

DOI: 10.11779/CJGE201706013

圆弧状多层沉积凹陷在平面 SV 波入射下的动力响应

陈三红¹, 张郁山^{*2}

(1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081; 2. 中国地震灾害防御中心, 北京 100029)

摘要: 利用波函数的 Fourier-Bessel 级数展开法, 推导了含任意多个圆弧状沉积层的凹陷地形在平面 SV 波入射下动力响应的解析解。通过与单一沉积凹陷条件下所得结果的比较, 验证了该解析解计算结果的正确性。利用该解析解, 研究了凹陷地形上覆沉积介质的成层性, 包括沉积层的层数、排列顺序、以及软弱夹层的厚度和刚度等, 对地面运动的影响效应。

关键词: 地震波; 散射; 解析解; 凹陷地形; 地震动

中图分类号: P315.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)06-1074-08

作者简介: 陈三红(1994-), 女, 硕士研究生, 研究方向为地震工程学。E-mail: 1561980175@qq.com。

Dynamic responses of canyon with multiple arc-shaped layers under incidence of plane SV waves

CHEN San-hong¹, ZHANG Yu-shan²

(1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China; 2. China Earthquake Disaster Prevention Center, Beijing 100029, China)

Abstract: By using the Fourier-Bessel series expansion of wave function, obtained is the analytical solution to the dynamic responses of canyon with multiple arc-shaped alluvial layers under the incidence of plane SV waves. Comparison of the results of single-layered canyon validates the rightness of the proposed analytical solution. From this analytical solution, the layering effects, such as the number of layers, their sequence and the stiffness and thickness of soft interlayers, of the overlying alluvia on the ground motion are studied.

Key words: seismic wave; scattering; analytical solution; canyon; ground motion

0 引言

局部规则散射体对地震波散射问题的解析解研究是地震学和地震工程学的一个重要研究课题。规则问题的解析解能够为研究局部场地条件对地震动的影响效应提供量化的估计, 更为重要的是, 解析解可以作为检验数值解^[1-3]计算精度的标准^[4]。针对凹陷地形, Trifunac^[5]最先利用波函数的 Fourier-Bessel 级数展开法推导了半圆形凹陷对 SH 波散射问题的解析解, 之后 Wong 等^[6]利用波函数的 Mathieu 级数展开法研究了半椭圆形凹陷对 SH 波的散射。同样利用 Fourier-Bessel 级数展开法, 分别基于内域型和外域型 Graf 加法公式, Cao 等^[7]和 Yuan 等^[8]得到了具有不同深宽比的浅圆形单一凹陷在 SH 波入射下动力响应的解析解。其中, Cao 等^[7]采用的近似方法, 即利用一个半径非常大的圆弧近似模拟水平地表, 被用于求解各种规则凹陷地形^[9-13]的散射问题。梁建文等^[10-11]指出, 实际的凹陷地形通常含有多个上覆沉积层, 而且介质的成层性对地面运动具有重要的影响。但是, 由

于问题的复杂性, 现有层状凹陷对 SV 波散射问题的解析解仅考虑了单一覆盖层的情况^[10]。作为对该工作的拓展, 本文推导了含任意多个圆弧状沉积层的凹陷在 SV 波入射下动力响应的解析解, 通过将该解退化为单一沉积情况, 利用已有解^[10]验证了其计算结果的正确性。基于该解析解, 研究了凹陷地形中覆盖土层的层状特性对地面运动的影响。

1 模型

含任意多个圆弧状沉积层的凹陷模型如图 1 所示。弹性半空间上覆土层共有 $L-1$ 层, 相邻土层的边界为浅圆弧形, 所有圆弧的圆心在 O_1 点, 圆弧边界的半宽、深度和半径分别为 a_l , h_l , 和 b_l ($l=1, 2, \dots, L$)。圆心 O_1 与地面之间的距离为 h_0 。所有介质均假定为

基金项目: 地震行业科研专项项目(201408020); 国家科技支撑项目(2012BAK15B01)

收稿日期: 2016-03-07

*通讯作者 (E-mail: hyszhang@163.com)

各向同性、线弹性, 其 S 波波速、P 波波速、密度、泊松比和剪切模量分别记为 $c_s^{(l)}$, $c_p^{(l)}$, $\rho^{(l)}$, $\nu^{(l)}$ 和 $\mu^{(l)}$ ($l=1, 2, \dots, L$)。第 L 层介质即为半空间介质。

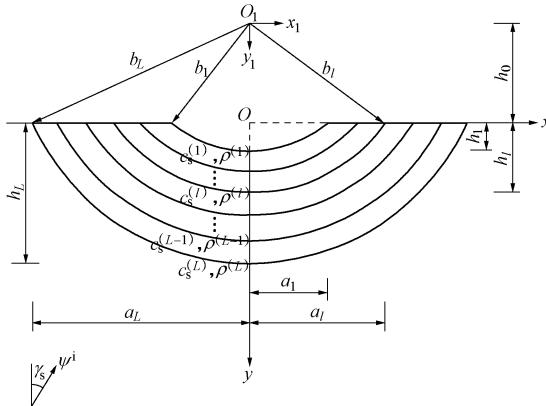


图 1 圆弧状多层凹陷模型

Fig. 1 Model of canyon with multiple arc-shaped layers

入射 SV 波为平面简谐波, 其圆频率为 ω , 入射角为 γ_s , 其势函数可表示为

$$\Psi^i(x, y) = \exp[i k_s^{(L)} (x \sin \gamma_s - y \cos \gamma_s)] \quad (1)$$

其中, $i = \sqrt{-1}$, $k_s^{(L)}$ 是半空间中 S 波的圆波数。模型中第 l 层介质 P 波和 S 波圆波数分别为

$$\left. \begin{aligned} k_p^{(l)} &= \omega / c_p^{(l)}, \\ k_s^{(l)} &= \omega / c_s^{(l)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

在稳态情况下, P 波和 S 波的势函数满足如下方程

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \Phi + k_p^{(l)} \Phi &= 0, \\ \nabla^2 \Psi + k_s^{(l)} \Psi &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中, Φ 和 Ψ 分别表示 P 波和 S 波的势函数。问题的边界条件包括零应力边界条件和连续条件。零应力条件包括半空间水平地表的零应力条件

$$\left. \begin{aligned} t_{yy}^{(l)}(x, y) \\ t_{xy}^{(l)}(x, y) \end{aligned} \right\} \Big|_{|x| > a_1, y=0} = 0 \quad (l=1, 2, \dots, L) \quad (4a)$$

和凹陷圆弧表面的零应力条件

$$\left. \begin{aligned} t_{rr}^{(l)}(r_1, \theta_1) \\ t_{r\theta}^{(l)}(r_1, \theta_1) \end{aligned} \right\} \Big|_{r_1=b_l, |\theta_1| \leq a_l} = 0 \quad (4b)$$

连续条件包括第 l 个圆弧边界处的位移连续条件

$$\left. \begin{aligned} u_r^{(l-1)}(r_1, \theta_1) \\ u_\theta^{(l-1)}(r_1, \theta_1) \end{aligned} \right\} \Big|_{r_1=b_l, |\theta_1| \leq a_l} = \left. \begin{aligned} u_r^{(l)}(r_1, \theta_1) \\ u_\theta^{(l)}(r_1, \theta_1) \end{aligned} \right\} \Big|_{r_1=b_l, |\theta_1| \leq a_l} \quad (5a)$$

和应力连续条件

$$\left. \begin{aligned} t_{rr}^{(l-1)}(r_1, \theta_1) \\ t_{r\theta}^{(l-1)}(r_1, \theta_1) \end{aligned} \right\} \Big|_{r_1=b_l, |\theta_1| \leq a_l} = \left. \begin{aligned} t_{rr}^{(l)}(r_1, \theta_1) \\ t_{r\theta}^{(l)}(r_1, \theta_1) \end{aligned} \right\} \Big|_{r_1=b_l, |\theta_1| \leq a_l} \quad (5b)$$

式中, $l=2, 3, \dots, L$, 符号 t 和 u 分别表示应力和位移。

2 散射波

本文依然采用 Cao 等^[7]的近似方法, 即使用一个

半径非常大的圆弧模拟水平地表, 该圆弧的半径为 R 、其圆心为 O_2 , 如图 2 所示。相应地, 在图 2 所示的极坐标系 $r_2 - \theta_2$ 下, 零应力条件式 (4a) 转换为

$$\left. \begin{aligned} t_{rr}^{(l)}(r_2, \theta_2) \\ t_{r\theta}^{(l)}(r_2, \theta_2) \end{aligned} \right\} \Big|_{r_2=R, |r_2 \sin \theta_2| > a_1} = 0 \quad (l=1, 2, \dots, L) \quad (4c)$$

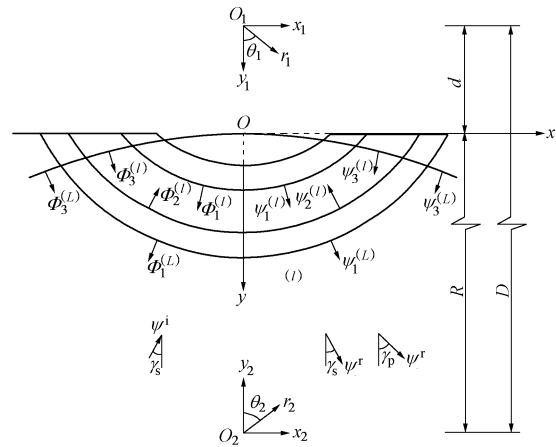


图 2 多层凹陷的散射波

Fig. 2 Scattering waves in multi-layered canyon

2.1 半空间散射波

半空间中存在自由场波和由于凹陷的存在产生的散射波。如图 2 所示, 自由场波包括入射 SV 波 Ψ^i 、反射 SV 波 Ψ^r 和反射 P 波 Φ^r 。SV 波入射下的临界角为

$$\gamma_{cr} = \arcsin(c_s^{(L)} / c_p^{(L)}) \quad (6)$$

如果入射角 $\gamma_s \leq \gamma_{cr}$, 反射 P 波为均匀平面波; 若 $\gamma_s > \gamma_{cr}$, 则反射 P 波为沿水平方向传播的非均匀平面波, 其幅值沿竖直方向呈指数衰减。在图 2 所示极坐标系 $r_1 - \theta_1$ 下, 上述自由场 P 波的势函数 Φ^r 、SV 波的势函数 $\Psi^{ir} = \Psi^i + \Psi^r$ 分别具有如下 Fourier-Bessel 级数形式

$$\left. \begin{aligned} \Phi^r(r_1, \theta_1) \\ \Psi^{ir}(r_1, \theta_1) \end{aligned} \right\} = \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \begin{aligned} J_n(k_p^{(L)} r_1) (A_{21,n}^{(L)} \cos n\theta_1 + B_{21,n}^{(L)} \sin n\theta_1) \\ J_n(k_s^{(L)} r_1) (C_{21,n}^{(L)} \sin n\theta_1 + D_{21,n}^{(L)} \cos n\theta_1) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中, $J_n(x)$ 为第一类 Bessel 函数, 系数 $A_{21,n}^{(L)}$, $B_{21,n}^{(L)}$, $C_{21,n}^{(L)}$, $D_{21,n}^{(L)}$ 具有明确的解析表达式, 具体可参考文献 [11]。

如图 2 所示, 半空间中散射波包括: ①柱面行波, 其势函数表示为 $\Phi_1^{(L)}$ (P 波) 和 $\Psi_1^{(L)}$ (SV 波); ②柱面驻波, 其势函数表示为 $\Phi_3^{(L)}$ (P 波) 和 $\Psi_3^{(L)}$ (SV 波)。在坐标系 $r_1 - \theta_1$ 和 $r_2 - \theta_2$ 下, 上述势函数具有如下级数形式:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1^{(L)}(r_1, \theta_1) \\ \Psi_1^{(L)}(r_1, \theta_1) \end{aligned} \right\} = \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \begin{aligned} H_n^{(1)}(k_p^{(L)} r_1) (A_{11,n}^{(L)} \cos n\theta_1 + B_{11,n}^{(L)} \sin n\theta_1) \\ H_n^{(1)}(k_s^{(L)} r_1) (C_{11,n}^{(L)} \sin n\theta_1 + D_{11,n}^{(L)} \cos n\theta_1) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

表 1 本文所研究多层凹陷的几何与力学参数

Table 1 Geometrical and mechanical parameters of multi-layered canyon

研究目的	凹陷编 号	几何参数	力学参数*	
			剪切波速比	密度比
计算结果验证	C0-1	$h_1 : h_2 : a_1 = 3.0 : 4.0 : 6.0$	$\beta_1 : \beta_2 = 200 : 800$	$\rho_1 : \rho_2 = 1.6 : 2.0$
	C0-2	$h_1 : h_2 : h_3 : a_1 = 3.0 : 3.5 : 4.0 : 6.0$	$\beta_1 : \beta_2 : \beta_3 = 200 : 200 : 800$	$\rho_1 : \rho_2 : \rho_3 = 1.6 : 1.6 : 2.0$
沉积层数影响	C1-1	$h_1 : h_2 : a_1 = 3.0 : 6.0 : 6.0$	$\beta_1 : \beta_2 = 300 : 500$	$\rho_1 : \rho_2 = 2.0 : 2.2$
	C1-2	$h_1 : h_2 : h_3 : h_4 : a_1 = 3.0 : 4.0 : 5.0 : 6.0 : 6.0$	$\beta_1 : \beta_2 : \beta_3 : \beta_4 = 200 : 300 : 400 : 500$	$\rho_1 : \rho_2 : \rho_3 : \rho_4 = 1.9 : 2.0 : 2.1 : 2.2$
软夹层影响	C2-1	$h_1 : h_2 : h_3 : a_1 = 3.0 : 4.5 : 6.0 : 6.0$	$\beta_1 : \beta_2 : \beta_3 = 300 : 400 : 500$	$\rho_1 : \rho_2 : \rho_3 = 2.0 : 2.1 : 2.2$
	C2-2	$h_1 : h_2 : h_3 : a_1 = 3.0 : 4.5 : 6.0 : 6.0$	$\beta_1 : \beta_2 : \beta_3 = 300 : 200 : 500$	$\rho_1 : \rho_2 : \rho_3 = 2.0 : 1.9 : 2.2$
	C2-3		$\beta_1 : \beta_2 : \beta_3 = 300 : 150 : 500$	$\rho_1 : \rho_2 : \rho_3 = 2.0 : 1.8 : 2.2$
软夹层厚度 影响	C3-1	$h_1 : h_2 : h_3 : h_4 : a_1 = 3.0 : 4.5 : 6.0 : 7.0 : 6.0$	$\beta_1 : \beta_2 : \beta_3 : \beta_4 = 300 : 200 : 500 : 500$	$\rho_1 : \rho_2 : \rho_3 : \rho_4 = 2.0 : 1.9 : 2.2 : 2.2$
	C3-2		$\beta_1 : \beta_2 : \beta_3 : \beta_4 = 300 : 200 : 500 : 500$	$\rho_1 : \rho_2 : \rho_3 : \rho_4 = 2.0 : 1.9 : 2.2 : 2.2$

*注: 所有介质的泊松比假定为 0.25, 相应的, SV 波的临界入射角 $\gamma_{cr} = 35.3^\circ$ 。

$$\begin{cases} \Phi_3^{(L)}(r_2, \theta_2) \\ \Psi_3^{(L)}(r_2, \theta_2) \end{cases} = \sum_{m=0}^{\infty} \begin{cases} J_m(k_p^{(L)} r_2) (A_{32,m}^{(L)} \cos m\theta_2 + B_{32,m}^{(L)} \sin m\theta_2) \\ J_m(k_s^{(L)} r_2) (C_{32,m}^{(L)} \sin m\theta_2 + D_{32,m}^{(L)} \cos m\theta_2) \end{cases} \quad (9)$$

其中, $H_n^{(1)}(x)$ 表示第一类 Hankel 函数, 系数 $A_{11,n}^{(L)}, B_{11,n}^{(L)}, C_{11,n}^{(L)}, D_{11,n}^{(L)}, A_{32,m}^{(L)}, B_{32,m}^{(L)}, C_{32,m}^{(L)}, D_{32,m}^{(L)}$ 为待定系数。

2.2 沉积层中散射波

在第 l 层介质中 ($l = 1, 2, \dots, L-1$), 存在两种柱面驻波, 其势函数分别为 $\Phi_2^{(l)}$ 和 $\Psi_2^{(l)}$ 、 $\Phi_3^{(l)}$ 和 $\Psi_3^{(l)}$, 以及柱面行波, 其势函数为 $\Phi_1^{(l)}$ 和 $\Psi_1^{(l)}$, 如图 2 所示。在坐标系 $r_1 - \theta_1$ 和 $r_2 - \theta_2$ 下, 上述势函数具有如下级数形式:

$$\begin{cases} \Phi_1^{(l)}(r_1, \theta_1) \\ \Psi_1^{(l)}(r_1, \theta_1) \end{cases} = \sum_{n=0}^{\infty} \begin{cases} H_n^{(1)}(k_p^{(l)} r_1) (A_{11,n}^{(l)} \cos n\theta_1 + B_{11,n}^{(l)} \sin n\theta_1) \\ H_n^{(1)}(k_s^{(l)} r_1) (C_{11,n}^{(l)} \sin n\theta_1 + D_{11,n}^{(l)} \cos n\theta_1) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \Phi_2^{(l)}(r_1, \theta_1) \\ \Psi_2^{(l)}(r_1, \theta_1) \end{cases} = \sum_{n=0}^{\infty} \begin{cases} J_n(k_p^{(l)} r_1) (A_{21,n}^{(l)} \cos n\theta_1 + B_{21,n}^{(l)} \sin n\theta_1) \\ J_n(k_s^{(l)} r_1) (C_{21,n}^{(l)} \sin n\theta_1 + D_{21,n}^{(l)} \cos n\theta_1) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \Phi_3^{(l)}(r_1, \theta_1) \\ \Psi_3^{(l)}(r_1, \theta_1) \end{cases} = \sum_{m=0}^{\infty} \begin{cases} J_m(k_p^{(l)} r_1) (A_{32,m}^{(l)} \cos m\theta_1 + B_{32,m}^{(l)} \sin m\theta_1) \\ J_m(k_s^{(l)} r_1) (C_{32,m}^{(l)} \sin m\theta_1 + D_{32,m}^{(l)} \cos m\theta_1) \end{cases} \quad (12)$$

其中, $A_{11,n}^{(l)}, B_{11,n}^{(l)}, C_{11,n}^{(l)}, D_{11,n}^{(l)}, A_{21,n}^{(l)}, B_{21,n}^{(l)}, C_{21,n}^{(l)}, D_{21,n}^{(l)}, A_{32,m}^{(l)}, B_{32,m}^{(l)}, C_{32,m}^{(l)}, D_{32,m}^{(l)}$ 为待定系数。

式 (8) ~ (12) 中的待定系数可以通过引入边界条件式 (4c)、(4b)、(5a)、(5b) 求解得出, 进而确定模型中不同空间点的地震动, 具体可参考文献[13]的求解过程。

3 结果分析

利用如下无量纲参数描述入射波的频率:

$$\eta = \frac{2a_L}{\lambda_s^{(L)}} = \frac{\omega a_L}{\pi c_s^{(L)}} \quad , \quad (13)$$

式中, η 为凹陷 (含上覆土层) 的总宽度 $2a_L$ 与入射 SV 波波长 $\lambda_s^{(L)}$ 之间的比值。 η 的值越大, 入射波波长越小, 其频率越高。

表 1 列出了本文所研究的不同凹陷模型, 并给出了相应的几何和力学参数。凹陷 C0-1 为梁建文等^[10]所研究的单一沉积凹陷, 用于对本文解进行验证。将其沉积层分为性质相同的土层, 得到双层沉积凹陷 C0-2。利用本文的推导得到 C0-2 的响应, 利用梁建文等^[10]的推导得到 C0-1 的响应, 将两者对比以验证本文结果的正确性。频率 $\eta = 1.0$, 入射角 $\gamma_s = 0^\circ$ 情况下, 二者计算所得地表稳态地震动位移幅值的空间变化曲线如图 3 所示。其中, 圆点表示 C0-1 的计算结果。

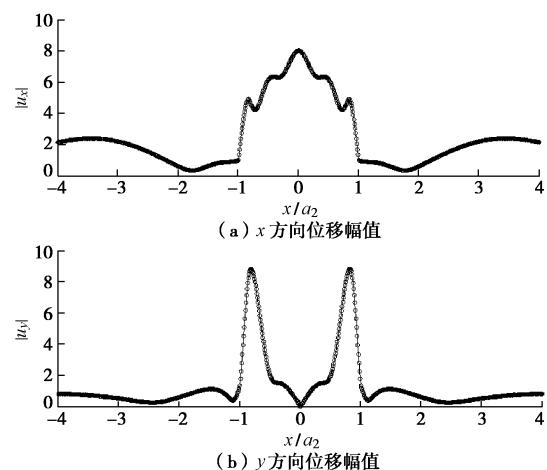


图 3 单一沉积下计算结果的验证

Fig. 3 Validation of results for single-layered canyon

可以看出, 本文解可以退化为单一沉积层^[10]情况下的解, 从而验证了其正确性。

首先分析凹陷上覆土层的层数对地面运动的影响。考虑表 1 所示凹陷 C1-1 和 C1-2。这两个凹陷的几何特征相同, 而且它们上覆土层厚度相同。二者的区别是, C1-1 为单一覆盖土层, 而 C1-2 的覆盖土层分为 3 层。C1-1 上覆土层的力学参数为 C1-2 所有上覆土层参数的均值。图 4, 5 分别给出了垂直入射 ($\gamma_s = 0^\circ$) 和斜入射 ($\gamma_s = 45^\circ$), 频率 $\eta = 0.25, 1.0, 4.0$ 条件下, 两类凹陷稳态地面运动幅值曲线的比较。

在低频波 ($\eta = 0.25$) 入射下, 凹陷 C1-1 和 C1-2 地面运动几乎相同。随着入射波频率 ($\eta = 1.0, 4.0$) 的增加, 二者之间的差异越来越大。而且, 在凹陷地表中心地带 ($-0.5 \leq x/a_4 \leq 0.5$), 三层沉积凹陷 C1-2 地面运动的幅值高于单一沉积凹陷 C1-1。该现象的物理机制在于, 在低频波入射下, 入射波和散射波的波长较

长, 其对沉积介质的成层性不敏感, 因此, 沉积层数的增加对地面运动影响较小。而在高频波入射下, 介质中地震波波长较短, 对沉积介质的成层性相对敏感, 从而造成了层状介质中散射波之间的相互干涉和能量聚焦效应显著增强。相应地, 多层凹陷中心地带地面运动的幅值就高于单一凹陷。这说明了将凹陷上覆多层沉积简化为单一沉积无法反映沉积介质的成层性对高频波的散射效应。

为揭示凹陷上覆土层中软弱夹层对地面运动的影响效应, 考虑表 1 所示凹陷 C2-1、C2-2 和 C2-3。这 3 个凹陷的几何特征相同, 均包含两个上覆土层。C2-1 上覆土层为正常沉积; C2-2 和 C2-3 为非正常沉积, 它们含有一个软弱夹层, 而且 C2-3 软夹层的刚度低于 C2-2 的软夹层。在 SV 波垂直入射 ($\gamma_s = 0^\circ$) 和斜入射 ($\gamma_s = 45^\circ$)、频率 $\eta = 0.25, 1.0, 4.0$ 条件下, 这三类凹陷地面运动幅值的空间变化曲线如图 6, 7 所

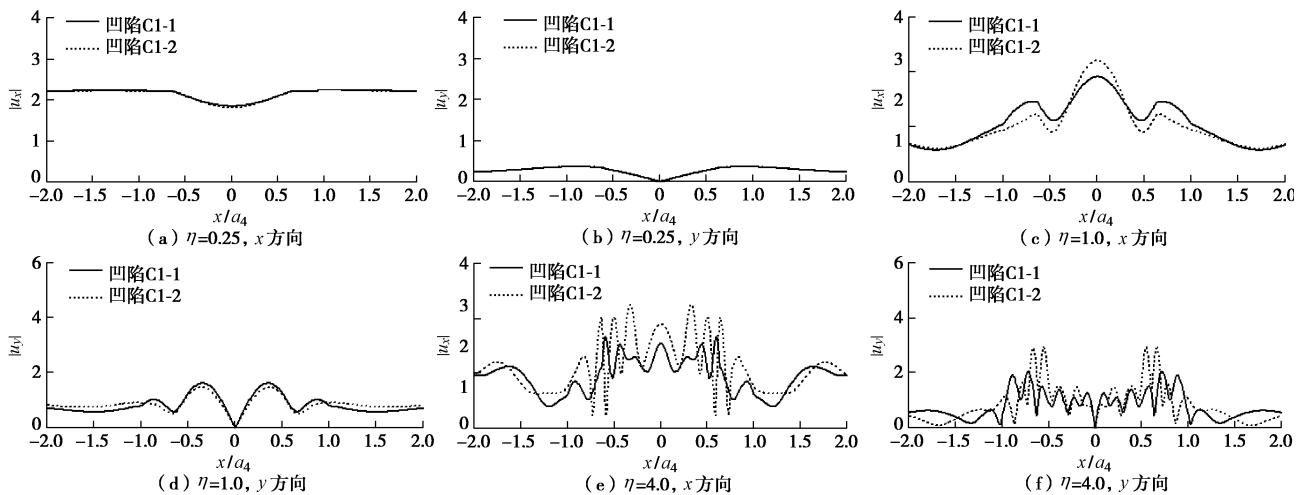


图 4 沉积层数对地面运动的影响 (垂直入射, $\gamma_s = 0^\circ$)

Fig. 4 Influence of the number of alluvial layers on ground motion (vertical incidence, $\gamma_s = 0^\circ$)

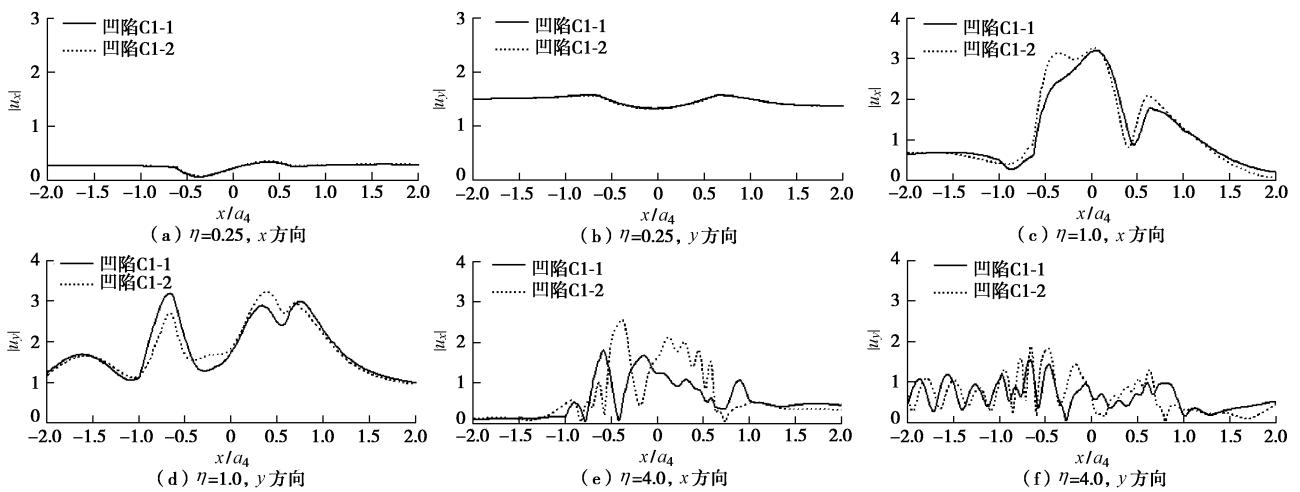
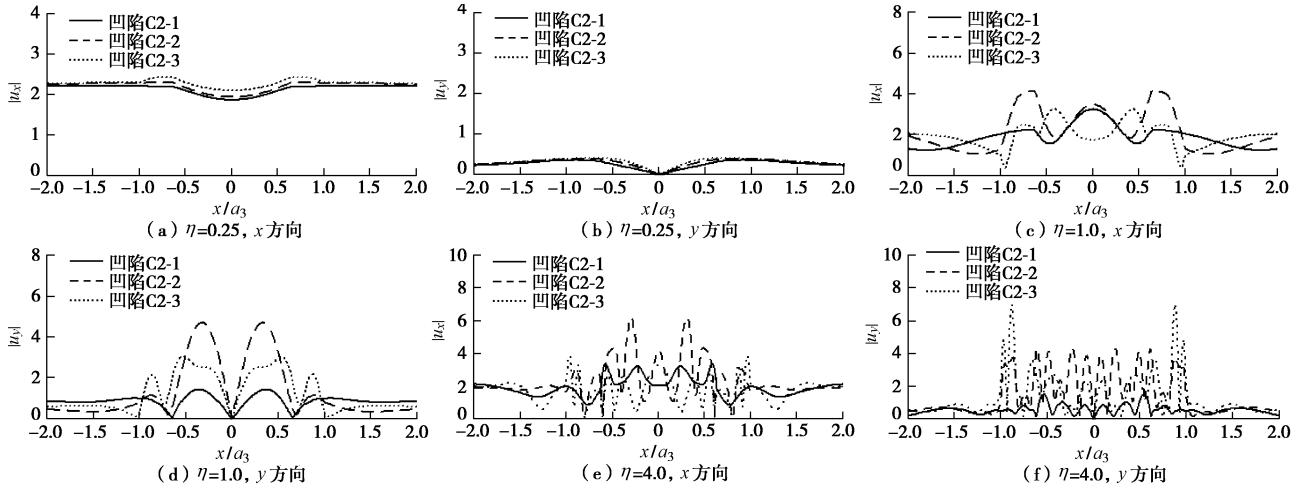
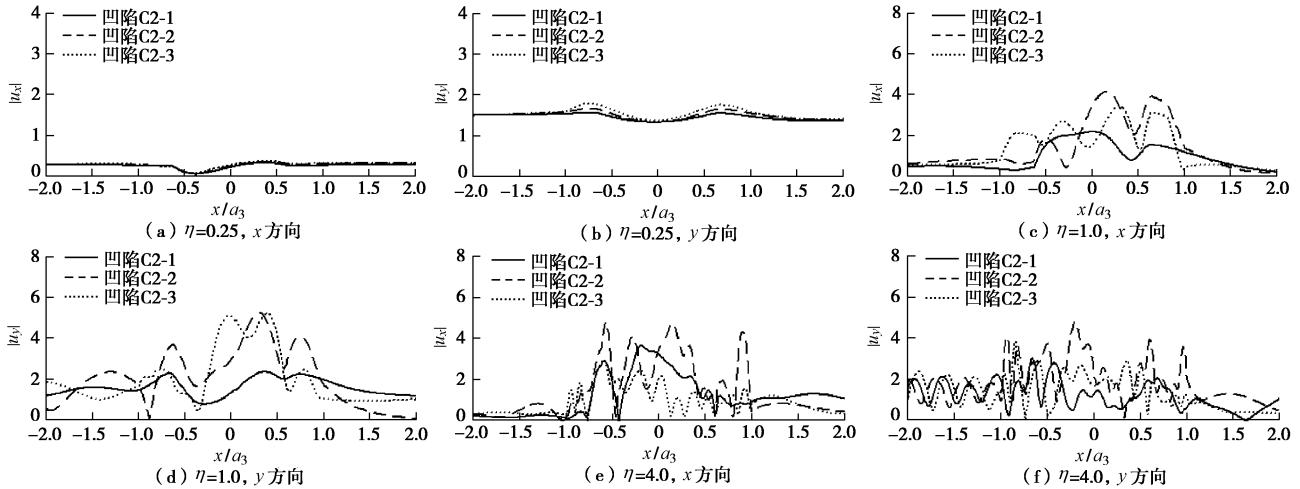


图 5 沉积层数对地面运动的影响 (斜入射, $\gamma_s = 45^\circ$)

Fig. 5 Influence of number of alluvial layers on ground motion (inclined incidence, $\gamma_s = 45^\circ$)

图 6 软弱夹层对地面运动的影响 (垂直入射, $\gamma_s = 0^\circ$)Fig. 6 Influence of soft alluvial inter-layer on ground motion (vertical incidence, $\gamma_s = 0^\circ$)图 7 软弱夹层对地面运动的影响 (斜入射, $\gamma_s = 45^\circ$)Fig. 7 Influence of soft alluvial inter-layer on ground motion (inclined incidence, $\gamma_s = 45^\circ$)

示。凹陷 C2-1 与 C2-2 地面运动之间的差异揭示了随着入射波频率的增加, 软夹层的存在对地面运动的影响越来越显著。在凹陷地表中心地带 ($-1.0 \leq x/a_3 = 1.0$), C2-2 的位移幅值明显高于 C2-1。这一现象说明了, 软夹层的存在并没有对高频地震动起到“隔震”的作用, 相反, 软夹层对凹陷中心部位的地震动起到了放大作用, 而且这种放大效应对于竖向地震动更为显著。凹陷 C2-2 和 C2-3 结果的比较说明了软弱夹层刚度较小的变化也会对地面运动的强度及其分布产生显著的影响。在 $\eta = 4.0$, $\gamma_s = 0^\circ$ 的情况下, 在软夹层出露地表的部位, C2-3 竖向地震动的位移幅值高达 7.0, 远远高于正常沉积的凹陷 C2-1 (图 6(f)、7(f));但是, 在凹陷中心部位, 软夹层则明显降低了高频反应值 (图 6(e)、7(e)), 起到了“隔震”作用。

下面讨论一下软弱夹层的厚度对地面运动的影响。考虑表 1 所示两类凹陷 C3-1 和 C3-2。从二者几何参数之间的比较可以看出, 这两个凹陷均含有 3 个

上覆土层。C3-1 第三层介质与半空间介质相同, 而 C3-2 第二层介质与第三层介质相同。因此, C3-1 和 C3-2 实际上仅包括 2 个上覆土层, 而且 C3-1 软夹层的厚度 ($h_3 - h_2 = 1.5a_1/6$) 小于 C3-2 ($h_4 - h_2 = 2.5a_1/6$)。这种处理保证了由(13)式计算得到的无量纲频率对两类凹陷保持一致。在 SV 波垂直入射 ($\gamma_s = 0^\circ$) 和斜入射 ($\gamma_s = 45^\circ$)、频率 $\eta = 0.25, 1.0, 4.0$ 条件下, 这两类凹陷地面运动幅值的空间变化曲线分别如图 8, 9 所示。对于低频波 ($\eta = 0.25$), 入射波的波长是凹陷宽度的 4 倍, 软夹层的厚度对地面运动几乎没有影响。随着入射波频率的增加, 软夹层厚度的影响效应变得显著。对于 $\eta = 1.0$ 的情况, 入射波的波长与凹陷宽度相等, 在凹陷中心地带 ($-1.0 \leq x/a_4 \leq 1.0$), C3-2 地面运动的幅值高于 C3-1。相反地, 对于 $\eta = 4.0$ 的情况, 在相同的区域, C3-1 地面运动的幅值高于 C3-2。因此, 在较高频率地震波的入射下, 软夹层的厚度对地面运动强度的分布具有显著影响, 而且该影响效应

与入射波的频率相关。从图 6~9 所示算例可以看出, 软夹层对地震波的隔震作用与入射波频率、软夹层的刚度和厚度、以及所考虑的地表位置有关。本文上述结果表明, 入射波波长与软夹层厚度越接近, 软夹层对地震波的放大效应越显著。

最后讨论一下多层沉积凹陷自身的动力特性。作为一个力学系统, 圆弧状沉积凹陷具有自振特性, 并且这些特性依赖于其几何和力学特性。如果入射波的频率与凹陷的特征频率相等, 由于共振效应, 地面运动的幅值将会非常高。为了说明这一点, 考虑如下样 5 层沉积凹陷, 其几何特征 (参照图 1) 定义为 $h_1: h_2: h_3: h_4: h_5: h_6: a_1 = 3.0: 4.0: 5.0: 6.0: 7.0: 8.0: 6.0$ 。其力学特性 (包括介质的剪切波速比和密度比) 定义为 $\beta_1: \beta_2: \beta_3: \beta_4: \beta_5: \beta_6 = 150: 200: 300: 400: 450: 500$, $\rho_1: \rho_2: \rho_3: \rho_4: \rho_5: \rho_6 = 1.8: 1.9: 2.0: 2.1: 2.15: 2.2$ 。

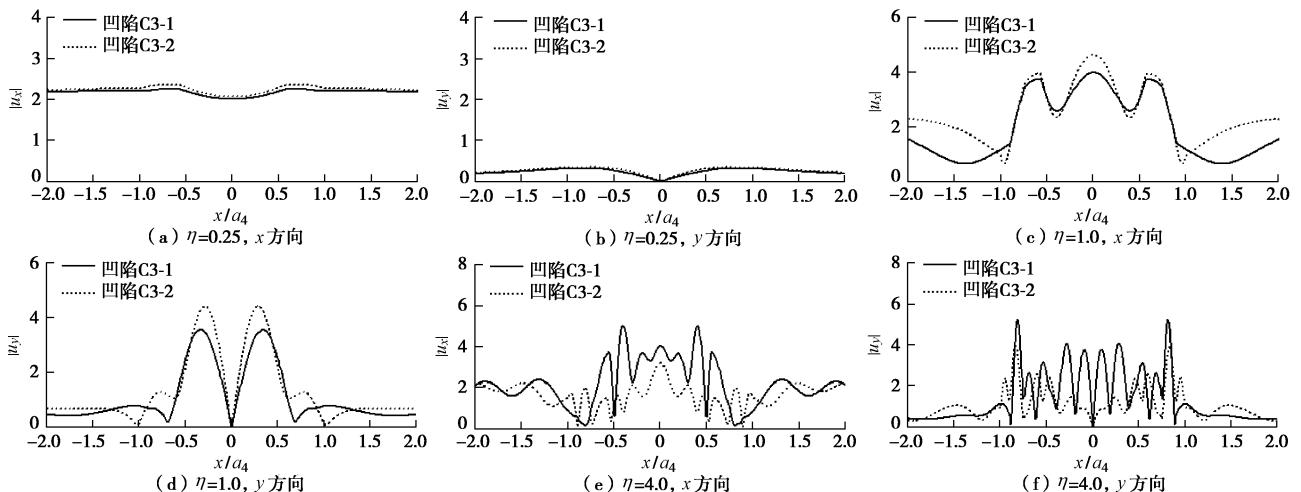


图 8 软夹层厚度对地面运动的影响 (垂直入射, $\gamma_s = 0^\circ$)

Fig. 8 Influence of thickness of soft alluvial inter-layer on ground motion (vertical incidence, $\gamma_s = 0^\circ$)

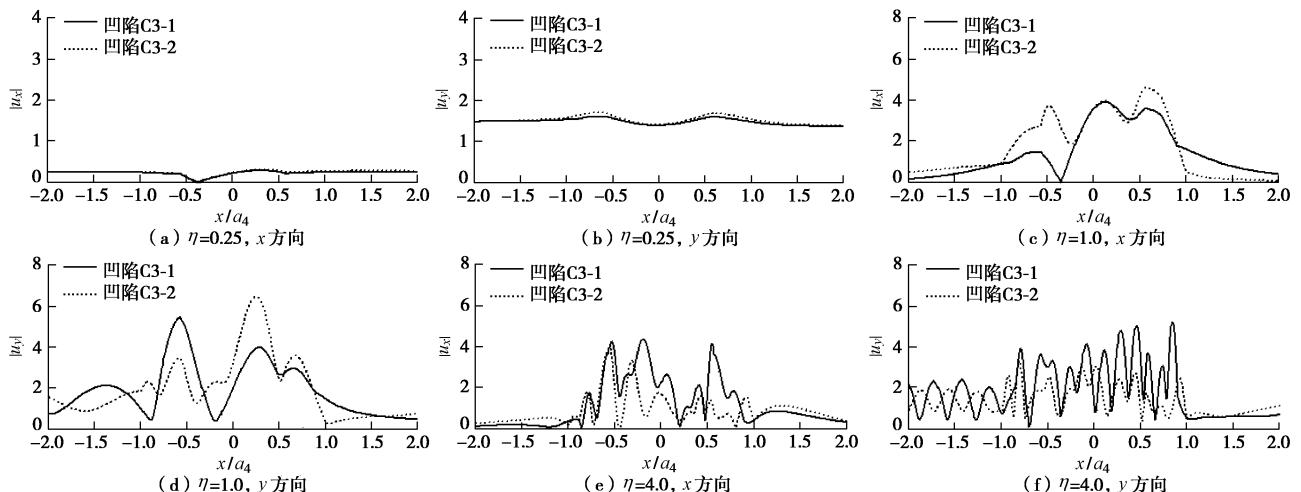


图 9 软夹层厚度对地面运动的影响 (斜入射, $\gamma_s = 45^\circ$)

Fig. 9 Influence of thickness of soft alluvial inter-layer on ground motion (inclined incidence, $\gamma_s = 45^\circ$)

SV 波的入射角 $\gamma_s = 45^\circ$ 。研究凹陷表面中心点, 即图 1 中 $x-y$ 坐标系下的点 $(0, h_1)$ 。该点的位移幅值与入射波频率之间的关系曲线如图 10 所示。其中, 无量纲频率 η 的取值由 0.01 增加至 20.0, 增量为 0.01。从图 10 所示的谱曲线可以看出, 某一固定地表点地面运动的位移幅值随着入射波频率的变化而剧烈变化, 而且在某些特定频率下, 地面运动的幅值显著高于其他入射频率。比如, 图 10 (a) 标出了最高的谱值出现在频率 $\eta_c = 1.68$ 处。这些频率即以上所讨论的凹陷地形的特征频率 (或固有频率), 其取值与分布依赖于凹陷自身的几何与力学特性。入射波频率 $\eta_c = 1.68$ 情况下, 地面运动幅值的空间变化曲线如图 11 所示 (入射角 $\gamma_s = 0^\circ, 45^\circ$)。可以看出, 在入射 SV 波的频率与凹陷特征频率相等的条件下, 凹陷地表中心部位的位移幅值达到一个非常高的水平, 斜入射下某些点竖向位移幅值超过了 70。此外, 在位移幅值曲线的极

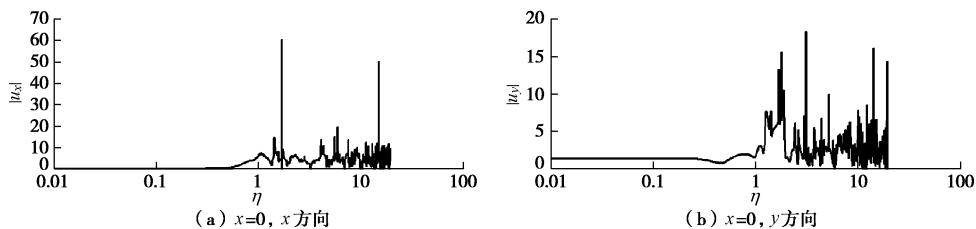


图 10 5 层沉积凹陷地表中心点的谱曲线

Fig. 10 Spectral curves of the center on the surface of canyon containing five layers

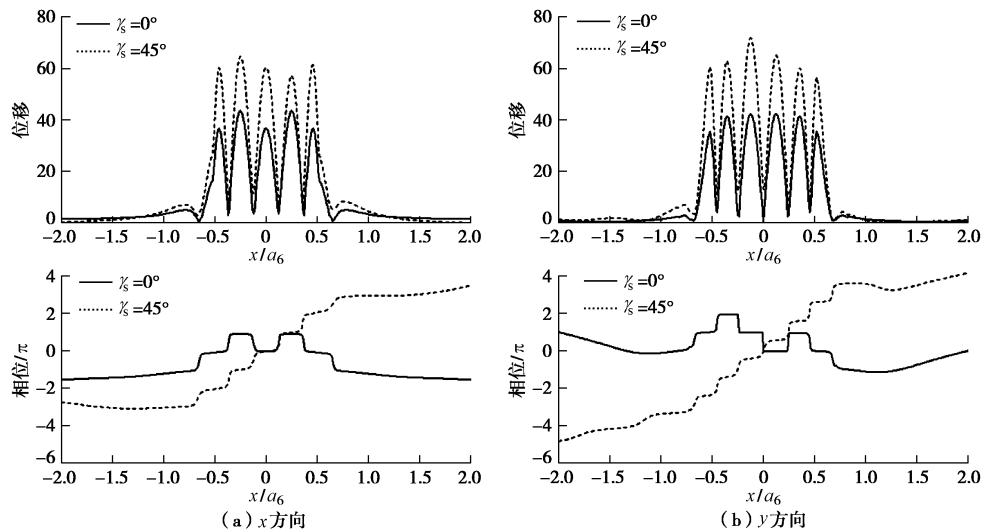
图 11 5 层沉积凹陷地表位移的幅值与相位变化曲线 (入射频率 $\eta_c = 1.68$)

Fig. 11 Spatial curves of amplitude and phase of surface displacement of canyon containing five layers

大值点附近, 相位曲线变化相对平缓; 而在幅值曲线极小值点附近, 相位曲线的变化则相对剧烈, 如图 11 所示。

4 结语

利用波函数的 Fourier-Bessel 级数展开法, 本文首先推导了含有任意多个圆弧状沉积层的凹陷地形在 SV 波入射下稳态动力响应的解析解, 通过与已有单层沉积凹陷解析解的比较验证了其计算结果的正确性。其次, 利用该解析解研究了凹陷地形上覆沉积介质的成层性对地面运动的影响效应, 其结果表明, 层状凹陷地形上覆沉积层的层数、沉积层的排列次序、软弱夹层的刚度和厚度等因素对地面运动的强度和分布具有显著影响, 尤其在入射波频率较高的情况下。此外, 对凹陷地形特征频率的研究表明, 当入射波的频率与凹陷地形特征频率相等时, 地面运动的幅值将会达到一个非常高的水平。

参考文献:

[1] 尤红兵, 梁建文, 赵凤新. 饱和层状场地中任意凹陷地形对入射 P 波的散射[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 840 -

849. (YOU Hong-bing, LIANG Jian-wen, ZHAO Feng-xin. Scattering of P waves by canyons of arbitrary shape in fluid-saturated poroelastic layered half-space[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 840 - 849. (in Chinese))

- [2] 刘中宪, 梁建文, 赵瑞斌. 流体饱和层状半空间中沉积谷地对地震波的散射-IBIEM 求解[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(3): 512 - 522. (LIU Zhong-xian, LIANG Jian-wen, ZHAO Rui-bin. Indirect boundary integral equation method for solving scattering of seismic waves by an alluvial valley in fluid poroelastic layered half-space[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(3): 512 - 522. (in Chinese))
- [3] 张楚汉, 赵崇斌. 河谷形态对平面 SH 波散射的影响[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(1): 1 - 11. (ZHANG Chu-han, ZHAO Chong-bin. Effects of canyon shape on plane SH wave scatterings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(1): 1 - 11. (in Chinese))
- [4] 廖振鹏. 工程波动理论导论[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (LIAO Zhen-peng. Introduction to wave motion theories in engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))

- [5] TRIFUNAC M D. Scattering of plane SH waves by a semi-cylindrical canyon[J]. *Earthq Engng Struct Dyn*, 1973(1): 267 - 281.
- [6] WONG H L, TRIFUNAC M D. Scattering of plane SH-waves by a semi-elliptical canyon[J]. *Earthq Engng Struct Dyn*, 1974, 3: 157 - 169.
- [7] CAO H, LEE V W. Scattering of plane SH waves by circular cylindrical canyons with variable depth-to-width ratio[J]. *European J Earthq Engng*, 1989, 2: 29 - 3.
- [8] YUAN X, LIAO Z. Scattering of plane SH waves by a cylindrical canyon of circular-arc cross-section[J]. *Soil Dyn Earthq Engng*, 1994, 13: 407 - 412.
- [9] CAO H, LEE V W. Scattering and diffraction of plane P waves by circular cylindrical canyons with variable depth-to-width ratio[J]. *Soil Dyna Earthq Engng*, 1990, 9: 141 - 150.
- [10] 梁建文, 严林隽, LEE V W. 圆弧形凹陷地形表面覆盖层对入射平面 SV 波的影响[J]. *地震学报*, 2001, 23(6): 622 - 636. (LIANG Jian-wen, YAN Lin-jun, LEE V W. Effects of a covering layer in a circular-arc canyon on incident plane SV waves[J]. *ACTA Seismologica Sinica*, 2001, 23(6): 622 - 636. (in Chinese))
- [11] 梁建文, 张郁山, 顾晓鲁, 等. 圆弧形层状凹陷地形对平面 SH 波的散射[J]. *振动工程学报*, 2003, 16(2): 158 - 165. (LIANG Jian-wen, ZHANG Yu-shan, GU Xiao-lu, et al. Scattering of plane SH waves by a circular-arc layered canyon[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2003, 16(2): 158 - 165. (in Chinese))
- [12] LI W H, ZHAO C G. Scattering of plane SV waves by cylindrical canyons in saturated porous medium[J]. *Soil Dyn Earthq Engrg*, 2005, 25: 981 - 995.
- [13] ZHANG Y S. Scattering of plane P waves by canyons containing multiple circular-arc-shaped layers[J]. *Earthq Sci*, 2010, 23: 157 - 165.

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 (www.cgejournal.com) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)