g(t)$  的持时,而  $f_0=1/T_0$ 。入射 Rayleigh 波时程(刘晶波,廖振鹏,1987)在自由地表的水平位移分量  $u_f(t)$ (实线)和竖直位移分量  $v_f(t)$ (虚线)见图 2b,而  $U_f(\omega)$  是  $u_f(t)$  的 Fourier 谱,  $f_0$  为频谱的卓越频率,  $T_0=1/f_0$ 。本文计算中, P 波和 SV 波入射时取  $T_0=0.3$  s, Rayleigh 波入射时取  $T_0=0.2 \pi$  s。

观测点  $i$  处地面运动的谱比定义为

$$\begin{cases} \bar{U}_i(\Omega) = U_i(\Omega)/U_f(\Omega) \\ \bar{V}_i(\Omega) = V_i(\Omega)/V_f(\Omega) \end{cases}$$

其中

$$\Omega = (L/2\pi C_s)\omega = L/\lambda_s \quad (2)$$

为无量纲频率;  $U_i$  和  $V_i$  分别为观测点  $i$  处地面运动水平和竖直位移的 Fourier 谱,  $U_f$  和  $V_f$  是自由场的结果;  $C_s$  为 SV 波波速,  $\lambda_s$  为 SV 波波长。由式(2)可见,无量纲频率  $\Omega$  是反映局部地形特征尺寸与入射波波长关系的重要参数。

## 1.1 SV 波入射

SV 波竖直入射时,地面各观测点水平位移  $u(t)$  和竖直位移  $v(t)$  时程示于图 3。由于竖直分量远小于水平分量(见图 3),故只讨论水平向运动。图 3 说明山顶(观测点 5)地面运动放大,而山脚(观测点 0 或 10)地面运动变小。与自由场相比,山顶地面运动峰值放大低于 1.3,而山顶与山脚地面运动的峰值比约为 1.7。

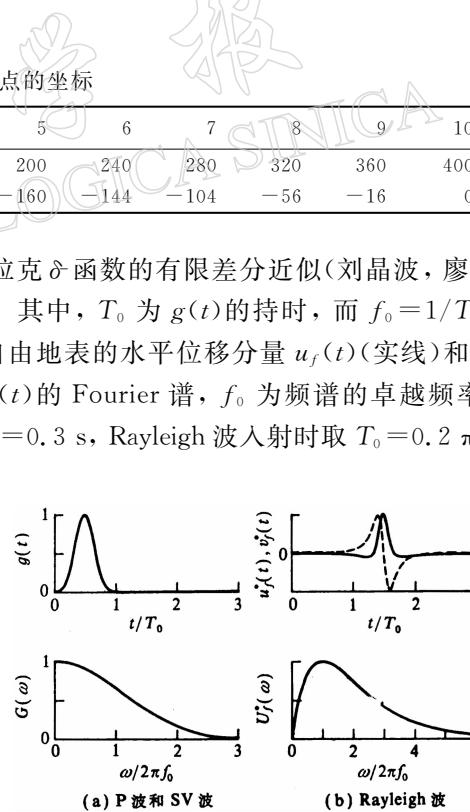


图 2 入射波时程及其 Fourier 谱

图4给出观测点0至5地面运动的谱比。从图中可看到，在山顶地面运动出现一宽频带放大，谱比一般不超过2，相应的卓越频率 $\Omega$ 约为0.45。

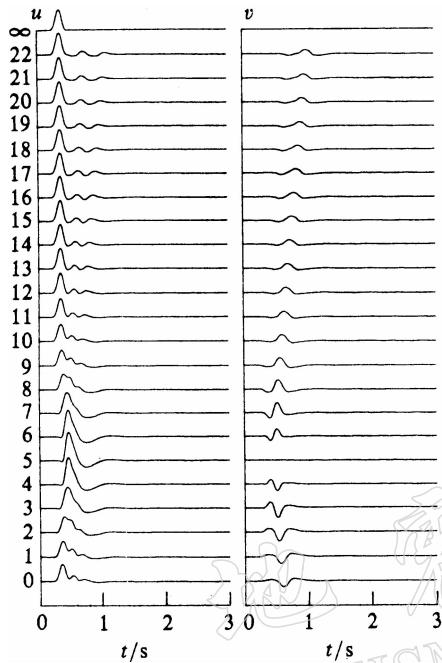


图3 SV波竖直入射时孤突地形  
各观测点地面运动时程

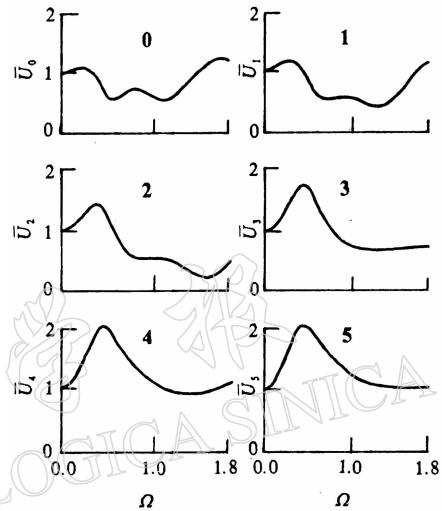


图4 SV波竖直入射时孤突地形  
不同观测点地面运动谱比

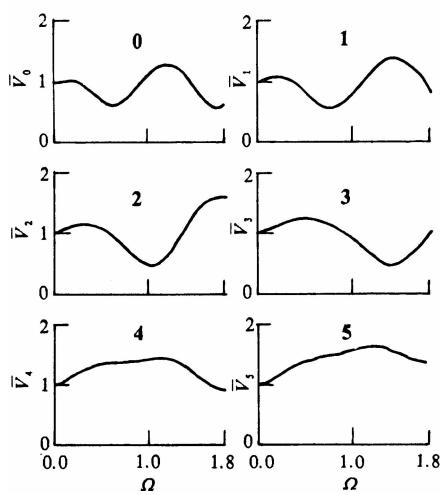


图5 P波竖直入射时孤突地形  
不同观测点地面运动谱比

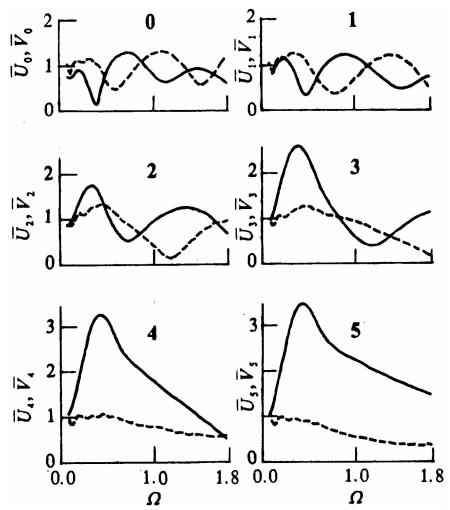


图6 Rayleigh波入射时孤突地形  
不同观测点地面运动谱比

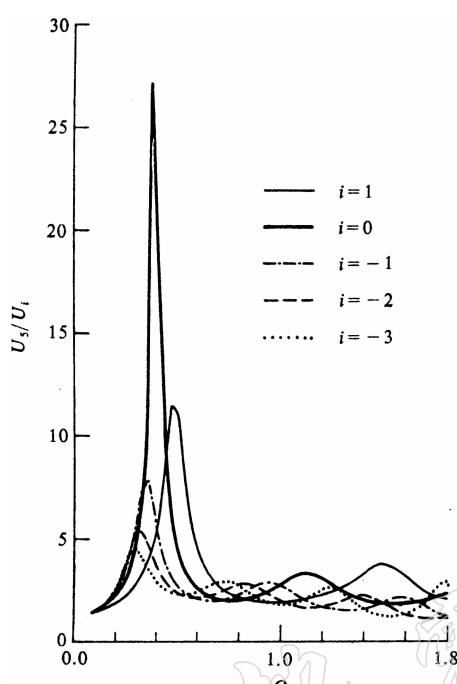


图 7 Rayleigh 波入射时孤突地形山  
顶与山脚附近水平运动谱比

观测点的比值仍达到 5~12 之间。这一结果远大于以往其它学者采用二维模型和体波入射得到的理论分析结果，甚至达到和超过三维模型的结果(Geli *et al.*, 1988)。

以上结果说明，在研究局部不规则地形的影响时，Rayleigh 波入射时的效果应引起重视，这对解释地形引起的地面运动的放大现象有时是重要的，特别是在解释由小型人工振源得到的结果时更是如此。因为大多数情况下，小型人工振源产生的波中 Rayleigh 波成分显著。

## 2 相邻地形对地面运动的影响

本节研究相邻地形影响问题。力学模型如图 8 所示，为 3 个顺次排列的山梁，其中每一个山梁与图 1 给出的孤突山梁完全相同，所选力学模型的参数和计算参数与上一节中的均相同。观测点沿地表顺次排列，图 8 仅标出几个关键点。

### 2.1 SV 波入射

与孤突地形相比，由于本文采用脉冲输入，在时域相邻地形的影响不使山顶地面运动的峰值产生进一步放大(图 9)，但山顶(观测点 5 和 15)地面运动的持时明显延长，主脉冲过后的地面运动主要是由相邻地形引起的，如果采用更长持时的地震动输入，可以预计山顶地面运动可能出现更大的峰值放大。

### 1.2 P 波传播

P 波竖直传播时，水平地面运动分量远小于竖直分量，因此仅讨论竖直分量。在时域，山顶地面运动峰值放大小于 1.3，山顶与山脚地面运动峰值比一般低于 1.5。山顶地面运动的谱比一般不超过 1.5(图 5)，低于 SV 波入射情形。

### 1.3 Rayleigh 波传播

Rayleigh 波传播时，山顶及其邻近区域水平地面运动显著放大，时域的峰值放大和山顶与山脚的峰值比可以分别达到 2.2 和 2.8，远大于 SV 波和 P 波入射情形；但竖向地面运动不发生放大。

频域结果示于图 6，山顶地面运动水平分量有一宽频带放大，最大谱比约为 3.5(相应卓越频率  $\Omega \approx 0.4$ )，也远大于 SV 波和 P 波入射情形。图 6 也清楚显示山顶地面运动的竖直分量几乎在整个频段内不发生放大。

图 7 给出山顶与山脚附近水平地面运动频谱的比值。从中发现，Rayleigh 波传播时山顶与山脚地面运动的比值可以高达 25，即使与山脚临近

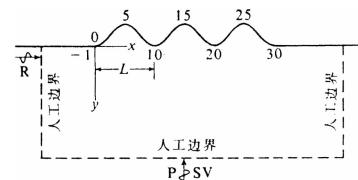


图 8 相邻地形模型

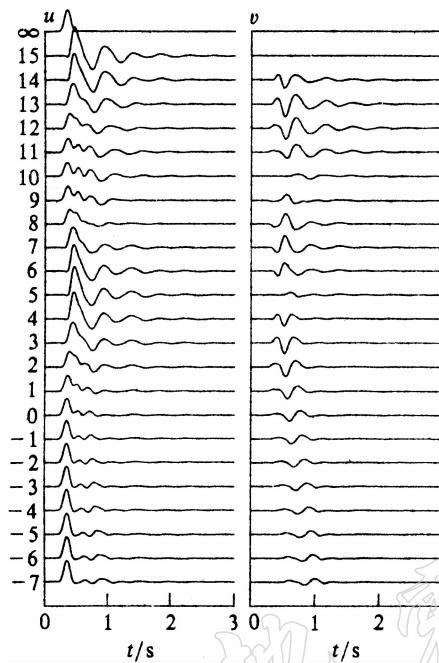


图 9 SV 波竖直入射时相邻地形  
各观测点地面运动时程

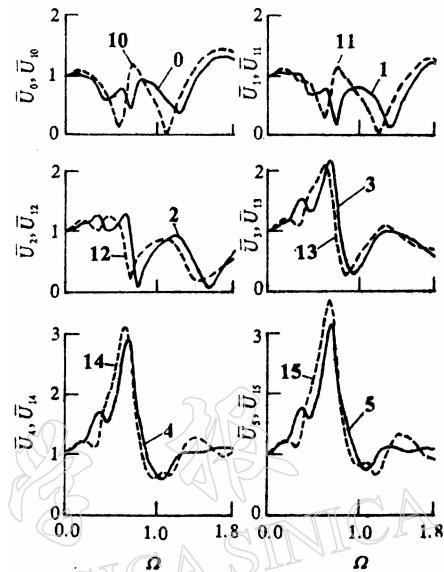


图 10 SV 波竖直入射时相邻地形  
不同观测点地面运动谱比

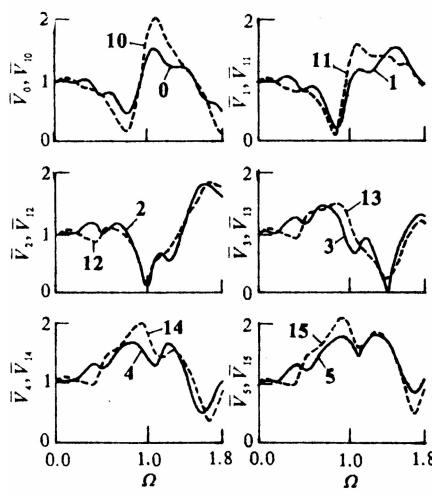


图 11 P 波竖直入射时相邻地形  
不同观测点地面运动谱比

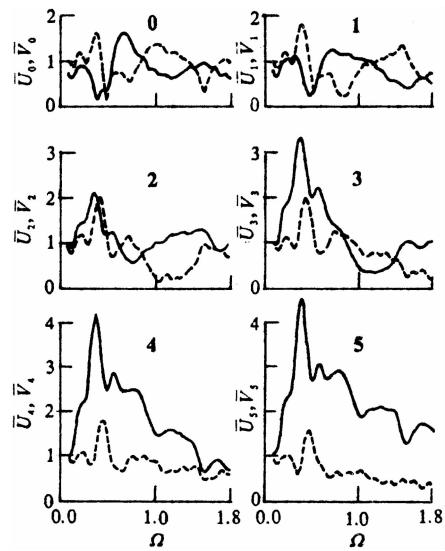


图 12 Rayleigh 波入射时相邻地形  
不同观测点地面运动谱比.  
图中实线为  $\bar{U}$ , 虚线为  $\bar{V}$

由于相邻地形的影响,地面运动的谱比变得复杂(图 10),卓越频率向高频段移动,无量纲卓越频率在 0.6~0.7 之间。与孤突地形相比,山顶地面运动发生进一步放大,谱比可达到 3(观测点 5)至 3.5(观测点 15);而孤突地形谱比仅在 2 左右。比较图 10 中的实线和虚线可以发现,中部山顶和侧面山顶地面运动相差不大,中部山顶的结果略大于侧面山顶的结果,而不同位置的山脚(观测点 0 或 10)的地面运动在一定频段内相差较大。因此,选择不同的山脚为参考点,对计算山顶与山脚地面运动频谱的比值影响较大。当取观测点 0 为参考点时,山顶与山脚的比值可达 6~7,大于孤突地形的结果。

## 2.2 P 波入射

P 波入射时地面运动的谱比示于图 11 中。与 SV 波入射时的结果类似,相邻地形使地面运动持时延长和使山顶地面运动进一步放大,也使谱比的分布趋于复杂。但地形对地面运动的影响仍小于 SV 波入射时的结果。

## 2.3 Rayleigh 波传播

由于 Rayleigh 波沿地面传播,相邻不规则地形中位于波入射一侧的第一个山梁的地面运动远大于其它山梁,因此,下面仅限于讨论第一个山梁。地面运动的谱比示于图 12 中。可见,相邻地形的存在使山顶附近地面运动进一步放大,并呈现窄频带放大,其最大谱比为 4.5。与 SV 波入射时的结果不同,Rayleigh 波入射时,相邻地形的存在并不使山顶地面运动放大的卓越频率发生变化。山顶与山脚地面运动频谱比值仍高于 20。

## 3 结语

(1) Rayleigh 波传播时,突出地形对地面运动的影响明显大于 SV 波和 P 波入射情形,山顶与山脚频谱比值很大,远远超过以前采用二、三维模型和体波入射所获得的理论结果。

(2) 相邻不规则地形的存在使山顶附近地面运动进一步放大、持时延长,对 SV 波和 Rayleigh 波入射时的影响大于 P 波。

(3) 考虑相邻地形影响时,地面运动呈现窄频带放大特征,这符合地震观测结果。

本文研究结果表明:考虑相邻不规则地形的影响,可使理论分析结果接近实际观测结果;相邻地形影响显著;面波传播不容忽视。在现场实验中,特别是对由小型人工振源得到的结果进行分析时,应该考虑面波的影响。地形影响问题分析中还有很多因素未考虑,例如,地形的三维特征,相邻地形之间距离的影响。工程场地多种多样,还需对具体问题进行具体分析,单就地形影响问题而言,面波入射和相邻地形的存在不可忽略。

## 参 考 文 献

- 廖振鹏, 刘晶波, 1992. 波动有限元模拟的基本问题. 中国科学(B辑), **35**(8): 874~882  
 刘晶波, 廖振鹏, 1987. 地震波散射问题的数值解. 地震工程与工程振动, **7**(2): 1~18  
 Bard P Y, Tucker B E, 1985. Underground and ridge site effects: A comparison of observation and theory. *Bull Seism Soc Amer*, **75**: 905~922  
 Bard P Y, 1982. Diffracted waves and displacement field over two-dimensional elevated topographies. *Geophys J R astr Soc*, **71**: 731~760  
 Bouchon M, 1973. Effect of topography on surface motions. *Bull Seism Soc Amer*, **63**: 615~632  
 Bullitt J T, Toksoz, M N, 1985. Three-dimensional ultrasonic modeling of Rayleigh wave propagation. *Bull Seism Soc Amer*, **75**: 1 087~1 104

- Davis L L, West L R, 1973. Observed effects of topography on ground motion. *Bull Seism Soc Amer*, **63**: 283~298
- Gelebi M, 1987. Topographical and geological amplifications determined from strong-motion and aftershock records of the 3 March 1985 Chile earthquake. *Bull Seism Soc Amer*, **77**: 1 147~1 167
- Geli L, Bard P Y, Jullien B, 1988. The effect of topography on earthquake ground motion: A review and new results. *Bull Seism Soc Amer*, **78**: 42~63
- Rogers A M, Kaze L J, Bennett T J, 1974. Topographic effects on ground motion for incident P waves: A model study. *Bull Seism Soc Amer*, **64**: 437~456
- Sanchez-Sesma F J, 1983. Diffraction of elastic waves by three-dimensional surface irregularities. *Bull Seism Soc Amer*, **73**: 1 621~1 636
- Yuan X M, Men F L, 1992. Scattering of plane SH waves by a semi-cylindrical hill. *Earthq Engng Str Dyn*, **21**: 1 091~1 098

地 灾 害 学  
ACTA SEISMOLOGICA SINICA