

# 饱和层状场地中任意凹陷地形对入射 P 波的散射

尤红兵<sup>1</sup>, 梁建文<sup>2</sup>, 赵凤新<sup>1</sup>

(1. 中国地震灾害防御中心, 北京 100029; 2. 天津大学土木工程系, 天津 300072)

**摘要:** 采用 Biot 理论的基本模型, 利用间接边界元方法在频域内求解了层状饱和场地中任意凹陷地形对入射 P 波的散射。利用精确的土层动力刚度矩阵进行自由场反应分析, 求得假想边界上各点的位移和各单元的应力响应; 同样计算虚拟分布荷载的格林影响函数, 求得位移和应力响应; 根据边界条件确定虚拟分布荷载, 最终得到问题的解答。结果可退化为干土结果并进行了对比。通过算例, 研究了饱和层状场地中凹陷地形入射 P 波的散射, 并与相应干土结果进行了对比。研究表明: 入射角度、入射频率和参数  $b$  对层状饱和场地的地表位移均有重要影响, 与相应干土地地结果差别显著。说明了层状模型的合理性, 以及利用层状模型分析的必要性。

**关键词:** 饱和层状半空间; 凹陷地形; P 波; 散射

中图分类号: TU435; P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)06-0840-10

作者简介: 尤红兵(1970-), 男, 河北平山人, 副研究员, 从事地震工程研究。E-mail: hbyou@126.com。

## Scattering of P waves by canyons of arbitrary shape in fluid-saturated poroelastic layered half-space

YOU Hong-bing<sup>1</sup>, LIANG Jian-wen<sup>2</sup>, ZHAO Feng-xin<sup>1</sup>

(1. China Earthquake Disaster Prevention Center, Beijing 100029, China 2. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The scattering of P waves by a canyon of arbitrary shape in a fluid-saturated, poroelastic layered half-space was modeled using the indirect boundary element method in the frequency domain. The free-field responses were calculated to determine the displacements and stresses at the surface of the canyon, and fictitious distributed loads were then applied at the surface of the canyon in the free field to calculate the Green's functions for displacements and stresses. The amplitudes of the fictitious distributed loads were determined from the boundary conditions, and the displacements arising from the waves in the free field and from the fictitious distributed loads were summed to obtain the solution. Numerical results for displacements of saturated layered systems were presented. The results were compared with those of the dry layered site. It was shown that the incident angle, the incident frequency and the parameters of  $b$  had great influence on displacements of saturated layered systems. The results of saturated sites were quite different from those of the dry layered site. The rationality and necessity of using the layered model were discussed.

**Key words:** saturated layered half-space; canyon of arbitrary shape; P wave; scattering

## 0 引言

局部不规则地形对地震波传播的影响, 一直是工程地震中颇为引人注目的研究课题之一。问题的求解可采用数值法和解析法。解析法仅适用于均匀场地中一些非常简单的地形, 而数值方法则可用于复杂场地中任意地形。Trifunac M D<sup>[1]</sup>最早给出了均匀半空间中半圆凹陷地形对 SH 波的散射, 促进了解析法的发展。Lee V W 等<sup>[2]</sup>和 Cao H 等<sup>[3]</sup>采用大圆弧假定和波函数展开法, 研究了圆弧凹陷地形对 SV 波、P 波的散射。一般场地多用数值法求解, 如有限差分法<sup>[4]</sup>、有限单元法<sup>[5]</sup>、边界元法<sup>[6-8]</sup>等。Wolf J P<sup>[7]</sup>建立了弹性土层和

半空间的动力刚度矩阵, 形成了解决层状场地中波的传播及土-结构相互作用等问题较完整的理论, 并且利用间接边界元法计算了层状场地中任意凹陷地形对入射弹性波的散射<sup>[8]</sup>。然而, 实际的地表覆盖土层常常是饱和的, 尤其在沿海地区, 而上述理论还不能完全揭示波在饱和土层中的传播规律。

Biot M A<sup>[9]</sup>建立了饱和孔隙介质的动力方程, 为研究饱和孔隙介质的波动问题奠定了理论基础。与均

基金项目: 教育部新世纪人才支撑计划 (NCET-05-0248)

收稿日期: 2007-07-11

质弹性介质相比, 两相饱和和多孔介质中的波动问题要更复杂, 局部不规则饱和地形对地震波的散射结果并不多。李伟华等<sup>[10-11]</sup>和梁建文等<sup>[12]</sup>等给出了圆弧形凹陷饱和土地地对 P、SV 波散射的解析解。近来, Senjuntichai T 等<sup>[13]</sup>、Rajapakse R K N D 等<sup>[14]</sup>、Pan E 等<sup>[15]</sup>、梁建文等<sup>[16-17]</sup>、尤红兵<sup>[18-19]</sup>等采用数值法, 研究了饱和层状场地中的土层动力刚度矩阵和动力 Green 函数, 为研究饱和层状场地中任意凹陷地形对入射弹性波的散射奠定了基础。

本文采用 Biot 基本模型<sup>[9]</sup>, 利用饱和土层动力刚度矩阵和饱和场地中斜线单元上均布荷载和孔压的动力 Green 函数, 采用间接边界元法在频域内求解了层状饱和场地中圆弧凹陷地形对入射 P 波的散射问题。通过算例, 研究入射角度、入射频率、参数  $b$  等对地表位移的影响, 并与相应干土结果进行对比。

### 1 计算方法

对于含任意凹陷地形的层状场地 (图 1), 可采用间接边界元法计算地震波的散射运动。首先, 进行在入射 P 波作用下自由场 (无凹陷地形存在) 反应分析, 求得假想边界  $S$  上各点的位移和各单元的应力响应; 然后计算格林影响函数, 即在凹陷地形边界  $S$  的各个单元上分别施加虚拟分布荷载和孔压时自由场的位移和应力响应; 根据边界  $S$  上各单元的加权平均应力和孔压或流体法向位移为零 (边界条件) 来确定虚拟分布荷载; 最后, 将入射 P 波自由场位移响应和虚拟分布荷载产生的响应叠加起来, 即得到问题的解答。

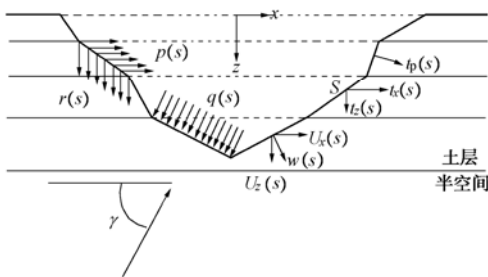


图 1 场地及单元划分

Fig. 1 Site and discretization of the canyon surface

#### 1.1 Biot 方程

Biot 饱和孔隙介质的动力方程<sup>[12]</sup>为

$$\mu \nabla^2 U + (\lambda_c + \mu) \text{grad}(\text{div} U) + \alpha M \text{grad}(\text{div} w) = \rho \ddot{U} + \rho_f \ddot{w}, \quad (1)$$

$$\alpha M \text{grad}(\text{div} U) + M \text{grad}(\text{div} w) = \rho_f \ddot{U} + m \ddot{w} + b \dot{w}. \quad (2)$$

式中  $U$  和  $w$  分别表示土骨架的位移矢量和水相对于土骨架的位移;  $\rho$  为饱和土的总密度,

$\rho = (1-n)\rho_s + n\rho_f$ ,  $\rho_s$  和  $\rho_f$  表示土和水的质量密度,  $n$  为孔隙率;  $\mu$  和  $\lambda$  为土骨架的两个 Lamb 常数,  $\lambda_c = \lambda + \alpha^2 M$ ;  $\alpha$  和  $M$  为表征土颗粒和孔隙流体压缩性的常数; 参数  $m = \rho_f/n$ ;  $b$  为流体黏滞系数与土渗透系数的比值, 反映黏性耦合的系数, 若忽略流体的黏滞性, 则  $b = 0$ 。

#### 1.2 自由场计算

自由场的反应可由直接刚度法求得。对于入射 P 波, 集整土层和半空间的精确动力刚度矩阵  $[S_{p_1-p_2-sv}^L]$ ,  $[S_{p_1-p_2-sv}^R]$  (详见文献[16], [19]), 可得整体动力刚度矩阵  $[S_{p_1-p_2-sv}]$ , 则场地运动的动力平衡方程为

$$[S_{p_1-p_2-sv}] \begin{bmatrix} iU_{x1} \\ U_{z1} \\ w_{z1} \\ \vdots \\ iU_{xn+1} \\ U_{zn+1} \\ w_{zn+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ iR_{x0} \\ R_{z0} \\ p_{z0} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中,  $R_{x0}$ ,  $R_{z0}$  和  $p_{z0}$  是底部荷载向量幅值分量。整个场地的运动由式 (3) 得出, 进而求得沿线  $S$  上各点自由场的位移  $[U_{xf}(s) \ U_{zf}(s) \ w_f(s)]^T$  和各单元应力  $[t_{xf}(s) \ t_{zf}(s) \ t_{pf}(s)]^T$ 。其中,  $U_{xf}(s)$  和  $U_{zf}(s)$  分别为沿线  $S$  各点土骨架水平和竖向位移,  $w_f(s)$  为流体相对于土骨架的法向位移,  $t_{xf}(s)$  和  $t_{zf}(s)$  为各点水平和竖向的应力,  $t_{pf}(s)$  为孔压。

#### 1.3 格林影响函数的计算

格林影响函数是在自由场 (无凹陷地形) 内部某点作用一单位荷载时, 自由场任意一点的响应。在层状饱和场地中, 作用在斜线上的分布荷载如图 2 示, 设土骨架和流体的位移幅值分别为  $U_x$ ,  $U_z$  和  $W_x$ ,  $W_z$ , 方向在  $x-z$  平面内, 线性分布荷载幅值为  $p(x, z)$  和  $r(x, z)$ , 节点值分别为  $p_1$ ,  $p_2$  和  $r_1$ ,  $r_2$ 。由于荷载只作用在部分土层上, 在节点处引入附加界面。首先, 假定作用荷载的土层固定在两个交界面上。计算满足这样条件的相应反力 (外力)  $R_{x1}$ ,  $R_{z1}$ ,  $p_{z1}$  (顶面沿  $x$ ,  $z$  方向的应力和孔压) 和  $R_{x2}$ ,  $R_{z2}$ ,  $p_{z2}$  (底面沿  $x$ ,  $z$  方向的应力和孔压), 这个分析仅在作用荷载的土层上进行。然后, 将反力以相反的方向作用到总体系上。总反应是上述两个结果的叠加。总体系对作用在交界面上的荷载的反应, 可根据直接刚度法计算。具体计算时, 图 2 中的线性分布荷载幅值可采用图 1 的均布荷载幅值。研究表明, 这种简化可以在精度损失很小的情况下而大大降低计算量。详细计算公式可见文献[17~19]。

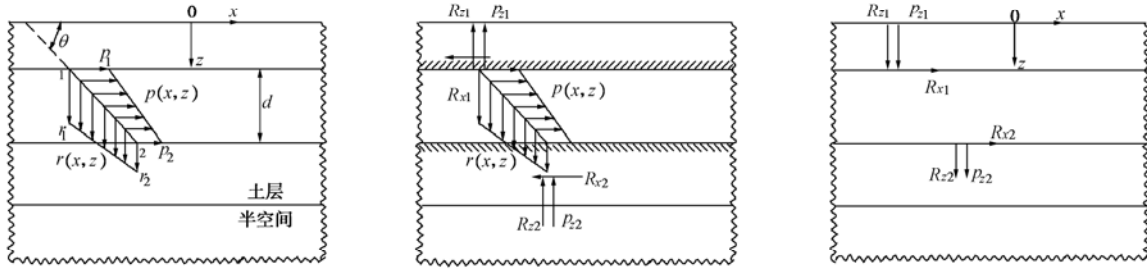


图2 作用在斜线上的分布荷载

Fig. 2 Distributed load acting on an inclined line in soil layers

这些计算是在波数  $k$  域内进行, 需进行逆变换, 可得空间域上的格林影响函数

$$[F(x)] = \int_{-\infty}^{\infty} [F(k)] \exp(-ikx) dk \quad (4)$$

式中,  $F$  代表位移  $U_x, U_z, w$  (沿线  $S$  流体相对于土骨架的法向位移) 和应力  $t_x, t_z$  及孔压  $t_p$ 。最后沿线  $S$  上的位移和应力可表示为

$$\begin{bmatrix} U_{xg}(s) \\ U_{zg}(s) \end{bmatrix} = [g_u(s)] \begin{bmatrix} p \\ r \\ q \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} t_{xg}(s) \\ t_{zg}(s) \\ t_{pg}(s) \end{bmatrix} = [g_t(s)] \begin{bmatrix} p \\ r \\ q \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} U_{xg}(s) \\ U_{zg}(s) \end{bmatrix} = [g_{uu}(s)] \begin{bmatrix} p \\ r \\ q \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} t_{xg}(s) \\ t_{zg}(s) \\ w_g(s) \end{bmatrix} = [g_{tu}(s)] \begin{bmatrix} p \\ r \\ q \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中,  $[g_u(s)], [g_t(s)]$  (边界透水) 和  $[g_{uu}(s)], [g_{tu}(s)]$  (边界不透水) 为所求的格林影响函数。

### 1.4 边界条件

当凹陷地形边界透水时, 边界条件可表示为

$$\int_S [\mathbf{W}(s)]^T \left( \begin{bmatrix} t_{xg}(s) \\ t_{zg}(s) \\ t_{pg}(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_{xf}(s) \\ t_{zf}(s) \\ t_{pf}(s) \end{bmatrix} \right) ds = 0 \quad (9)$$

式中,  $[\mathbf{W}(s)]$  为权函数, 可取为单位矩阵, 使积分在每个单元上能独立进行。将式 (6) 代入式 (9) 得

$$[T_p] \begin{bmatrix} p \\ r \\ q \end{bmatrix} = \{T_f\} \quad (10)$$

其中,

$$[T_p] = \int_S [\mathbf{W}(s)]^T [g_t(s)] ds \quad (11)$$

$$[T_f] = - \int_S [\mathbf{W}(s)]^T \begin{bmatrix} t_{xf}(s) \\ t_{zf}(s) \\ t_{pf}(s) \end{bmatrix} ds \quad (12)$$

求解式 (10), 结合式 (5) 最后可得总位移

$$\begin{bmatrix} U_x(s) \\ U_z(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{xf}(s) \\ U_{zf}(s) \end{bmatrix} + [g_u(s)] [T_p]^{-1} [T_f] \quad (13)$$

当凹陷地形边界不透水时, 凹陷边界流体相对于土骨架的法向位移为零, 边界条件可表示为

$$\int_S [\mathbf{W}(s)]^T \left( \begin{bmatrix} t_{xg}(s) \\ t_{zg}(s) \\ w_g(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_{xf}(s) \\ t_{zf}(s) \\ w_f(s) \end{bmatrix} \right) ds = 0 \quad (14)$$

将式 (8) 代入式 (14) 得

$$[T_p] \begin{bmatrix} p \\ r \\ q \end{bmatrix} = [T_f] \quad (15)$$

其中

$$[T_p] = \int_S [\mathbf{W}(s)]^T [g_{tu}(s)] ds \quad (16)$$

$$[T_f] = - \int_S [\mathbf{W}(s)]^T \begin{bmatrix} t_{xf}(s) \\ t_{zf}(s) \\ w_f(s) \end{bmatrix} ds \quad (17)$$

求解式 (15) 并结合式 (7) 可得总位移

$$\begin{bmatrix} U_x(s) \\ U_z(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{xf}(s) \\ U_{zf}(s) \end{bmatrix} + [g_{tu}(s)] [T_p]^{-1} [T_f] \quad (18)$$

## 2 方法验证

如果不含孔隙流体时 (即  $\rho_f = 0$ ), 本文结果可退化为理想弹性土 (干土) 结果。利用文献 [8] 中凹陷地形算例来验证干土地地的计算结果。场地如图 3 所示。图中,  $L_1 = 0.25L, L_2 = 0.5L$ 。饱和土 1 和土 2 参数相同, 总厚度  $H = H_1 + H_2 = L_1 \tan 30^\circ$ , 土层和半空间剪切波速比  $c_{s1}/c_{sR} = 0.5$ , 密度比  $\rho_1/\rho_R = 1.0$ , 泊松比  $\nu_1 = \nu_R = 1/3$ , 土层和半空间的阻尼比  $\xi_1 = 0.05, \xi_R = 0.02$ ,  $\gamma$  为入射角, 入射波长  $\lambda_{s1}/L = 0.25$ , 入射波幅值  $|A_p| = 0.5$ 。

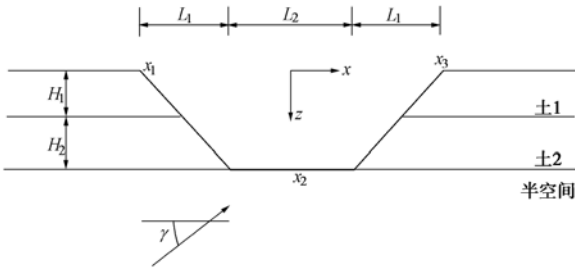


图 3 凹陷地形断面示意图

Fig. 3 Schematic section of the canyon

图4为本文结果与Vogt R F相应结果比较。图中  $|W|$ ,  $|U|$  分别表示地表竖向、水平位移幅值。从图可知本文结果与文献结果一致。

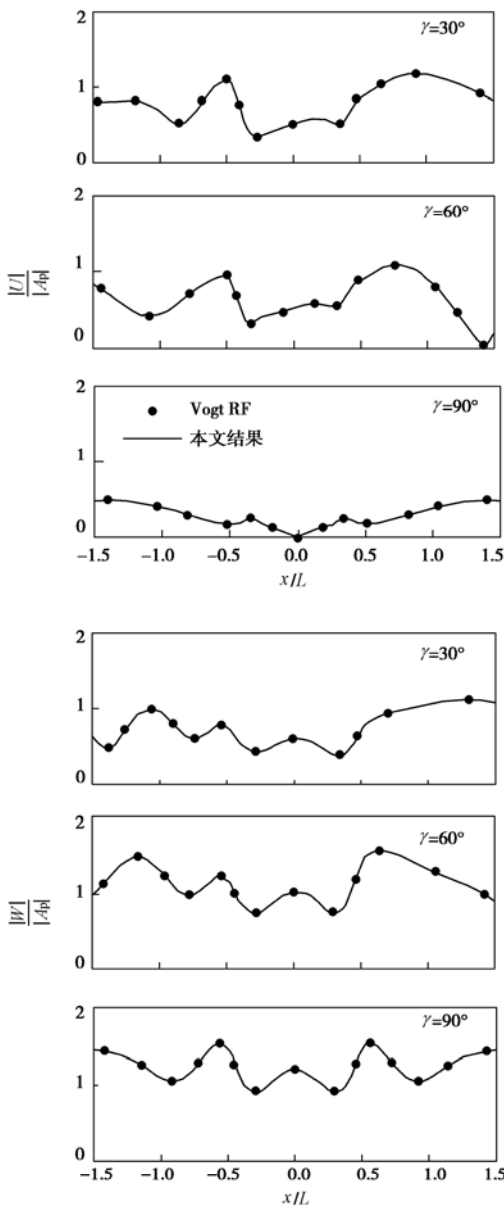


图 4 与 Vogt R F 结果比较

Fig. 4 Results compared with those of Vogt R F

### 3 算例分析

场地条件如图3所示, 凹陷地形断面参数取为:  $L_1 = 0.25L$ ,  $L_2 = 0.5L$ ,  $L = 2L_1 + L_2$ ; 土层厚  $H = 0.5L_1$ 。饱和土参数如表1所示, 参数  $b$  如表2所示, 并分三种情况进行分析。土层的阻尼比均取0.05、而半空间的阻尼比取0.02; 定义无量纲频率为:  $\eta = L/\lambda_{s1} = \omega L \sqrt{\rho_s/\mu}/(2\pi)$ ,  $\omega$  为入射波圆频率,  $\mu$ ,  $\rho_s$  分别为地表饱和土(土1)的剪切模量和密度。假定界面透水。 $\gamma$  为入射角,  $|A_{sv}|$  为入射波幅值,  $|U_x|$  为地表水平位移幅值,  $|U_z|$  为地表竖向位移幅值。算例中干土地地参数取相应饱和土的固相参数。

表 1 场地计算参数

Table 2 Parameters of the site

	$\mu^*$	$\lambda^*$	$M^*$	$\rho_s^{**}$	$n$	$\alpha$	$\rho_r^{**}$
土 1	2.5	5.0	25	2.0	0.33	0.95	1.0
土 2	1.25	2.5	18.8	1.8	0.25	0.98	1.0
半空间	10.0	10.0	20	2.4	0.21	0.90	1.0

注:  $^*(10^8 \text{ N/m}^2)$ ,  $^{**}(10^3 \text{ kg/m}^3)$ 。

表 2 参数  $b$

Table 2 Parameter  $b$  单位:  $(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-4})$

饱和场地	土 1	土 2	半空间
A	0	0	0
B	$0.2 \times 10^6$	$0.1 \times 10^6$	$0.4 \times 10^6$
C	$1.5 \times 10^6$	$1.0 \times 10^6$	$4.5 \times 10^6$

图 5, 6 分别为三种不同饱和凹陷层状场地 (A, B, C) 的地表位移幅值, 并与相应干土地地结果进行了比较。这三种饱和场地的差别在于参数  $b$  的变化,  $b$  可示为流体黏滞系数与土渗透系数的比值。A 中忽略了流体的黏滞性, 则  $b = 0$ 。而在一般情况下, 可假定流体的黏滞系数相同, 则参数  $b$  与土的渗透系数成反比。当  $b$  越大, 土的渗透系数越小。参数  $b$  影响土层中的波速, 进而对饱和场地的动力响应有较大影响<sup>[14]</sup>。

为方便比较, 图 7 给出了自由场 (无凹陷地形) 地表位移幅值随入射频率的变化曲线, 图 8 给出了自由场 (以 C 和干土地地为例) 地表位移幅值随入射角的变化曲线。

从图 5, 6 中可以看出: 由于凹陷地形的存在, 使得地表位移幅值的空间分布的复杂程度随着无量纲频率  $\eta$  的增大而加大, 这反映了入射频率的影响。当入射频率较低时, 地表最大位移幅值多出现在入射波的同侧 ( $x/L \leq -0.5$ ); 当入射频率较高时, 入射波波长小于沟底宽度, 地形对波的散射影响更明显, 地表最大位移幅值则多出现在入射波的异侧 ( $x/L \geq 0.5$ )。在三种饱和场地中, A 忽略了流体的黏滞性 ( $b = 0$ ), 波传播中能量消耗减少, 波速较高, 地表位移幅值最

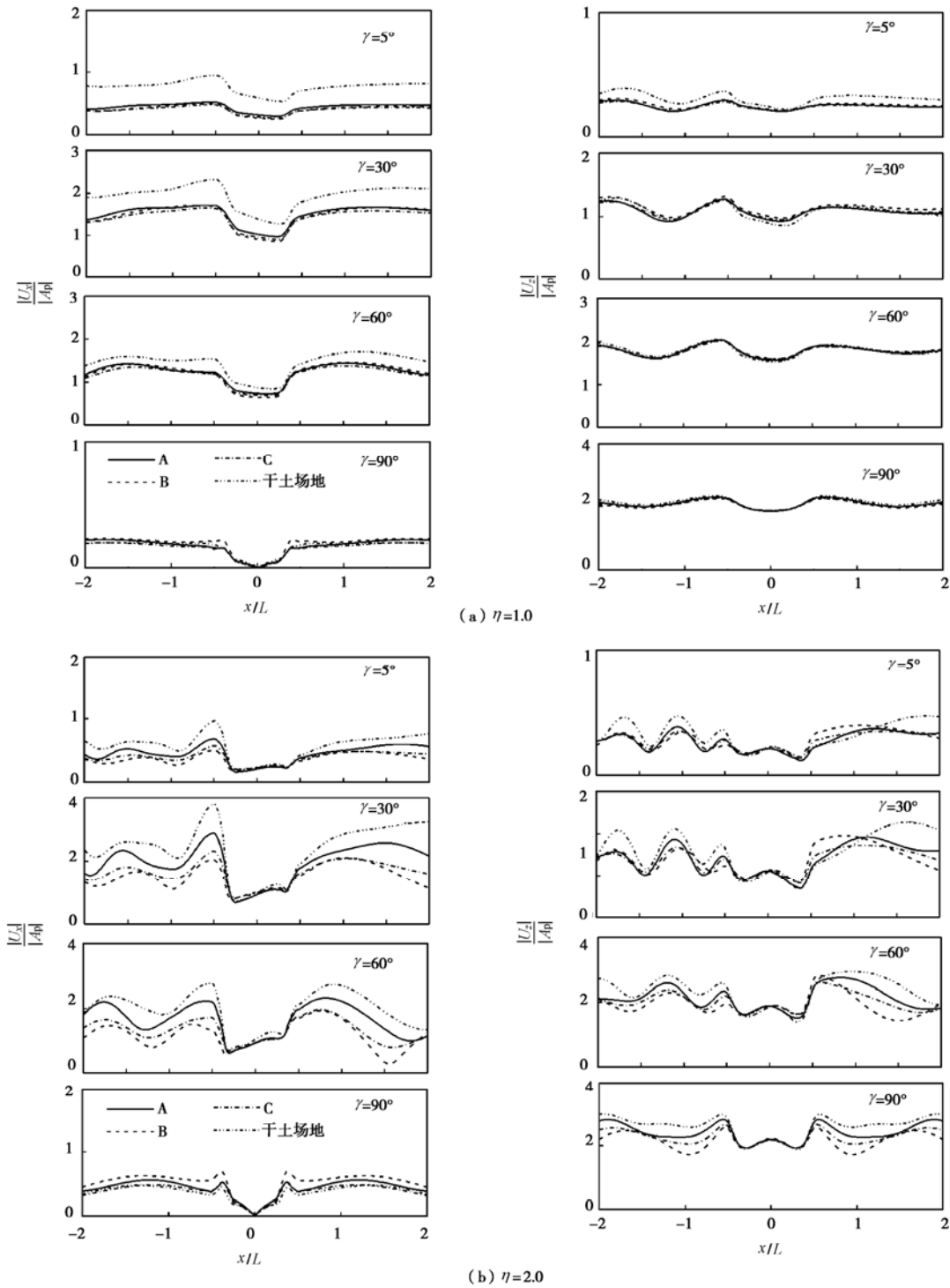


图5 含凹陷地形层状场地地表位移幅值

Fig. 5 Amplitudes of surface displacement of the canyon in layered site

大, C 的渗透性最差, 波速较低, 地表位移幅值最小。如当  $\eta = 2.0$ ,  $\gamma = 60^\circ$  时, 在  $x/L = -0.5$ , 即图 3 中  $x_1$  点处, 三场地地表水平位移幅值分别为: 2.214 (A), 1.721 (B), 1.332 (C)。对于地表水平位移, 干土地地结果均大于相应饱和场地结果。而对于地表竖向位移幅值, 当  $\eta \leq 2.0$  时, 干土地地与饱和场地结果差异较小; 但随入射频率的增大, 干土地地地表竖向位移幅值均大于相应饱和场地结果。图 5, 6 中地表位移是

自由场场地(无凹陷地形)对入射波的放大作用和凹陷地形对波散射两者的叠加, 因此与自由场反应密切相关。从图 7 自由场反应结果中, 也可看出干土地地与饱和场地的明显差别。

从图 7 中可看出: 地表位移幅值随入射频率的变化出现明显的波动, 当入射频率接近场地的基频时, 位移被明显放大。如当  $\gamma = 30^\circ$  时, 地表最大水平位移幅值分别为: 2.524 ( $\eta = 1.824$ , 干土地地), 2.074

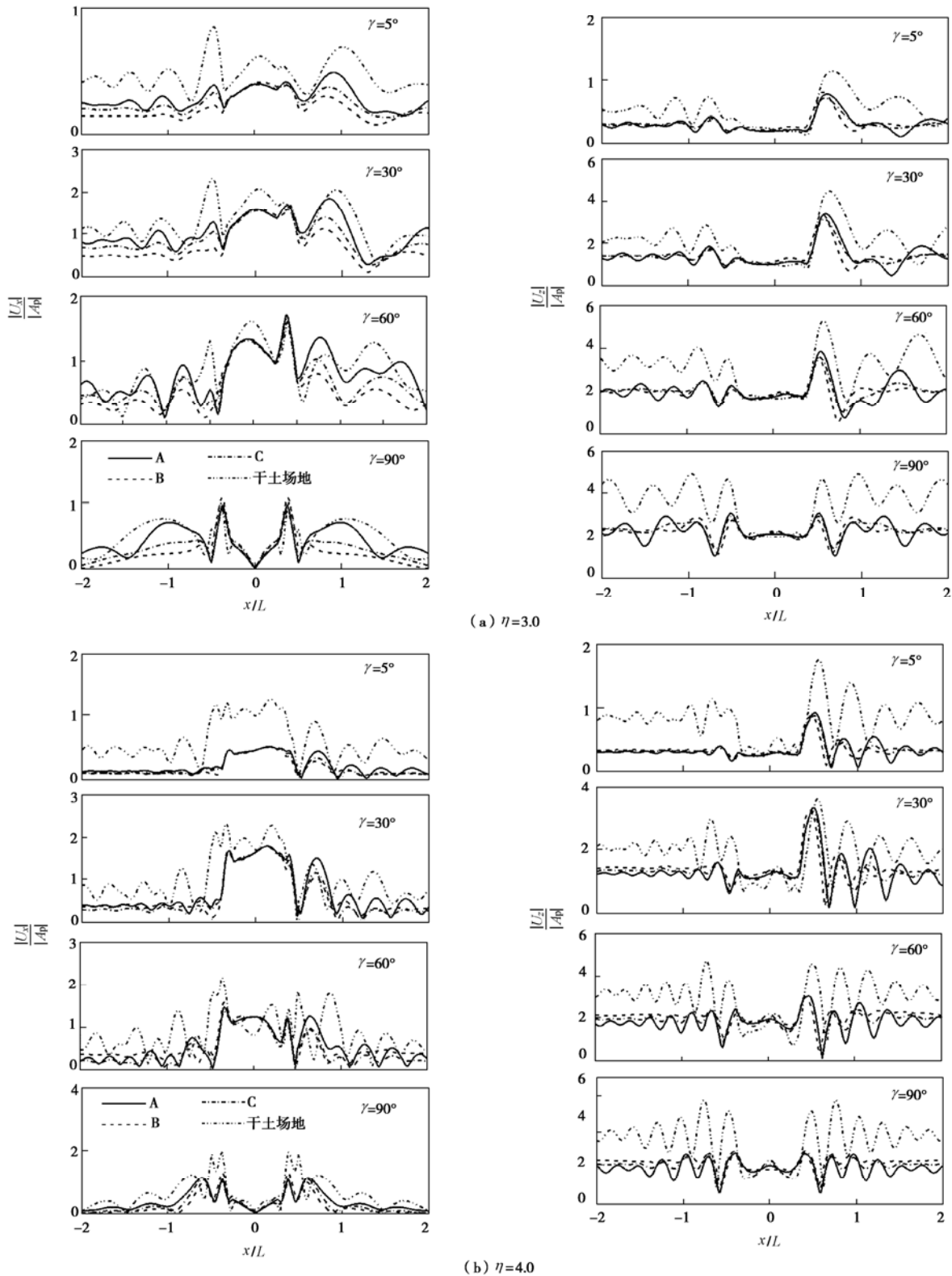


图 6 含凹陷地形层状场地地表位移幅值

Fig. 6 Amplitudes of surface displacement of the canyon in layered site

( $\eta = 1.792$ , A), 1.769 ( $\eta = 1.664$ , B), 1.772 ( $\eta = 1.521$ , C)。可见, 干土场地位移和基频最大, A 结果次之, C 的结果最小。当  $\eta = 3.0$ ,  $\gamma = 60^\circ$  时, 含凹陷地形的地表最大竖向位移幅值和相应自由场地表竖向位移幅值分别为: 5.31, 3.386 (干土场地);

3.89, 1.99 (A): 3.615, 2.082 (B): 3.609, 2.037 (C)。凹陷地形对自由场的放大倍数基本相同, 分别为: 1.57, 1.95, 1.74, 1.77。说明不同场地结果的差异主要是由自由场反应不同引起的。

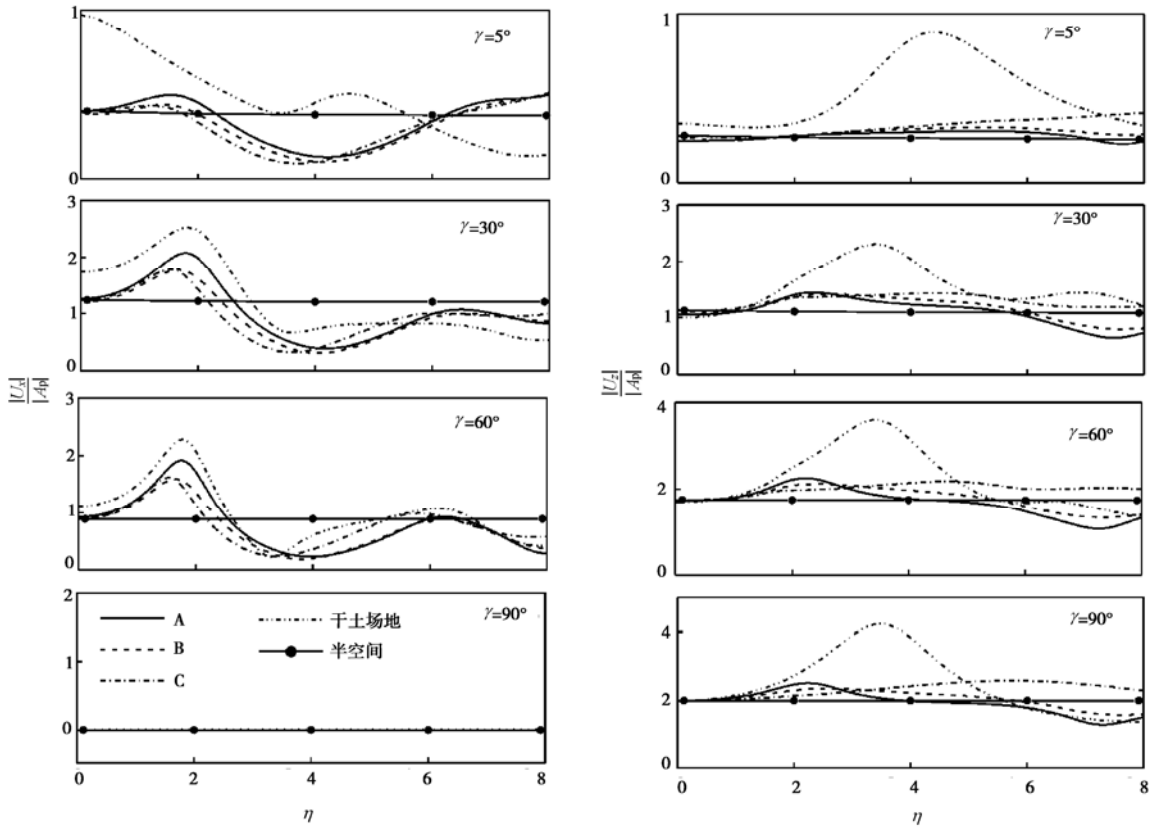


图7 自由场地表位移幅值随入射频率的变化

Fig. 7 Amplitudes of surface displacement of the free-field response versus dimensionless incident frequency

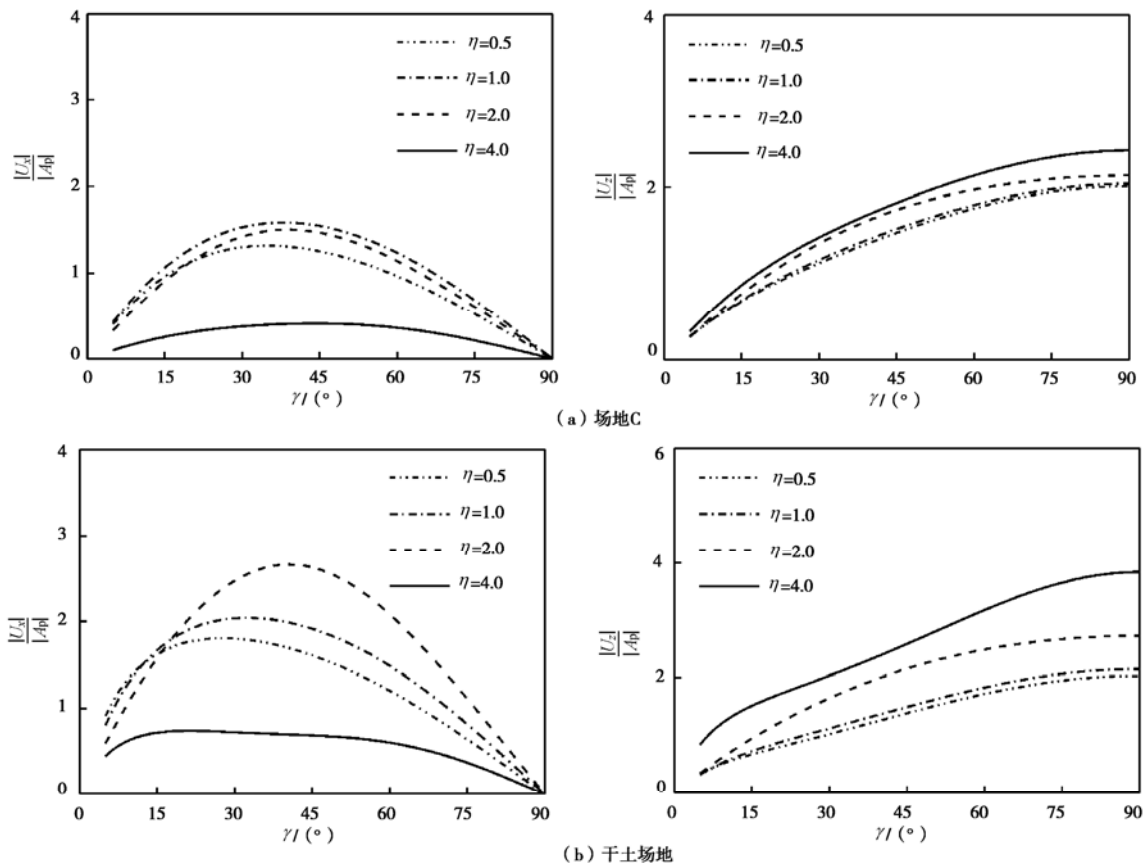


图8 自由场地表位移幅值随入射角的变化

Fig. 8 Amplitudes of surface displacement of the free-field response versus the incident angles

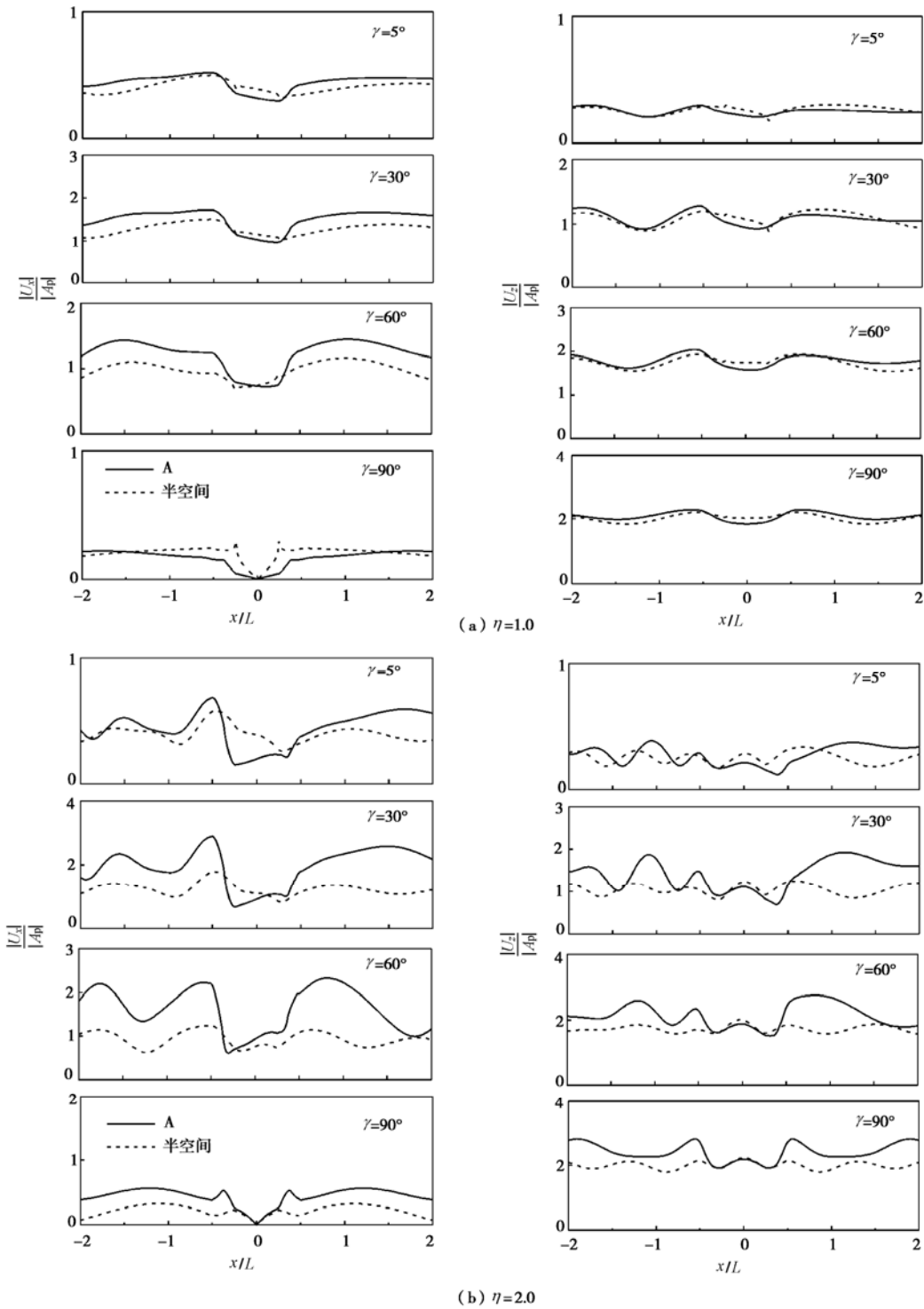


图 9 含凹陷地形层状场地与饱和均匀半空间场地地表位移幅值

Fig. 9 Amplitudes of surface displacement of the canyon in layered site and in homogeneous half-space

从图 8 中可看出: 在给定入射频率下, 入射角度对场地地表位移有重要影响。入射角在  $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$  内, 水平位移幅值出现最大值。如当  $\eta = 2.0$  时, 最大水平位移幅值为: 2.66 ( $\gamma = 40.4^{\circ}$ , 干土地地); 1.51 ( $\gamma = 38.83^{\circ}$ , C)。垂直入射 ( $\gamma = 90^{\circ}$ ) 时, 竖向位移幅值取得最大值。如当  $\eta = 4.0$  时, 最大竖向位移

幅值分别为: 3.84 (干土地地); 2.43 (C)。

图 9, 10 给出了凹陷地形分别在层状饱和场地(A)和饱和均匀半空间(土 1、土 2 取半空间参数)中地表位移幅值的变化曲线。为方便比较, 图 7 中还给出了饱和均匀半空间自由场(无凹陷地形)地表位移幅值, 并以半空间表示。



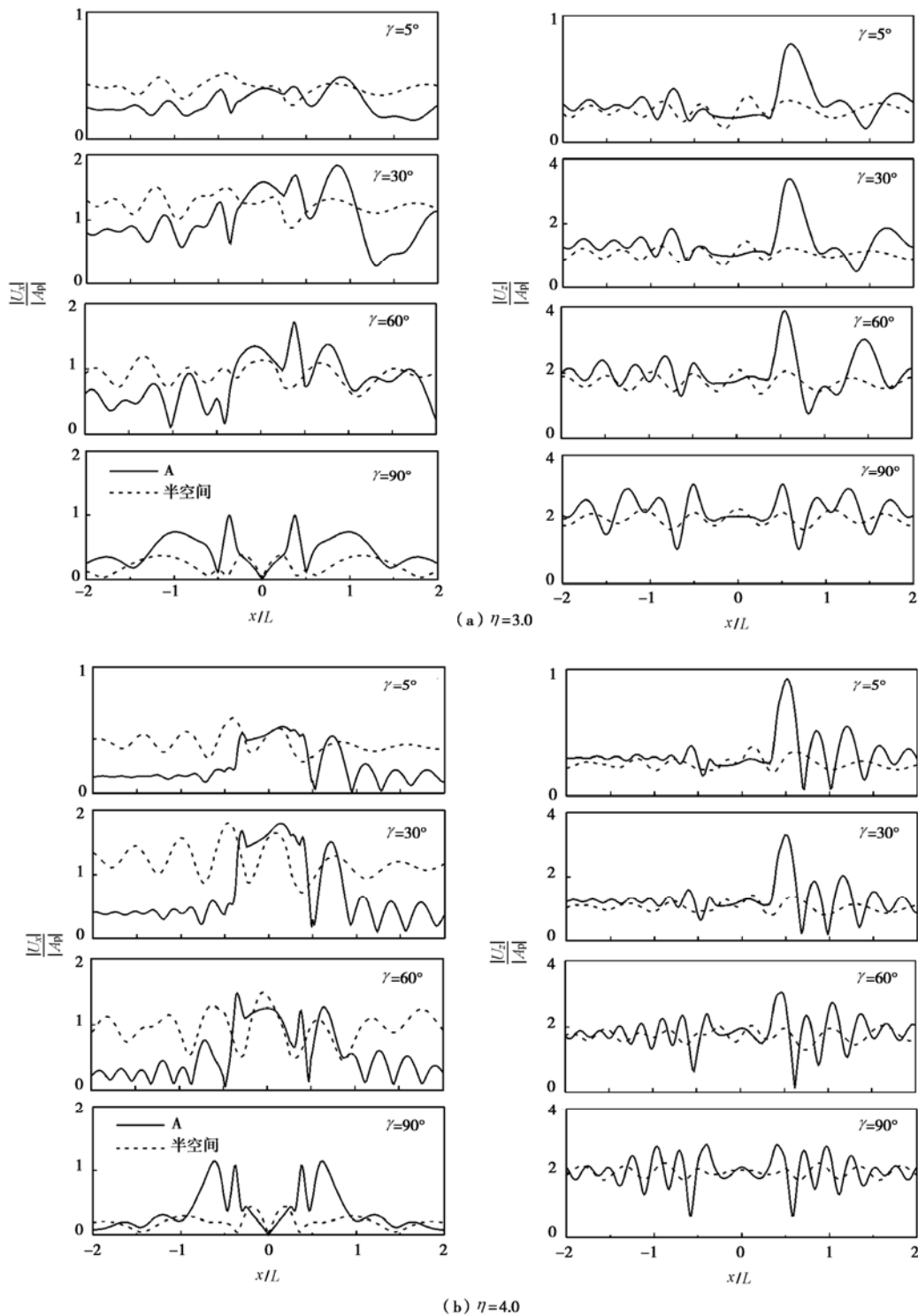


图 10 含凹陷地形层状场地与饱和均匀半空间场地地表位移幅值

Fig. 10 Amplitudes of surface displacement of the canyon in layered site and in homogeneous half-space

从图中可看出：在层状场地中，当入射频率接近土层固有频率时，地表位移幅值被明显放大，说明了入射频率和入射角度对层状场地的地表位移幅值影响显著，而对均匀场地的影响很小。例如，当 $\eta=2.0$ ， $\gamma=30^\circ$ 时（图9）， $x_1$ 点的地表水平位移幅值分别为：2.89（A），1.78（半空间）；相应自由场地表水平位移幅值分别为：1.98（A），1.26（半空间）。层状场地

结果明显大于均匀场地相应结果。对于竖向位移，当 $\eta=3.0$ ， $\gamma=60^\circ$ 时（图10）， $x_3$ （ $x/L=0.5$ ）点的地表竖向位移幅值分别为：3.639（A），1.999（半空间）；相应自由场地表水平位移幅值分别为：1.996（A），1.721（半空间）。这也说明了层状模型的合理性，以及利用层状模型分析的必要性。

## 4 结 论

采用 Biot 理论的基本模型, 利用间接边界元方法在频域内求解了层状饱和场地中任意凹陷地形对入射 P 波的散射问题。结果可退化为干土结果并进行了对比。通过算例, 研究了入射角度、入射频率、参数  $b$  等对地表位移的影响, 并与相应干土结果进行了对比。研究表明:

(1) 入射角度和入射频率对饱和场地和干土地表的地表位移均有重要影响。入射频率接近土层固有频率时, 地表位移幅值被明显放大。

(2) 饱和场地结果与相应干土地表结果明显不同, 应合理考虑孔隙流体的影响。

(3) 参数  $b$  (土的渗透性) 对饱和场地的动力响应影响较大,  $b$  越大, 土的渗透性越差, 则地表位移幅值也越小。

(4) 入射频率和入射角度对层状场地的地表位移幅值影响显著, 而对均匀场地的影响很小。说明了层状模型的合理性, 以及利用层状模型分析的必要性。

利用本文方法还可计算饱和层状场地中任意凹陷地形对入射平面 SV 波的散射, 将另文讨论。

### 参考文献:

- [1] TRIFUNAC M D. Scattering of plane SH waves by a semi-cylindrical canyon[J]. Earthquake Eng Struct Dynam, 1973, **1**: 267 - 281.
- [2] LEE V W, CAO H. Diffraction of SV waves by circular canyons of various depths[J]. J Eng Mech ASCE 1989, **115**(9): 2035 - 2056.
- [3] CAO H, LEE V W. Scattering and diffraction of plane P waves by circular-cylindrical canyons with variable depth-to-width ratio[J]. Soil Dynam Earthquake Eng, 1990, **9**: 141 - 50.
- [4] BOORE D M. A note on the effect of simple topography on seismic SH waves[J]. Bull Seismol Soc Am, 1972, **62**: 275 - 284.
- [5] SMITH W D. The application of finite element analysis to body wave propagation problem[J]. Geophys J Rea Astr Sov 1975, **42**: 747 - 768.
- [6] WONG H L. Effect of surface topography on the diffraction of P, SV, and Rayleigh waves[J]. Bull Seismol Soc Am, 1982, **72**(4): 1167 - 1183.
- [7] WOLF J P. Dynamic soil-structure interaction[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1985.
- [8] VOGT R F, WOLF J P, BACHMANN H. Wave scattering by a canyon of arbitrary shape in a layered half space[J]. Earthquake Eng Struct Dynam, 1988, **16**: 803 - 812.
- [9] BIOT M A. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media[J]. J Appl Phys, 1962, **33**: 1482 - 1498.
- [10] 李伟华, 赵成刚. 圆弧形凹陷饱和土地表对平面 P 波散射问题的解析解[J]. 地球物理学报, 2003, **46**(4):539 - 546. (LI Wei-hua, ZHAO Cheng-gang. An analytical solution for the diffraction of plane P-waves by circular cylindrical canyons in a fluid-saturated porous media half space[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, **46**(4): 539 - 546. (in Chinese))
- [11] LI Wei-hua, ZHAO Cheng-gang. Scattering of plane SV waves by cylindrical canyons in saturated porous medium[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, **25**: 981 - 995.
- [12] LIANG Jian-wen, BA Zhen-ning, LEE Vincent W. Diffraction of plane SV waves by a shallow circular-arc canyon in a saturated poroelastic half-space[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, **26**: 582 - 610
- [13] SENJUNTICHAJ T, RAJAPAKSE R K N D. Dynamic Green's functions of homogeneous poroelastic half plane[J]. J Eng Mech, ASCE 1994, **120**(11): 2381 - 2404.
- [14] RAJAPAKSE R K N D, SENJUNTICHAJ T. Dynamic response of a multi-layered poroelastic medium[J]. Earthq Eng Struct Dynamics, 1995, **24**: 703 - 722
- [15] PAN E. Green's functions in layered poroelastic half-space[J]. Int J Num Anal Meth Geomech, 1999, **23**: 1631 - 1653.
- [16] LIANG Jian-wen, YOU Hong-bing. Dynamic stiffness matrix of a poroelastic mutli-layered site and its Green's functions[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, **3**(2): 273 - 282.
- [17] LIANG Jian-wen, YOU Hong-bing. Green's functions for uniformly distributed loads acting on an inclined line in a poroelastic layered site[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, **4**(2): 233 - 241.
- [18] 尤红兵, 梁建文. 层状饱和场地中线性分布斜线荷载的动力 Green 函数[J]. 振动工程学报, 2005(3): 335 - 341. (YOU Hong-bing, LIANG Jian-wen. Green's functions for linearly distributed loads acting on inclined line in poroelastic layered site[J]. Journal of Vibration Engineering , 2005(3): 335 - 341. (in Chinese))
- [19] 尤红兵, 层状饱和半空间中凹陷地形或隧洞对弹性波的散射[D]. 天津: 天津大学, 2005. (YOU Hong-bing. Elastic wave scattering by a canyon or tunnel in layered saturated half-space[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese))