

文章编号: 1000-7598 (2011) 01-0244-09

局部断层场地对 P 波的散射影响研究

梁建文, 冯领香, 巴振宁

(天津大学 土木工程系, 天津 300072)

摘 要: 采用间接边界元法, 借助 Wolf 的土层和半空间精确动力刚度矩阵和斜线荷载格林函数, 在频域内求解了局部断层场地对 P 波的散射, 着重分析了破碎带较窄断层两侧围岩动力响应的基本规律, 以及场地动力特性对散射的影响。研究表明, 破碎带断层对入射 P 波有着显著的影响, 即使破碎带很窄, 也可对 P 波产生很大的放大作用; 层状场地动力特性对放大作用有显著的影响。

关 键 词: 局部断层场地; 破碎带; 平面 P 波; 散射; 间接边界元法; 动力刚度矩阵; 格林函数

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Diffraction of plane P waves around a local fault

LIANG Jian-wen, FENG Ling-xiang, BA Zhen-ning

(Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Diffraction of plane P waves around a local fault is presented in frequency domain using IBEM, in which, the dynamic stiffness matrix and Green's function for distributed loads acting on inclined line by Wolf are used. The paper discusses emphatically the dynamic response to the surrounding rock of the narrow fracture zone and the effect of the dynamic characteristics of layered site on the diffraction. It is shown that a local fault has great effect on wave diffraction. Even if the local fault is very narrow, significant amplification may appear. The dynamic characteristics of layered site also play an important role in the wave amplification.

Key words: local fault; fracture zone; plane P wave; diffraction; indirect boundary element method; dynamic stiffness matrix; Green's function

1 引 言

断层或岩石节理是岩土力学与工程领域研究的重要对象之一^[1-2]。非发震断层在工程中常被看作一种局部场地而影响地震波的传播。非发震断层附近的地震动估计具有工程意义。

断层对地震动影响的研究主要是震害调查^[3-4]和数值求解^[5-15], 而数值求解多采用有限元法^[5, 7-14]。1994 年, 石玉成和陈炳午^[5]曾提出存在一临界值, 破碎带宽深比小于该值时, 其影响可以忽略, 而当破碎带宽深比大于该值时, 断层及其附近震害明显加重。在此之后, 梁建文^[6]、温瑞智等^[7]、李山有等^[8]、杨笑梅等^[10]的研究中也就破碎带宽度对地震动的影响进行了讨论, 得出的结论均为破碎带宽度增大时, 对地面运动的影响增大。2005 年, 任春和

罗奇峰^[15]则提出了不同的观点, 认为破碎带对地震动有隔震作用, 若破碎带宽度增大, 则上盘地表地震动减小, 而且断层无破碎带比有破碎带影响大。

目前普遍认为, 破碎带较宽断层对地震动有较大影响, 而破碎带较窄断层对地震动的影响还存在着不少争议。由于破碎带相对周围围岩比较软, 破碎带内部地表位移幅值一般会高于断层两侧, 因而研究中多采用较宽的破碎带模型, 并且以破碎带内部的反应为主要研究对象。

然而, 狭窄破碎带断层对其两侧场地的地震动影响也是工程中十分关心的问题。文献[16]给出了局部断层场地对 SH 波的放大作用。对于 P 波和 SV 波, 因波在散射时发生波型转换, 问题比 SH 波要复杂。本文采用间接边界元法建立破碎带断层模型, 在频域内求解破碎带断层对 P 波的散射, 主要研究

收稿日期: 2009-05-06

基金项目: 教育部博士点基金项目(No. 200800560046)。

第一作者简介: 梁建文, 男, 1965 年生, 博士, 教授, 主要从事工程波动研究。E-mail: liang@tju.edu.cn

断层破碎带对两侧围岩动力响应的影响。另外，实际场地一般为层状，文中还研究了层状场地中破碎带断层对 P 波散射的影响。

2 模 型

图 1 所示为均匀半空间中含局部断层的场地模型。借鉴文献[17]的求解思路，求解局部断层对 P 波的散射。首先分别将破碎带和围岩两部分还原为完整的半空间，分别计算两个半空间在入射 P 波时的自由场反应；然后分别计算两个半空间的格林函数，即施加虚拟分布荷载时自由场的反应，再根据破碎带边界处应力和位移的连续条件，求出虚拟分布荷载；最后将自由场反应和虚拟荷载作用下的反应叠加，即可得到总的反应。

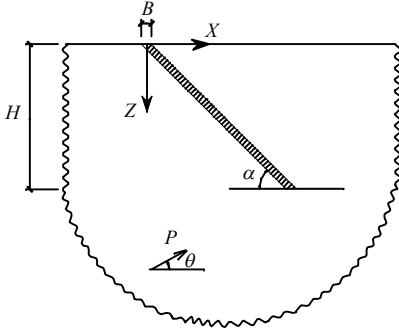


图 1 均匀半空间中局部断层模型 (P 波入射)
Fig.1 A local fault in homogeneous half-space
(incident P wave)

2.1 自由场反应

对于基岩上单一土层，在弹性波入射下，其平面内位移场可由下式确定^[18]：

$$u(z, x) = \{l_x [A_p \exp(iks z) + B_p \exp(-iks z)] - m_x t \cdot [A_{sv} \exp(ikt z) - B_{sv} \exp(-ikt z)]\} \exp(-ikx) \quad (1)$$

$$w(z, x) = \{-l_x s [A_p \exp(iks z) - B_p \exp(-iks z)] - m_x \cdot [A_{sv} \exp(ikt z) + B_{sv} \exp(-ikt z)]\} \exp(-ikx) \quad (2)$$

正应力和剪应力幅值为

$$\begin{aligned} \sigma_z(z) &= \lambda^* (u_{,z} + w_{,z}) + 2G^* w_{,z} = \\ &ikl_x (1 - t^2) G^* [A_p \exp(iks z) + B_p \exp(-iks z)] - \\ &i2km_x t G^* [A_{sv} \exp(ikt z) - B_{sv} \exp(-ikt z)] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \tau_{xz}(z) &= G^* (u_{,z} + w_{,z}) = \\ &i2kl_x s G^* [A_p \exp(iks z) - B_p \exp(-iks z)] - \\ &ikm_x (1 - t^2) G^* [A_{sv} \exp(ikt z) + B_{sv} \exp(-ikt z)] \end{aligned} \quad (4)$$

对于本文平面 P 波入射情况，上述式 (1)~(4) 中 $A_{sv} = 0$ 。

土层和基岩的动力刚度矩阵 S_{p-sv}^L 和 S_{p-sv}^R 满足如下方程^[18]：

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ iR_1 \\ P_2 \\ iR_2 \end{Bmatrix} = S_{p-sv}^L \begin{Bmatrix} u_1 \\ iw_1 \\ u_2 \\ iw_2 \end{Bmatrix} \text{ 和 } \begin{Bmatrix} P_o \\ iR_o \end{Bmatrix} = S_{p-sv}^R \begin{Bmatrix} u_o \\ iw_o \end{Bmatrix} \quad (5)$$

式 (1)~(4) 中： A_p 、 B_p 、 A_{sv} 、 B_{sv} 分别为 P 波和 SV 波的入射波和反射波幅值； k 为波数； G^* 为复剪切模量， $G^* = G(1 + 2\zeta i)$ (ζ 为介质阻尼比)； $t = -i\sqrt{1 - 1/m_x^2}$ ， $s = -i\sqrt{1 - 1/l_x^2}$ ， $m_x = \cos\theta_{sv}$ ， $l_x = \cos\theta_p$ ， θ_{sv} 和 θ_p 分别为 SV 波和 P 波入射角；土层顶面和底面的荷载值 Q_1 和 Q_2 按整体坐标系给出， $P_1 = -\tau_{xz}(0)$ ； $R_1 = -\sigma_z(0)$ ； $P_2 = \tau_{xz}(d)$ ； $R_2 = \sigma_z(d)$ ； d 为土层厚度； u_1 、 w_1 、 u_2 、 w_2 分别为土层顶面和底面的水平、竖向位移值；基岩表面荷载和位移分别为 P_o 、 R_o 和 u_o 、 w_o 。

组集各土层和基岩的动力刚度矩阵和荷载向量，可求得各层的位移，进而求得地表和线 S 上各点的位移 ($u_f(s)$ 和 $w_f(s)$) 以及和应力 ($\tau_{zf}(s)$ 和 $\sigma_{zf}(s)$)。

2.2 格林函数

格林函数是在半空间自由场(无局部断层存在)内部某点作用一单位荷载时，半空间自由场任意一点的响应。某土层上作用有 x - z 平面内的均布荷载 $p(s)$ 、 $r(s)$ ，为了求解格林函数，需要将均匀作用在土层上的均布荷载转化到土层表面，假定该土层固定在两个交界面上，计算满足这样条件的相应反力 P_1 、 R_1 、 P_2 和 R_2 。然后，将反力以相反的方向作用到总体系上。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^[18]。在具体计算中，可取分布荷载 $p(s)$ 、 $r(s)$ 为均布荷载。研究表明，该简化可以在精度损失很小的情况下大大降低计算量。

将荷载沿水平方向展开为关于 $\exp(-ikx)$ 的 Fourier 积分(k 为波数)：

$$\left. \begin{aligned} p(k, z) &= p \exp(ik \cot \alpha z) / (2\pi) \\ r(k, z) &= r \exp(ik \cot \alpha z) / (2\pi) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: α 为线 S 与水平方向的夹角, z 为距上层附加交界面的距离。

用 $u(k, z)$ 和 $w(k, z)$ 表示的简谐运动动力平衡方程为

$$\left. \begin{aligned} -(\lambda^* + 2G^*)k^2 u(k, z) + G^* u_{,zz}(k, z) - ik(\lambda^* + G^*)w_{,z}(k, z) &= -\rho \omega^2 u(k, z) - p(k, z) \\ -ik(\lambda^* + G^*)u_{,z}(k, z) - k^2 G^* w(k, z) + (\lambda^* + G^*)w_{,zz}(k, z) &= -\rho \omega^2 w(k, z) - r(k, z) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: λ^* 和 ρ 分别为拉梅常数和密度。方程(7)的特解为

$$\left. \begin{aligned} u^p(k, z) &= A_1 \exp(ikz \cot \alpha) / 2\pi A_0 \\ w^p(k, z) &= A_2 \exp(ikz \cot \alpha) / 2\pi A_0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: $A_0 = k^2 G^* [(A_3 - 1)^2 \cot^2 \alpha - (s^2 A_3 - \cot^2 \alpha)(t^2 - A_3 \cot^2 \alpha)]$, $A_1 = t^2 - A_3 \cot^2 \alpha$, $A_2 = (1 - A_3) \cot \alpha$, $A_3 = c_p^{*2} / c_s^{*2}$ 。

令式(8)中 $z = 0, d$ 即可求得土层顶面和底面的位移幅值 $u_1^p, w_1^p, u_2^p, w_2^p$ 。利用位移特解可求得土层顶部和底部的外荷载幅值(固定端面反力)分别为

$$P_1^p = kG^* (A_2 - A_1 \cot \alpha) / 2\pi A_0 \quad (9)$$

$$R_1^p = -ikG^* [A_3 A_2 \cot \alpha - A_1 (A_3 - 2)] / 2\pi A_0 \quad (10)$$

$$P_2^p = ikG^* (A_1 \cot \alpha - A_2) \exp(ikd \cot \alpha) / 2\pi A_0 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} R_2^p &= ikG^* [A_3 A_2 \cot \alpha - \\ &A_1 (A_3 - 2)] \exp(ikd \cot \alpha) / 2\pi A_0 \end{aligned} \quad (12)$$

为了使土层上下端面固定, 特解还必须加上与负的 u_1^p, w_1^p 和 u_2^p, w_2^p 相应的齐解(以 h 表明)。齐解对应的外荷载(固定端面反力)可利用 S_{p-sv}^L 确定:

$$\begin{bmatrix} P_1^h \\ iR_1^h \\ P_2^h \\ iR_2^h \end{bmatrix} = [S_{p-sv}^L] \begin{bmatrix} -u_1^p \\ -iw_1^p \\ -u_2^p \\ -iw_2^p \end{bmatrix} \quad (13)$$

于是, 作用到总体系上的总外荷载为

$$\begin{cases} P_i = -P_i^p - P_i^h \\ R_i = -R_i^p - R_i^h \end{cases} \quad (i = 1, 2) \quad (14)$$

利用直接刚度法可得各点的位移和应力。由于以上计算均在波数域内进行, 需要进行 Fourier 逆变换, 转换成空间域内的解:

$$[F(x)] = \int_{-\infty}^{+\infty} [F(k)] \exp(-ikx) dk \quad (15)$$

式中: $F(k)$ 为 $g_u(k), g_t(k)$; $F(x)$ 为 $g_u(x), g_t(x)$ 。其中, $g_u(x), g_t(x)$ 即为所求的位移和应力格林函数。

2.3 边界条件

问题的边界条件为在破碎带与半空间交界面 S 上, 位移和应力连续:

$$\int_S W(s)^T \left[\begin{bmatrix} u_f^L(s) \\ w_f^L(s) \end{bmatrix} + g_u^L(s) \begin{Bmatrix} p_1 \\ r_1 \end{Bmatrix} \right] ds = \int_S W(s)^T \left[\begin{bmatrix} u_f^F(s) \\ w_f^F(s) \end{bmatrix} + g_u^F(s) \begin{Bmatrix} p_2 \\ r_2 \end{Bmatrix} \right] ds \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \int_S W(s)^T \left[\begin{bmatrix} \tau_{xf}^L(s) \\ \sigma_{zf}^F(s) \end{bmatrix} + g_r^L(s) \begin{Bmatrix} p_1 \\ r_1 \end{Bmatrix} + \right. \\ \left. \begin{bmatrix} \tau_{xf}^F(s) \\ \sigma_{zf}^F(s) \end{bmatrix} + g_r^F(s) \begin{Bmatrix} p_2 \\ r_2 \end{Bmatrix} \right] ds = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

式中: $W(s)$ 为权函数, 可取为单位矩阵, 使积分在每个单元上都能独立进行; $g_u^L(s), g_u^F(s), g_r^L(s), g_r^F(s)$ 分别为半空间和破碎带的位移和应力格林函数; p_1, r_1, p_2, r_2 分别为计算半空间和破碎带格林函数矩阵所施加的虚拟分布荷载。

由式(16)、(17)可解出 p_1, r_1, p_2, r_2 。最后可求出破碎带内外的地表位移 $u(x)$ 和 $w(x)$:

$$\begin{bmatrix} u^L(x) \\ w^L(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_f^L(x) \\ w_f^L(x) \end{bmatrix} + [g_u^L(x)] \begin{bmatrix} p_1 \\ r_1 \end{bmatrix} \quad (\text{外}) \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} u^F(x) \\ w^F(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_f^F(x) \\ w_f^F(x) \end{bmatrix} + [g_u^F(x)] \begin{bmatrix} p_2 \\ r_2 \end{bmatrix} \quad (\text{内}) \quad (19)$$

3 算例分析

3.1 均匀半空间中局部断层对 P 波的放大作用

图 1 所示为均匀半空间中局部断层模型, 破碎

带宽度、深度、倾角、剪切波速分别为 B 、 H 、 α 、 C_s^F ，围岩半空间剪切波速为 C_s 。定义无量纲频率 $\eta = H/\lambda$ ， λ 为入射波波长。图 2(a)~(c) 分别给出了破碎带宽深比 $B/H=0.05$ 、 0.1 、 0.2 时的地表位移幅值，计算参数如下： $C_s^F/C_s=0.2$ ， $\eta=0.25$ 、 0.5 、 1.0 、 2.0 ，入射角 $\theta=5^\circ$ 、 30° 、 60° 、 90° ，取两种介质泊松比均为 $\nu=1/3$ ，不考虑阻尼影响。

观察发现，低频波入射条件下，围岩地表位移幅值随破碎带宽深比的增大而增大。以 $\eta=0.25$ 时为例， $B/H=0.05$ 、 0.1 、 0.2 的 3 种场地，水平位移最大值分别为 1.80、2.15、2.61，分别比自由场增大 27.7%、52.5%、85.1%；竖向位移最大值分别为 2.04、2.1、2.28，分别比自由场增大 2.0%、5.0%、14.0%。中高频波入射条件下，围岩地表位移变得复杂，且围岩地表位移幅值随破碎带宽深比的变化不再呈递增规律，如当 $\eta=1.5$ 时， $B/H=0.05$ 、 0.1 、 0.2 的 3 种场地，水平位移最大值分别为 3.46、2.61、2.67，分别比自由场增大 145.4%、85.1%、89.4%，其中破碎带宽深比最小的场地位移幅值反而最大。可以看出，即使破碎带宽深比很小，也可能对 P 波产生很大的放大作用。

水平位移和竖向位移幅值均与入射角有关，这是由波型转换决定的。各种入射角中， $\theta=90^\circ$ （垂直入射）时竖向位移幅值最大，原因是若 P 波垂直入射，在围岩表面不发生波型转换，即只产生竖向位移，而不产生水平位移；而实际存在的较小的水平位移是波在破碎带表面散射引起的。入射角 $\theta=30^\circ$ 时水平位移幅值最大，且入射波近端位移明显大于远端。

图 3 给出了 $B/H=0.1$ 的场地的地表位移，除 $C_s^F/C_s=0.1$ 外，其他计算参数与图 2 完全相同。可以看到，由于破碎带与围岩刚度比变小，围岩地表位移与图 2(b) 相比有不同程度的增长，说明破碎带刚度越小，对 P 波的放大作用越大。

另外，断层通常是倾斜的，因此，研究倾斜断层具有重要的工程意义。图 4 给出了 $\eta=0.25$ 条件下断层倾角 α 分别为 90° 、 $\pm 60^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 时的地表位移对比曲线。计算中取 $B/H=0.1$ ， $\nu=1/3$ ， $C_s^F/C_s=0.2$ ， $\theta=5^\circ$ 、 30° 、 60° 、 90° 。倾角为正时，断层向左倾斜，倾角为负时，断层向右倾斜。

可以看到，围岩地表位移随断层倾角变化规律

比较复杂，不同入射角下的地表位移随断层倾角变化的规律有所不同，水平位移和竖向位移随断层倾角变化的规律也有所不同，这与波型转换有关。但可以看出，与断层倾角 $\alpha=90^\circ$ 时相比，断层倾斜时水平和竖向位移均有增大的现象，垂直入射时该现象十分明显。波垂直入射（ $\theta=90^\circ$ ）条件下，断层倾角 $\alpha=90^\circ$ 时位移层垂直时位移幅值最小，断层倾斜时幅值显著增大，主要表现在上盘位置。断层倾角大小相等、方向相反的两场地中，地表位移关于断层中心互为镜像。

另外，小角度入射时（ $\theta=5^\circ$ 、 30° ），水平位移最大值出现在入射波近端，并且当断层倾斜方向与波入射方向在同一侧时，位移幅值明显较大；而竖向位移最大值则出现在上盘位置，并且断层倾角大小相等、方向相反的场地位移幅值接近。水平位移随倾角的变化规律与 SH 波入射时相近，而竖向位移随倾角的变化规律与 SH 波有显著差异^[16]。

综上所述，局部断层对附近地震动的影响不能忽视，与 SH 波入射^[16]类似，即使断层很窄也可对 P 波产生很大的放大作用。当破碎带软弱或倾斜时，地表位移更为显著。

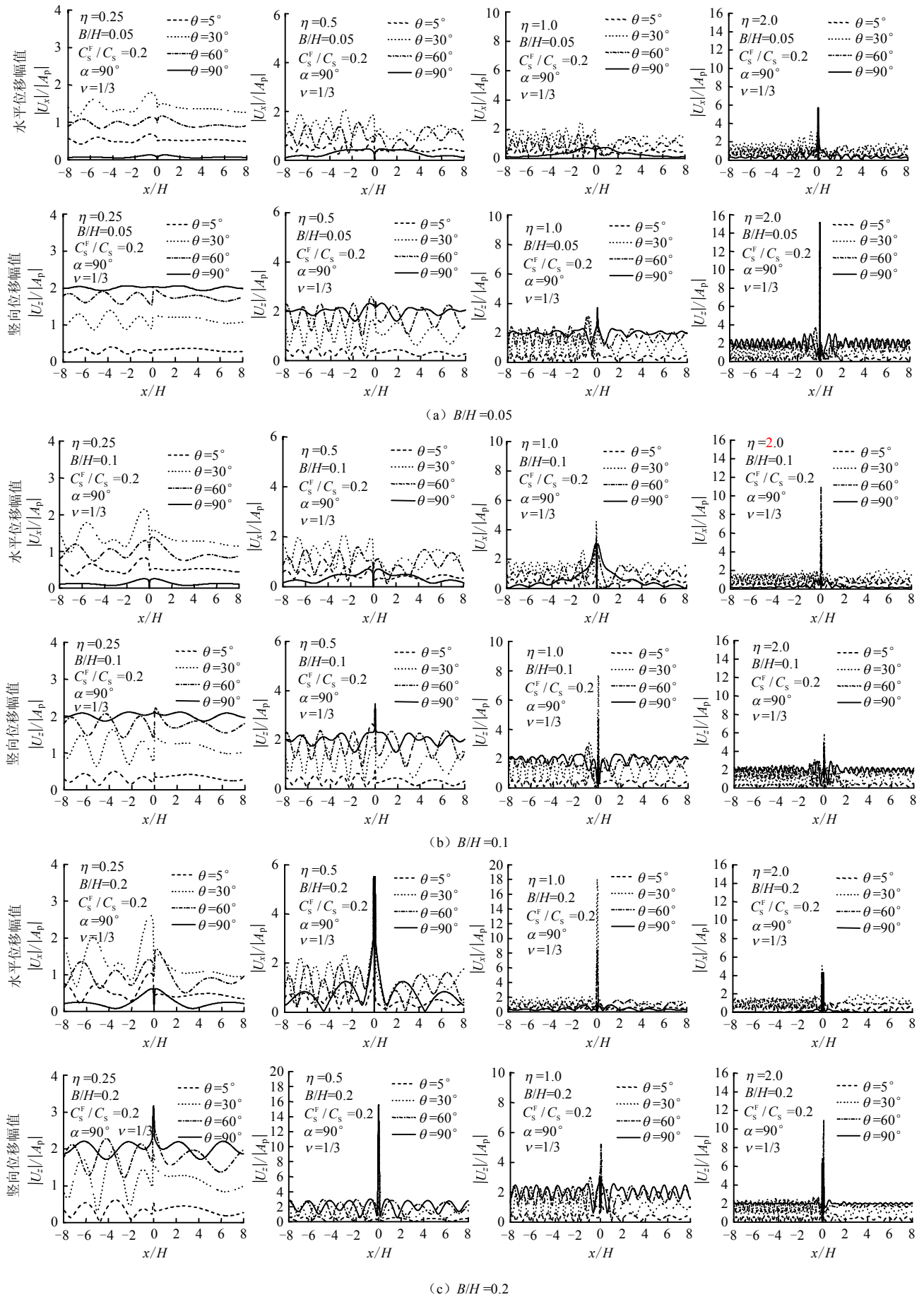
3.2 层状半空间中局部断层对 P 波的放大作用

近地表场地多为层状分布，而且土层的自振特性对地震动的幅值和频谱均有显著的影响，因此，研究层状场地中局部断层对入射波的影响具有重要的工程意义。

图 5 所示为基岩上单一土层中局部断层模型，模型（a）中土层厚度与断层破碎带深度相等（ $D=H$ ），模型（b）中土层厚度为断层破碎带深度的 2 倍（ $D=2H$ ）。 C_s^R 、 C_s^L 、 C_s^F 分别为基岩、土层和破碎带的剪切波速。 ζ^R 、 ζ^L 、 ζ^F 分别为基岩、土层和破碎带的阻尼。图 6、7 分别给出了两个模型在 P 波入射下的地表位移幅值。计算中取 $\alpha=90^\circ$ ， $B/H=0.1$ ， $C_s^F/C_s^L=0.2$ ， $C_s^R/C_s^L=5.0$ ， $\nu=1/3$ ， $\zeta^F=\zeta^L=0.05$ ， $\zeta^R=0.02$ ， $\eta=0.25$ 、 0.5 、 0.75 、 1.0 、 1.25 、 1.5 、 1.75 、 2.0 ， $\theta=5^\circ$ 、 30° 、 60° 、 90° 。

基岩上单一土层具有多个固有频率，固有频率处位移显著，基阶固有频率处位移最大。若不考虑阻尼，P 波入射下基岩上单一土层的固有频率为^[18]：

$$\omega_j = \frac{2j-1}{2} \pi \frac{C_p^L}{D \sin \theta} \quad (j=1, 2, 3, \dots) \quad (20)$$

图2 均匀半空间中断层附近地表位移 ($C_s^F/C_s = 0.2$)Fig.2 Surface displacements around a local fault in homogeneous half-space ($C_s^F/C_s = 0.2$)

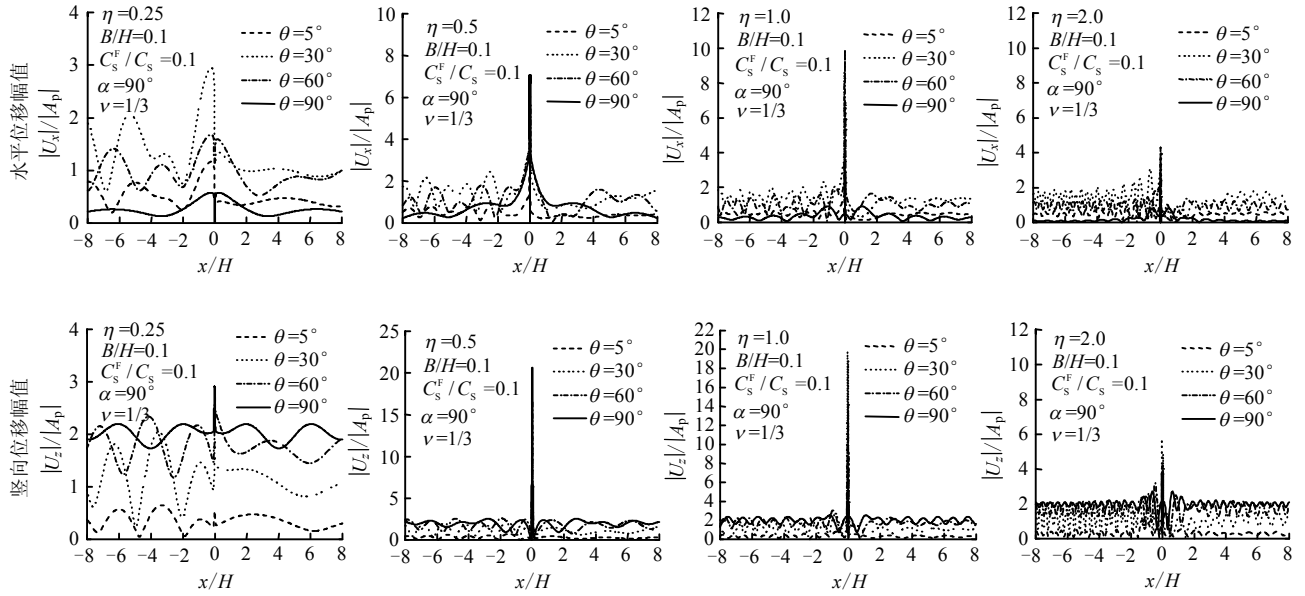
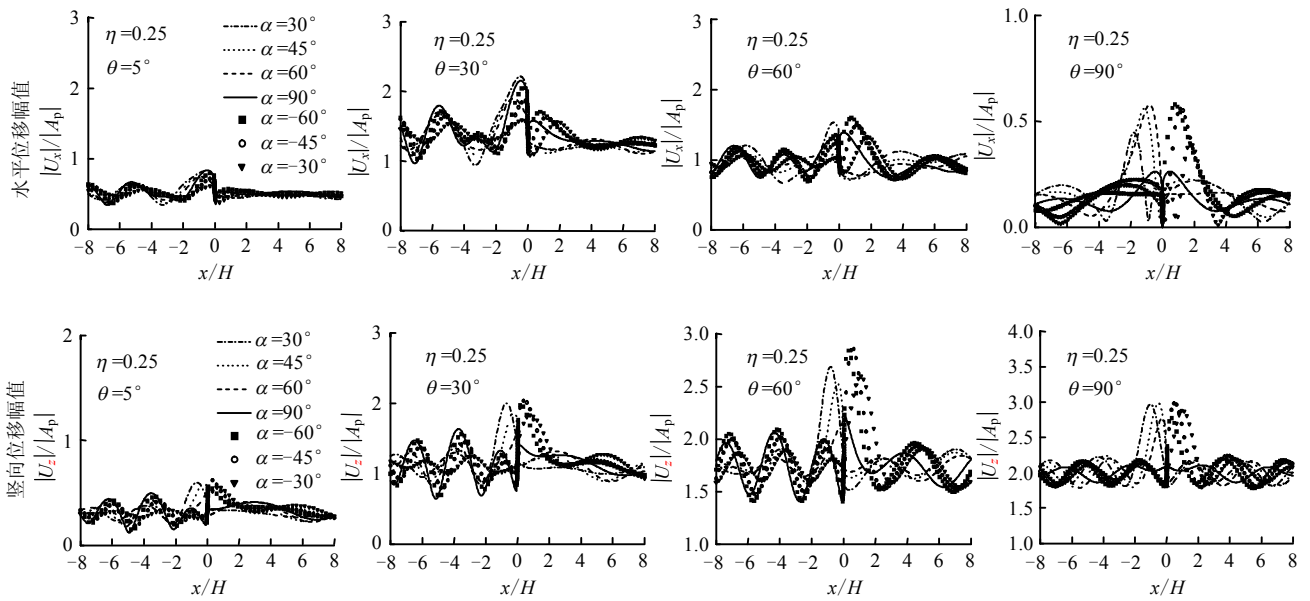
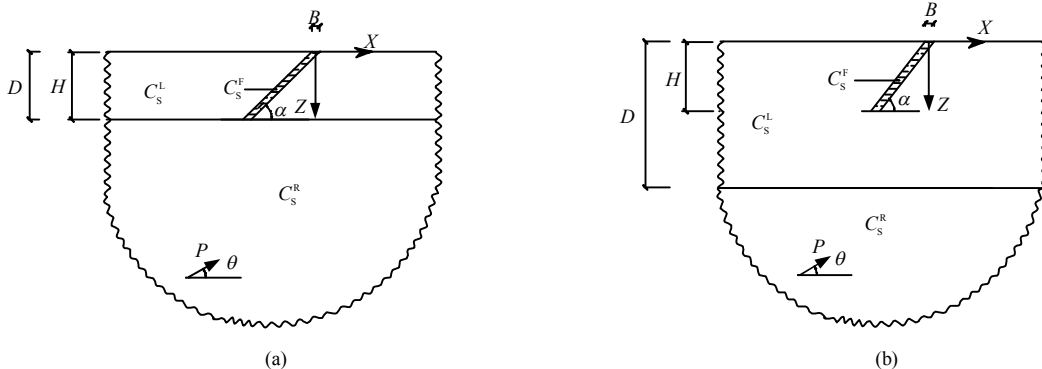
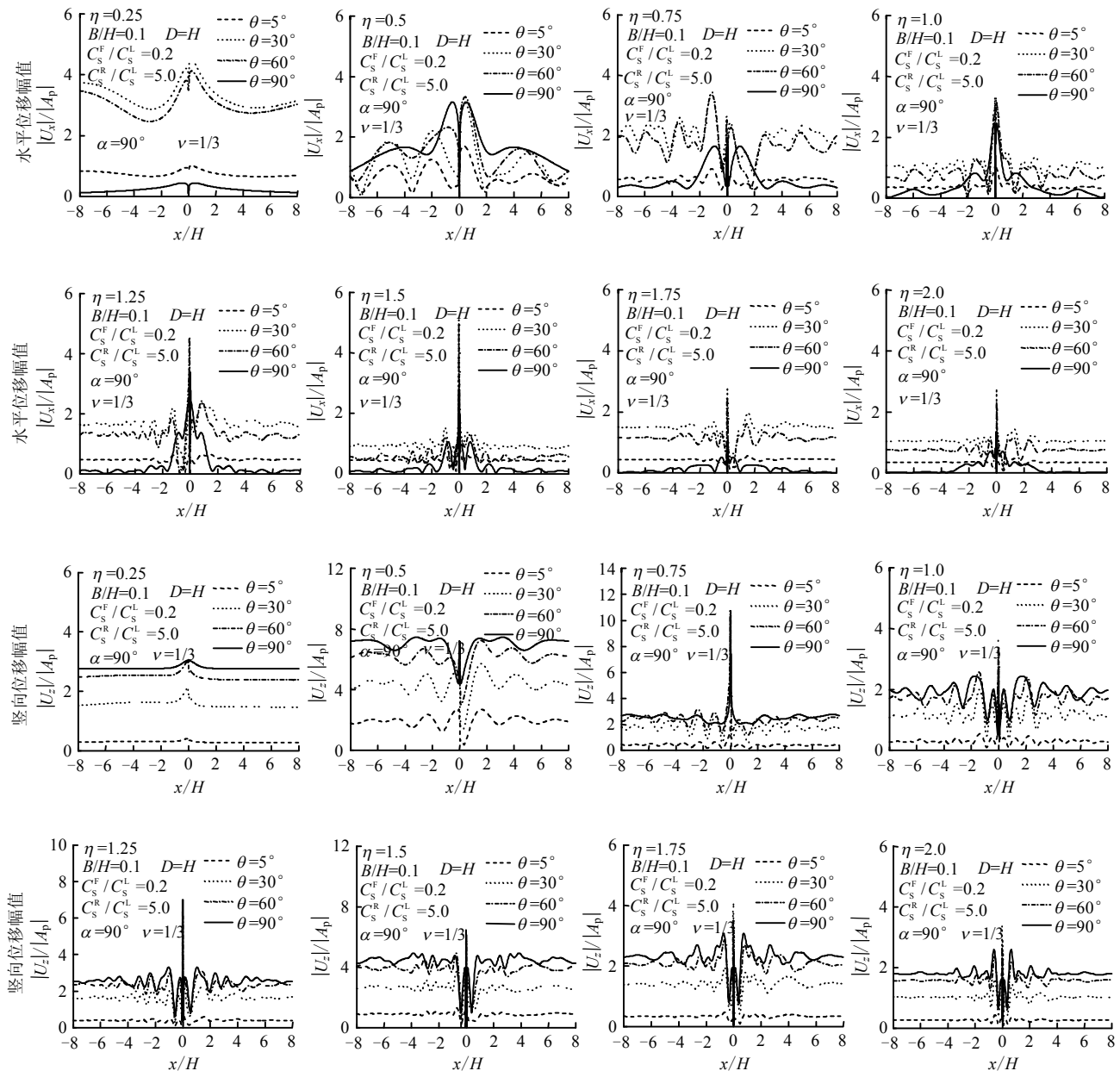
图3 均匀半空间中断层附近地表位移 ($C_s^F/C_s=0.1$)Fig.3 Surface displacements around a local fault in homogeneous half-space ($C_s^F/C_s=0.1$)图4 均匀半空间中倾斜断层附近地表位移 ($C_s^F/C_s=0.2$ $B/H=0.1$)Fig.4 Surface displacements around an inclined local fault in homogeneous half-space ($C_s^F/C_s=0.2$ $B/H=0.1$)

图5 基岩上单一土层中局部断层模型 (P波入射)

Fig.5 A local fault in layered half-space (incident P wave)

图6 基岩上单一土层中断层附近地表位移 ($D=H$)Fig.6 Surface displacements around a local fault in layered half-space ($D=H$)

式中: $C_p^L = C_s^L \sqrt{2(1-\nu)/(1-2\nu)}$, C_p^L 为 P 波波速, 将式(20)代入无量纲频率表达式 $\eta = \omega H / 2\pi C_s^L$ 得到无量纲固有频率:

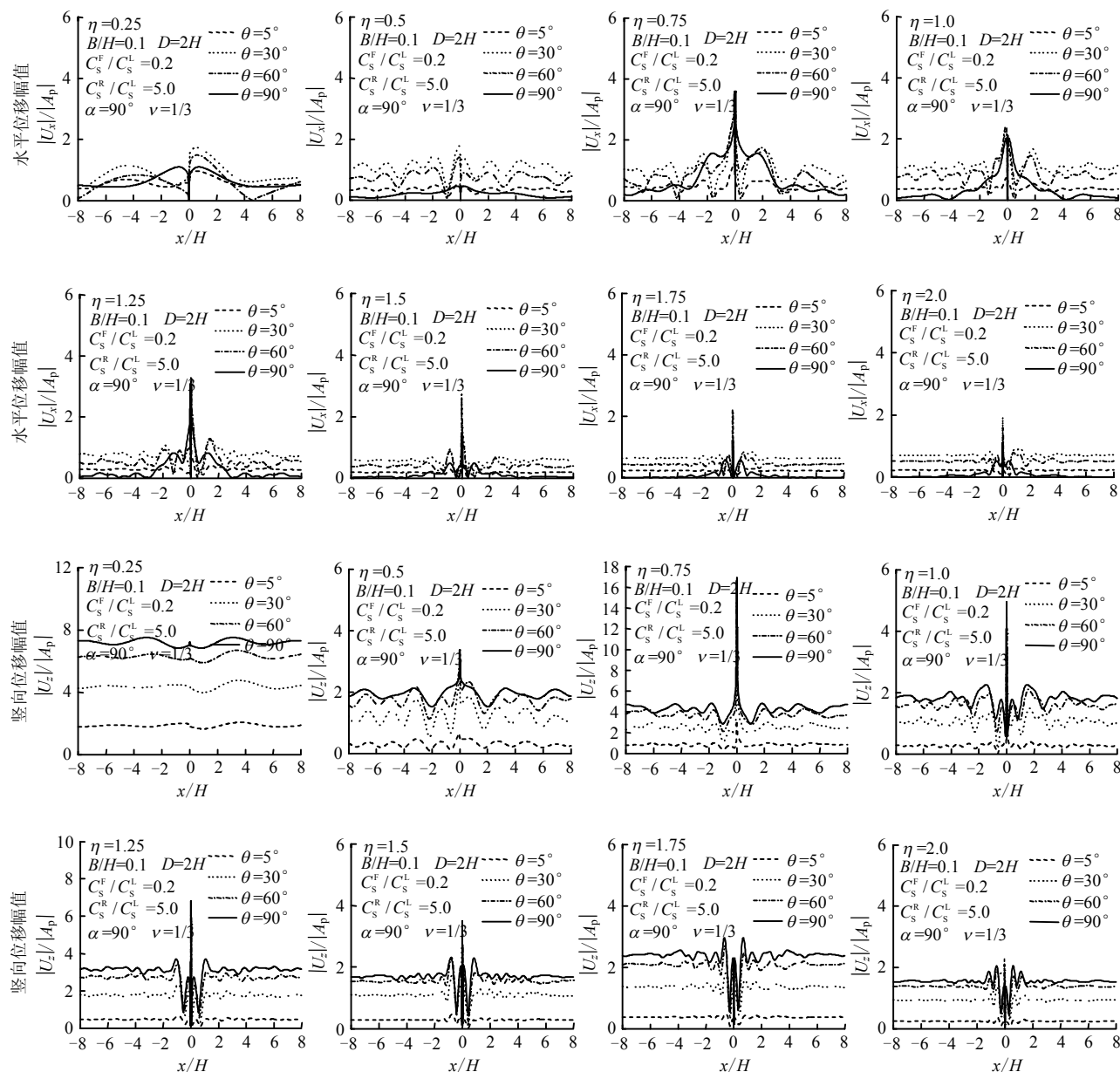
$$\eta = \frac{2j-1}{4} \frac{H}{D \sin \theta} \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (j=1,2,3,\dots) \quad (21)$$

根据上式, P 波入射下的无量纲固有频率决定于土层厚度、泊松比和入射角有关。取 $\nu=1/3$, 若 $D=H$, 则 P 波垂直入射下固有频率为 $\eta=0.5$ 、1.5、2.5、3.5……; 若 $D=2H$, 则 P 波垂直入射下固有频率为 $\eta=0.25$ 、0.75、1.25、1.75……。

从图 6、7 可以看出, 基岩上单一土层中局部断

层对 P 波的影响和均匀半空间情况有着本质的差别, 入射频率对地表位移有显著影响。以竖向位移为例, $D=H$ 和 $D=2H$ 两个模型的围岩地表的位移幅值在基阶固有频率处分别达到 7.5 ($\eta=0.5$) 和 7.52 ($\eta=0.25$), 均大于其他入射频率下的位移, 且远大于均匀场半空间情况的位移。另外还可以看出, 由于两个模型的固有频率不同, 使得两种模型的围岩地表位移有着显著的差别。

总之, 层状半空间中断层对入射波的放大作用和均匀半空间情况有着本质差别, 层状场地动力特性对放大作用有着显著影响。

图7 基岩上单一土层中断层附近地表位移 ($D=2H$)Fig.7 Surface displacements around a local fault in layered half-space ($D=2H$)

4 结 语

本文采用间接边界元法在频域内求解了局部断层场地对入射P波的散射问题，着重研究了破碎带较窄断层两侧围岩动力响应的基本规律，以及层状场地动力特性对放大作用的影响。研究表明，破碎带很窄的断层对P波也可产生很大的放大作用，当破碎带刚度较小或破碎带倾斜时，地表位移更为显著。层状半空间中断层对入射波的放大作用和均匀半空间情况有着本质差别，层状场地动力特性对放大作用有着显著影响。

由于P波在散射时会发生波型转换，因此，问题比SH波入射时复杂得多，其地表位移随入射角

的变化规律与SH波有显著差别。

参 考 文 献

- [1] 朱庆杰, 陈艳华, 蒋录珍. 场地和断层对埋地管道破坏的影响分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2392—2396.
ZHU Qing-jie, CHEN Yan-hua, JIANG Lu-zhen. Influences of site and faults on damage of buried pipelines[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(9): 2392—2396.
- [2] 石崇, 徐卫亚, 周家文, 等. 节理面透射模型及其隔振性能研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 729—740.
SHI Chong, XU Wei-ya, ZHOU Jia-wen, et al. Transmission model of joint interface and its performance

- of vibration isolation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 729—740.
- [3] 胡聿贤, 孙平善, 章在墉, 等. 场地条件对震害和地震动的影响[J]. 地震工程与工程振动, 1980, 试刊(1): 34—41.
- HU Yu-xian, SUN Ping-shan, ZHANG Zai-yong, et al. Effects of site conditions on earthquake damage and ground motion[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 1980, 00(1): 34—41.
- [4] 周正华, 张艳梅, 孙平善, 等. 断层对震害影响的研究[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(4): 20—24.
- ZHOU Zheng-hua, ZHANG Yan-mei, SUN Ping-shan, et al. Study on effect of fault on seismic damage[J]. **Journal of Natural Disasters**, 2003, 12(4): 20—24.
- [5] 石玉成, 陈炳午. 非发震断层的地震效应问题[J]. 西北地震学报, 1994, 16(1): 12—16.
- SHI Yu-cheng, CHEN Bing-wu. Effects of non-causative faults on earthquake damages[J]. **Northwestern Seismological Journal**, 1994, 16(1): 12—16.
- [6] 梁建文. 穿越三种土介质管线的动力分析[J]. 天津大学学报, 1998, 31(2): 163—168.
- LIANG Jian-wen. Dynamic analysis of pipelines laid through three soil media[J]. **Journal of Tianjin University**, 1998, 31(2): 163—168.
- [7] 温瑞智, 周正华, 杨柏坡, 等. 断层场地地震动分析[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(1): 21—27.
- WEN Rui-zhi, ZHOU Zheng-hua, SUN Ping-shan, et al. Ground motion analysis for near-fault site[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2002, 22(1): 21—27.
- [8] 李山有, 马强, 武东坡, 等. 断层场地地震反应特征研究[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(5): 32—37.
- LI Shan-you, MA Qiang, WU Dong-po, et al. Study on characteristics of seismic responses of fault sites[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2003, 23(5): 32—37.
- [9] 杨笑梅, 王海涛, 杨柏坡. 竖向地裂缝附近的地面运动[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(5): 34—40.
- YANG Xiao-mei, WANG Hai-tao, YANG Bai-po. The ground motion near vertical cracks in fault sites[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2005, 25(5): 34—40.
- [10] 杨笑梅, 王海涛, 杨柏坡. 竖向断层对场地地面运动的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(5): 7—13.
- YANG Xiao-mei, WANG Hai-tao, YANG Bai-po. The influence of vertical cracks in fault sites on the ground motion[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2006, 26(5): 7—13.
- [11] 杨笑梅, 王海涛, 杨柏坡. 三维竖向断层场地对地面运动的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(2): 1—7.
- YANG Xiao-mei, WANG Hai-tao, YANG Bai-po. The influence of three-dimensional fault sites on the ground motion[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2008, 28(2): 1—7.
- [12] 曹炳政, 罗奇峰. 浅层断层对场地地震动影响的有限元分析[J]. 地震学报, 2003, 25(1): 96—101.
- CAO Bing-zheng, LUO Qi-feng. Analysis on effect of surface fault on site ground motion using finite element method[J]. **Acta Seismologica Sinica**, 2003, 25(1): 96—101.
- [13] 李仕栋, 罗奇峰. 非活动隐伏断层对结构地震反应的影响[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(4): 25—28.
- LI Shi-dong, LUO Qi-feng. Influence of non-active concealed fault to seismic response of structure[J]. **Journal of Natural Disasters**, 2003, 12(4): 25—28.
- [14] 李仕栋, 罗奇峰. 不同倾角断层对场地动力放大效应的分析[J]. 地震研究, 2004, 27(3): 283—286.
- LI Shi-dong, LUO Qi-feng. Analysis of magnification effect of faults with various rake angles to site dynamic response[J]. **Journal of Seismological Research**, 2004, 27(3): 283—286.
- [15] 任春, 罗奇峰. 断层破碎带对非发震断层场地地震动的影响[J]. 地震研究, 2005, 28(2): 162—166.
- REN Chun, LUO Qi-feng. Effect of fault fracture zone on the ground motion of non-causative fault site[J]. **Journal of Seismological Research**, 2005, 28(2): 162—166.
- [16] 梁建文, 冯领香, 巴振宁. 含断层破碎带场地对平面SH波的放大作用[J]. 地震学报, 2010, 32(3): 300—309.
- LIANG Jian-wen, FENG Ling-xiang, BA Zhen-ning. Amplification of plane SH waves by a local fault with fracture zone[J]. **Acta Seismologica Sinica**, 2010, 32(3): 300—309.
- [17] 梁建文, 巴振宁. 弹性层状半空间中沉积谷地对入射平面SH波的放大作用[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(3): 1—9.
- LIANG Jian-wen, BA Zhen-ning. Surface motion of an alluvial valley in layered half-space for incident plane SH waves[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2007, 27(3): 1—9.
- [18] WOLF J P. Dynamic soil-structure interaction[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1985.