

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.04.009

## 近断层场地中衬砌隧道对平面SH波的散射\*

刘中宪<sup>1,2</sup>, 刘佳乔<sup>1</sup>, 黄磊<sup>3</sup>

(1. 天津城建大学土木工程学院, 天津 300384; 2. 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384;  
3. 天津大学建筑工程学院, 天津 300372)

**摘要:** 采用间接边界单元法, 求解断层场地中衬砌隧道对平面SH波的散射。首先, 通过IBEM求解半空间波动问题的思路, 在单层位势理论下, 将虚拟荷载施加于散射体表面构造散射波场。然后根据交界面处位移连续条件和应力连续条件建立方程, 进而求解得出虚拟荷载密度。半空间自由波场与散射波场通过叠加得出总波场, 将得出的结果与现有的精确解进行对比, 从而使本方法的计算精度得到验证。最后, 通过求得详细数值结果, 讨论了半空间中断层场地和衬砌隧道对平面SH波的散射规律。数值分析结果表明: 近断层场地衬砌隧道附近SH波的散射同无断层情况相比差异显著, 动力反应特征主要依赖于不同断层倾角、隧道与断层距离、SH波入射角度、入射频率等参数。总体上看, SH波入射下, 当衬砌隧道位于断层上盘时, 断层的存在对衬砌隧道的动应力集中因子会有一定的缩小效应; 当衬砌隧道位于断层下盘时, 断层的存在对衬砌隧道的动应力集中因子会有放大效应, 应力增幅可以达到30%。实际隧道结构动力分析宜根据实际工况考虑断层存在的影响。

**关键词:** 弹性半空间; 间接边界元法; 断层; 衬砌隧道; 平面SH波

**中图分类号:** U451 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)04-0556-10

## Scattering of Plane SH Wave by Lining Tunnel in Near Fault Site

LIU Zhongxian<sup>1,2</sup>, LIU Jiaqiao<sup>1</sup>, HUANG Lei<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;  
2. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin 300384, China;  
3. School of Civil Engineering and Architecture, Tianjin University, Tianjin 300372, China)

**Abstract:** In this paper, indirect boundary element method is used to solve the scattering of plane SH wave in fault site and lining tunnel. First, referring to IBEM solution of half-space wave problem, the scattering wave field is constructed by applying virtual load on the scattering body surface based on the monolayer potential theory. Then, on the basis of the continuous conditions of stress and displacement at the boundary of the crushing zone, the virtual load density is established and solved considering the zero stress conditions of the half-space surface and the pore surface. The total wave field is obtained by the superposition of scattered wave field and half-space free wave field. The accuracy of the method is verified by comparing with the existing exact solutions. Finally, through detailed numerical results, the scattering rule of plane SH wave in fault site and lining tunnel in half space is discussed. Results of numerical analysis show that the scattering of SH wave near the tunnel lining closed to the fault site is

\* 收稿日期: 2019-07-01; 修回日期: 2019-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678390)、天津市科技支撑重点项目(17YFZCSF01140)、天津市自然科学基金重点项目(18JCZDJC39200)资助

作者简介: 刘中宪(1982-), 男, 教授, 博士后。主要从事地震工程、工程振动研究。Email: zhongxian1212@163.com

significantly different from that without fault. The dynamic response characteristics mainly depend on the inclination angle fault wall, distance between the tunnel and the fault, incidence angle of SH wave, incidence frequency of SH wave and other parameters. In general, when the lining tunnel with the incidence of SH wave is located in the hanging wall of the fault, the existence of the fault will have a certain reduction effect on the dynamic stress concentration factor of the lining tunnel. When the lining tunnel is located in the footwall of the fault, the existence of the fault will magnify the dynamic stress concentration factor of the lining tunnel, and the stress increase can reach 30%. In the dynamic analysis of tunnel structure, the influence of faults should be considered according to the actual working conditions.

**Keywords:** elastic half space; indirect boundary element method; fault; lined tunnels; plane SH wave

## 引言

近年来,地震震害表明,在地震作用下,地下结构会出现较为严重的破坏,断层破碎带的存在,会加剧地下结构的地震反应。随着西部高烈度地震区公路以及山岭隧道工程的广泛建设,在隧道的选址时,不可避免地会遇到隧道近接(或穿越)断层破碎带的情况。衬砌隧道本身在一定的支护条件下具有良好的抗震性能,但当其位于断层破碎带地段时,受断层的影响,会产生一定程度的破坏,故开展近断层场地衬砌隧道的地震动响应规律研究具有重要意义。目前该问题的研究已经取得了许多重要成果,文献[1]通过间接边界元法求解了含破碎带断层(断层无限深)的均匀场地对弹性SH波的散射;文献[2]采用波函数展开法分析了半无限空间中圆形衬砌对SH波的散射;文献[3-4]应用间接边界积分方程法,对弹性半空间中衬砌洞室在平面P波和SV波入射下的反应和深埋球形衬砌洞室在球面压缩波入射下的三维动力反应进行了研究;文献[5]采用间接边界积分方程法探索了入射波特性,研究了沉积谷地中衬砌隧道对SH波的散射问题;文献[6]采用间接边界元法求解了楔形空间中的任意形状孔洞对平面SH波的散射;文献[7]采用间接边界积分方程法基于黏性滑移界面模型,求解弹性半空间中浅埋圆形衬砌洞室对入射平面SH波的散射问题。

上述研究均针对单断层或单衬砌隧道对地震波的散射,而对于隧道近接断层破碎带的情况,地震动的影响机理更为复杂。文献[8]采用FLAC数值计算方法研究了隧道与断层破碎带距离因素影响下隧道结构的地震破坏规律;文献[9]通过振动

台模型试验进行数值分析,研究了穿越断层破碎带的隧道在地震荷载作用下的横向内力分布和纵向动力响应特性;文献[10]采用数值模拟方法以穿越发震断层的高黎贡山段隧道工程为背景分析了隧道跨越发震断层以及在近场地震动作用下的地震响应;文献[11]运用数值模拟方法,分析总结了断层相应参数变化对穿越断层隧道的地震动力响应的影响规律。

本文采用一种特殊的间接边界单元法(IBEM)研究了近断层场地中圆形衬砌隧道对平面SH波的散射。利用IBEM求解半空间波动问题的思路,在单层位势理论下,通过在衬砌隧道表面及其附近断层表面施加虚拟荷载构造散射波场。进而根据断层破碎带边界以及衬砌隧道外表面的位移和应力连续条件,断层地表和衬砌隧道对应地表的零应力条件建立方程,从而求解得到虚拟荷载密度。总波场由散射波场和半空间自由波场叠加得到。经过边界条件验算、退化解答与现有结果比较,验证了方法精度。最后,通过详细的数值结果,探讨了近断层场地中圆形衬砌隧道对平面SH波的散射规律。

## 1 计算模型

如图1所示,一断层和一无限长的衬砌隧道位于弹性半空间中。为简化分析,将半空间围岩区域 $D_1$ 、断层破碎带区域 $D_2$ 、衬砌隧道域 $D_3$ 均假设为各向同性介质。围岩半空间介质剪切模量和密度分别为 $\mu_1$ 和 $\rho_1$ ,断层破碎带相应为 $\mu_2$ 和 $\rho_2$ ,衬砌材料相应为 $\mu_3$ 和 $\rho_3$ 。 $c_{a1}$ 、 $c_{a2}$ 、 $c_{a3}$ 分别为基岩半空间、断层破碎带和衬砌隧道中SH波波速。本文以圆形衬砌隧道为例进行求解,设隧道埋深为 $d$ ,衬砌内外半径

为  $r_1$  和  $r_2$ 。假设半空间中圆频率为  $\omega$  的 SH 波以角度  $\theta$  入射,待求问题为考虑断层存在时,半空间中衬砌隧道对 SH 波的二维散射。

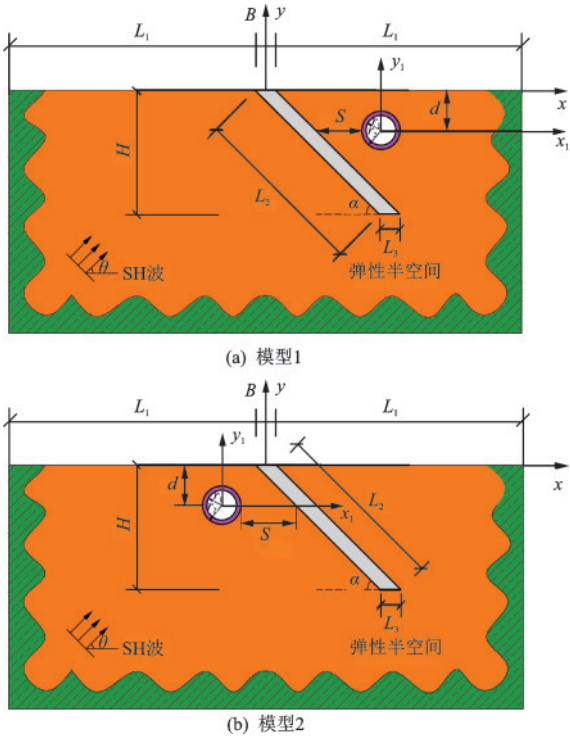


图 1 近断层场地中衬砌隧道对平面 SH 波的散射模型  
Fig.1 Model of scattering of plane SH wave by lining tunnel in near fault site

## 2 方法及求解

根据弹性波动理论,SH 波入射,在极坐标系  $\rho-\theta$  中弹性半空间中的出平面位移波场  $u$  满足如下波动方程:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} = \frac{1}{c_a^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中,  $c_a = \sqrt{\mu/\rho}$  为剪切波波速;  $\rho, \mu$  分别为介质的质量密度和剪切模量。

在简谐波的激励下,通过使用 Smigliana 积分公式可以表示出弹性体任意一点的位移:

$$cu_i(\xi) = \int_V G_{ij}(y, \xi) f_j(y) dS + \int_S [G_{ij}(x, \xi) t_j(x) - T_{ij}(x, \xi) u_j(x)] dS \quad (2)$$

式中,  $u_j(x)$  表示任意点  $x$  处  $j$  向位移;  $t_j(x)$  表示任意点  $x$  处  $j$  向牵引力;  $f_j(y)$  表示体力项;  $G_{ij}(x, \xi)$  和  $T_{ij}(x, \xi)$  分别为位移格林函数与牵引力格林函数。

直接边界元法的求解基础可表达为 Somigliana

积分式。而间接法也是一种与其等效的方法,在单层次势理论下,可以得出如下公式:

$$u_i = \int_V G_{ij}(x, \xi) f_j(\xi) dV + \int_S G_{ij}(x, \xi) \phi_j(\xi) dS \quad (3)$$

类似地,牵引力可以通过 Hook 定律推导得出:

$$t_i = \int_V T_{ij}(x, \xi) f_j(\xi) dV + \int_S T_{ij}(x, \xi) \phi_j(\xi) dS \quad (4)$$

对边界面的单元离散是数值计算时所必需的过程,公式(3)、(4)为求解间接边界元的基础。

### 2.1 波场构造

总波场  $w^f$  分为两部分:一部分为自由波场  $w^f$ ,自由波场为 SH 波入射下对于不含断层破碎带、衬砌隧道的半空间波场的解答;另一部分为散射波场  $w^s$ ,散射波场则通过间接边界元法,在断层破碎带表面、衬砌隧道内外表面以及附近半空间表面上施加虚拟荷载产生。

$$w^f = w^f + w^s \quad (5)$$

#### 2.1.1 自由波场

自由场由入射平面波和反射平面波共同组成<sup>[12]</sup>。

入射波位移为:

$$w^i = \exp(i\bar{\omega}t - k_1(x \cos(\theta) - y \sin(\theta))) \quad (6)$$

反射波位移为:

$$w^r = \exp(i\bar{\omega}t - k_1(x \cos(\theta) + y \sin(\theta))) \quad (7)$$

总的自由波场为:

$$w^f = \exp(i\bar{\omega}t - k_1(x \cos(\theta) - y \sin(\theta))) + \exp(i\bar{\omega}t - k_1(x \cos(\theta) + y \sin(\theta))) \quad (8)$$

相应地自由场引起的剪应力可根据本构方程推得:

$$\tau_{xz} = \mu_1 \frac{\partial w^f}{\partial x} = -\mu_1 k_1 \cos(\theta) (\exp(i\bar{\omega}t - k_1(x \cos(\theta) - y \sin(\theta))) + \exp(i\bar{\omega}t - k_1(x \cos(\theta) + y \sin(\theta)))) \quad (9)$$

$$\tau_{yz} = \mu_1 \frac{\partial w^f}{\partial y} = \mu_1 k_1 \sin(\theta) (\exp(i\bar{\omega}t - k_1(x \cos(\theta) - y \sin(\theta))) - \exp(i\bar{\omega}t - k_1(x \cos(\theta) + y \sin(\theta)))) \quad (10)$$

边界面上由自由场引起的切向应力为:

$$\tau_{nz}^f = \tau_{xz} \frac{\partial x}{\partial n} + \tau_{yz} \frac{\partial y}{\partial n} \quad (11)$$

式中,  $\theta$  为 SH 波的入射角;  $k_1 = \omega/c_{a1}$  为半空间内横波的波数;时间因子  $\exp(i\omega t)$  可以忽略。

### 2.1.2 散射波场

在之前的讨论中,考虑到消除体力的影响,公式(3)、(4)给出散射波场的位移和应力可以分别改写为:

$$u_i^s(x) = \int_S \phi_j(\xi) G_{ij}(x, \xi) dS_\xi \quad (12)$$

$$t_i^s(x) = \int_S \phi_j(\xi) T_{ij}(x, \xi) dS_\xi \quad (13)$$

式中,  $\phi_j(\xi)$  表示边界单元上  $\xi$  位置处施加的虚拟均布荷载的密度。

其中,半空间出平面的线源格林函数为:

$$G_{zz}(x, \xi) = -\frac{i}{4\mu} H_0^{(2)}(kr) \quad (14)$$

$$T_{zz}(x, \xi) = -\frac{i}{4r} H_1^{(2)}(kr)(\gamma_x n_x + \gamma_y n_y) \quad (15)$$

式中,  $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$ ,  $(x, y)$  和  $(x_0, y_0)$  分别为场点和源点坐标;  $H_n^{(2)}(\bullet)$  为  $n$  阶第二类 Hankel 函数;  $x$  处边界单元的法向量与  $x$  轴夹角的余弦为  $n_x$ ; 与  $y$  轴夹角的余弦为  $n_y$ ;  $\gamma_x = (x - x_0)/r$ ;  $\gamma_y = (y - y_0)/r$ 。

### 2.2 边界条件及求解

本文采用间接边界元法对近断层场地围岩半空间和衬砌隧道内部的波动状态进行模拟,采用弹性半空间动力格林函数,地表零应力边界条件已自动满足,故只需考虑交界面上的位移、应力连续条件和衬砌内表面的零应力条件。边界条件可分为以下三部分:一为断层破碎带与围岩半空间交界面的位移和应力连续;二为衬砌隧道与围岩半空间交界面的位移和应力连续;三为衬砌隧道内表面零应力。边界条件如下:

$$u_z^{s_1} = u_z^{s_2}, \sigma_{zn}^{s_1} = \sigma_{zn}^{s_2} \quad (16)$$

$$u_z^{s_1} = u_z^{s_3}, \sigma_{zn}^{s_1} = \sigma_{zn}^{s_3} \quad (17)$$

$$\sigma_{zn}^{s_3} = 0 \quad (r = r_1) \quad (18)$$

由断层破碎带与围岩半空间交界面、衬砌隧道和半空间交界面自由边界条件,公式(3)、(4)可以表示为:

$$\int_S \phi_j(\xi) T_{ij}(x, \xi) dS_\xi = -t_i^f(x) \quad (19)$$

$$\int_S \phi_j(\xi) G_{ij}(x, \xi) dS_\xi = -u_i^f(x) \quad (20)$$

该式为包含奇异性的第二类 Fredholm 积分方程。在进行求解时,需要在衬砌隧道表面和半空间

表面的每个单元上施加虚拟均布荷载,利用半空间格林函数来离散。每个边界单元上的常量为  $\phi_j(\xi_l)$ ,存在线性方程组:

$$\sum_{l=1}^N \phi_j(\xi_l) t_{ij}(x_n, \xi_l) = -t_i^f(x_n), n = 1, \dots, N \quad (21)$$

$$t_{ij}(x_n, \xi_l) = \int_{\xi_l - \frac{\Delta S}{2}}^{\xi_l + \frac{\Delta S}{2}} T_{ij}(x_n, \xi) dS_\xi \quad (22)$$

$$\sum_{l=1}^N \phi_j(\xi_l) u_{ij}(x_n, \xi_l) = -u_i^f(x_n), n = 1, \dots, N \quad (23)$$

$$u_{ij}(x_n, \xi_l) = \int_{\xi_l - \frac{\Delta S}{2}}^{\xi_l + \frac{\Delta S}{2}} G_{ij}(x_n, \xi) dS_\xi \quad (24)$$

式中,  $N$  为边界面的离散单元数。

当  $x \neq \xi$  时,公式(22)与公式(24)可直接利用高斯积分法计算,在下文中,每个单元上都采用三点高斯积分进行计算。当  $x$  在  $\xi$  附近时,需使用格林函数展开式进行求解,可以推出下式:

$$t_{ij}(x_n, \xi_n) = \frac{1}{2} \delta_{ij} \quad (25)$$

$$u_{ij}(x_n, \xi_n) = \int_{-\frac{\Delta S}{2}}^{\frac{\Delta S}{2}} -\frac{i}{4\mu} H_0^{(2)}(ks) ds = -\frac{i\Delta S}{4\mu} \left[ 1 + i \frac{2}{\pi} (1 - \gamma - \lg(\frac{k\Delta S}{4})) \right] \quad (26)$$

式中,  $\Delta S$  为单元长度;  $\delta_{ij}$  为 Delta 函数;  $\gamma$  (可近似取 0.577 2) 为 Euler 常数。

根据以上分析可以看出,在单层位势理论下,散射波场可通过虚拟均布荷载施加于散射体表面来构造。根据上述边界条件建立方程,通过求解方程即可得出每个单元上虚拟荷载的密度,最终求解得到散射波场。把散射场和自由场叠加即可得到总波场。在本方法中,虚拟荷载直接施加在边界上,这个特点可以看作是对惠更斯原理的直接实现。

### 3 精度检验

本文研究的近断层场地圆形衬砌洞室对平面 SH 波的散射问题,目前还没有精确解,故尚无结果可对照。因此,本文将近断层的衬砌隧道模型退化为无断层情况,即定义断层内外密度相等与现有结果进行计算精度上的对比。首先将衬砌隧道出平面动应力集中因子(Dynamic Stress Concentration Factors, DSCF)定义为  $\sigma_{\theta\theta}^* = |\sigma_{\theta\theta}/\sigma_0| = |\sigma_{\theta\theta}/\mu k_{\beta 1}^2|$ ,表

示洞周环向应力同半空间中入射波应力幅值的比值。本模型的参数取值为:剪切波速比  $c_{a2}/c_{a1}=0.2$ ,  $c_{a3}/c_{a1}=5/1$ ; 密度比  $\rho_2/\rho_1=9/1$ ,  $\rho_3/\rho_1=5/4$ ; 取量纲频率  $\eta$ ; 衬砌内外半径比  $r_1/r_2=10/11$ , 埋深  $d=2$  m,  $r_1=1$  m。将断层内外介质设置成完全一样, 如图2所示, 本文模型退化成衬砌洞室时的衬砌内外壁的动应力集中因子分布, 将其结果同文献[13]楔形空间中衬砌洞室当楔形角  $v\pi$  为  $\pi$  时给出的结果进行对比, 可以看出本文计算方法所得结果与已知结果吻合良好, 从而证明了该方法与程序的正确性和精度。

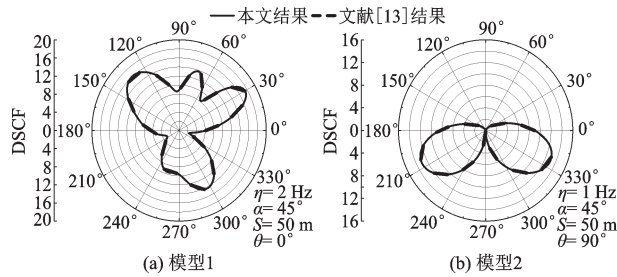


图2 本文结果与文献[13]比较

Fig.2 Comparison between the results of this paper and literature [13]

## 4 算例分析

本算例参数设置如下:定义实际频率  $\eta$ ; 取半空间围岩剪切波速  $c_{a1}=1\ 200$  km/h, 密度  $\rho_1=2\ 000$  kg/m<sup>3</sup>, 衬砌隧道内半径  $r_1=5$  m, 外半径  $r_2=11/10 \times r_1=5.5$  m, 剪切波波速  $c_{a3}=2\ 400$  km/h, 密度  $\rho_3=2\ 500$  kg/m<sup>3</sup>; 断层破碎带宽度  $B=50$  m, 长度  $L_2=1\ 000$  m, 深度  $H=L_2 \times \sin\alpha$ , 剪切波波速  $c_{a2}=240$  km/h, 密度  $\rho_2=1\ 800$  kg/m<sup>3</sup>。图3~8为隧道位于断层上盘和下盘时SH波入射下考虑断层倾角、隧道与断层的距离和SH波不同入射角度变化对应的衬砌内外壁环向应力幅值。

### 4.1 隧道位于断层上盘(模型1)

#### 4.1.1 SH波入射下不同断层倾角衬砌表面环向应力幅值

图3给出了SH波入射下, 不同断层倾角对应的衬砌内外表面的环向应力集中因子。断层与衬砌隧道的水平距离为50 m, SH波的入射角度  $\theta=90^\circ$ 。入射频率  $f=5, 10, 20$  Hz, 断层倾角  $\alpha=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 。

由图3可以看出, 当衬砌隧道位于断层上盘时, 断层的存在对隧道内外表面的动应力集中因子均有显著缩小效应, 如  $f=5$  Hz,  $\alpha=45^\circ$  的情况, 隧道内外壁幅值为6.91和6.31, 内外壁的应力降幅为44.59%和44.65%; 并且中低频波入射时, 衬砌内外壁的应力幅值随着断层倾角的增大而增大; 高频波入射时, 衬砌内外壁的应力幅值随着断层倾角的增大呈现先增大再减小的趋势, 在断层倾角  $30^\circ$  时应力达到最大; 在低频波入射下, 洞周应力曲线较平缓, 但应力集中更加显著, 如  $f=5$  Hz,  $\alpha=60^\circ$  的情况, 隧道内外壁幅值为11.35和10.37。

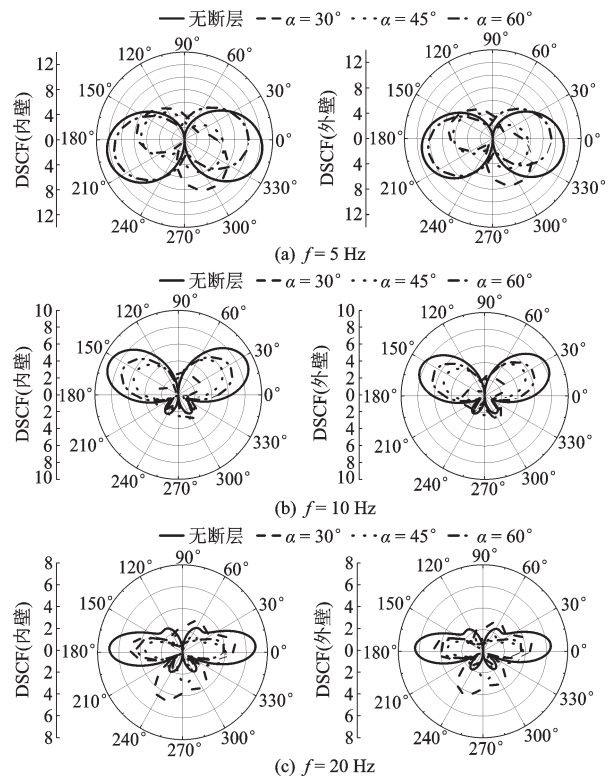


图3 SH波入射下不同断层倾角衬砌表面环向应力幅值(模型1)

Fig.3 Annular stress amplitude of lining surface with different fault inclinations under SH wave incidence (model 1)

#### 4.1.2 SH波入射下与断层不同距离衬砌表面环向应力幅值

SH波入射下, 与断层不同距离的衬砌隧道内外表面的环向应力集中因子如图4所示。断层倾角  $\alpha=45^\circ$ , SH波的入射角度  $\theta=90^\circ$ 。入射频率  $f=5, 10, 20$  Hz, 与断层的距离  $S=10, 50, 100$  m。由图4可以看出, 当衬砌隧道位于断层上盘时, 断层的存在对隧道内外表面的动应力集中因子均有显著缩小效应。如  $f=5$  Hz, 垂直入射情况, 衬砌隧道与断

层的倾角  $\alpha=45^\circ$  时, 对应于与断层的距离  $S=10$ 、50、100 m, 隧道内外壁应力幅值分别为 10.3、6.9、6.0 和 9.4、6.3、5.5; 在低频波入射下, 洞周应力曲线较平缓, 但应力集中更加显著, 如  $f=5$  Hz,  $\alpha=45^\circ$  的情况, 幅值达到 10.3; 随着衬砌隧道与断层距离的增大, 隧道内外壁的应力大部分呈现先增大后减小的趋势, 在断层与衬砌隧道距离 10 m 时达到最大。

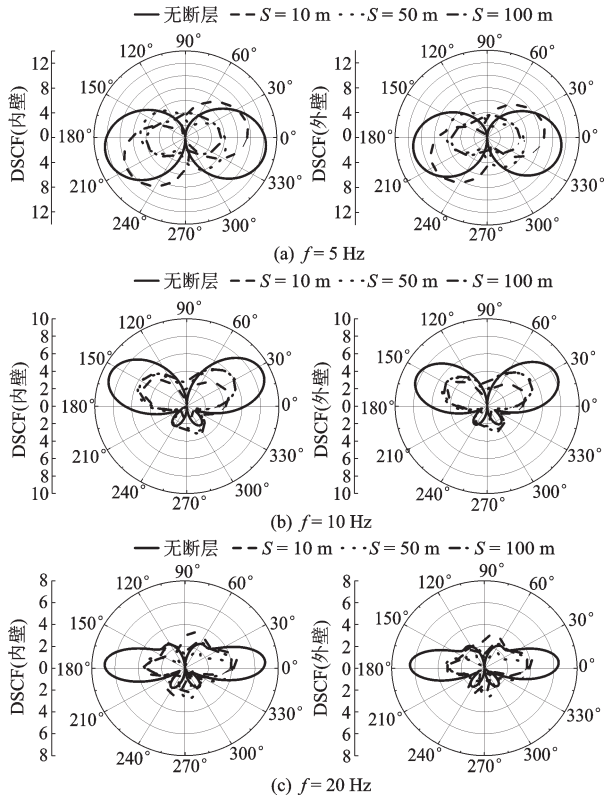


图4 SH波入射下与断层不同距离衬砌表面环向应力幅值 (模型1)

Fig.4 Annular stress amplitude of lining surface at different distance to the fault under incident SH wave (model 1)

#### 4.1.3 SH波入射下不同入射角度衬砌表面环向应力幅值

SH波入射下, 不同入射角度对应的衬砌内外表面的环向应力集中因子如图5所示。断层倾角  $\alpha=45^\circ$ , 断层与隧道的水平距离  $S=50$  m。入射频率  $f=5$ 、10、20 Hz, 入射角度:  $\theta=0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ ,  $S=50$  m, 随着入射角度的减小, 衬砌内外表面环向应力的幅值大部分呈现先减小再增大的趋势, 并且整体上看, 各频率SH波不同角度入射时, 动应力集中因子最大值一般出现在波水平入射的情况, 如  $f=5$  Hz,  $S=50$  m, SH波水平入射时内外壁的应力幅值达到 9.24 和 8.45; 随着SH波入射频率的增大, 波动能量在隧道附近集中效应更显著, 动力集中因子

峰值逐渐减小如  $f=20$  Hz 时, SH波水平入射时内外壁的应力幅值为 6.13 和 5.68, 相比于  $f=5$  Hz 的情况, 内外壁的应力降幅为 33.66% 和 32.78%。

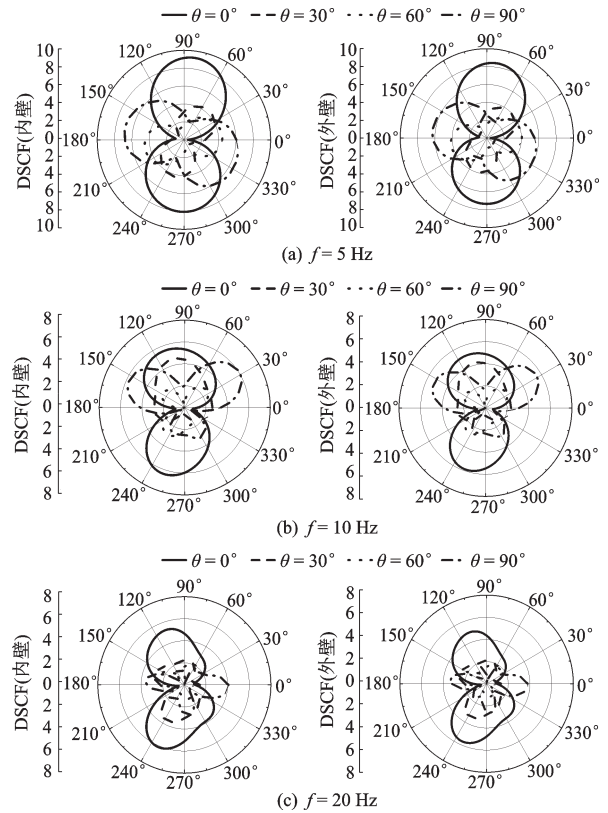


图5 SH波入射下不同入射角度衬砌表面环向应力幅值 (模型1)

Fig.5 Annular stress amplitude of lining surface at different incident angles under SH wave incidence (model 1)

## 4.2 隧道位于断层下盘 (模型2)

### 4.2.1 SH波入射下不同断层倾角衬砌表面环向应力幅值

图6给出了SH波入射下, 不同断层倾角对应的衬砌内外表面的环向应力集中因子。断层与衬砌隧道的水平距离为 50 m, SH波的入射角度  $\theta=90^\circ$ 。入射频率  $f=5$ 、10、20 Hz, 断层倾角:  $\alpha=30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ , 衬砌隧道与断层的水平距离为 50 m。据图可以看出, 当衬砌隧道位于断层下盘时, 由于波在断层半空间和衬砌隧道表面的多次散射叠加, 反应规律比较复杂, 断层的存在对隧道内外表面的动应力集中因子会有放大效应。如  $f=10$  Hz, 垂直入射情况, 对应于断层倾角  $\alpha=30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ , 隧道内外壁应力幅值分别为 8.0、10.8、9.4 和 7.4、9.8、8.6, 与无断层内外壁应力幅值 9.1 和 8.3 相比具有一定的放

大作用;从图可以看出,随着断层倾角的大小与震害程度相关密切,其震害程度随倾角的增加先增大后逐渐减小,中低频波入射时,在倾角 $45^\circ$ 时受到的地震扰动最为剧烈,高频波入射时,在倾角 $30^\circ$ 时受到的地震扰动最为剧烈;还可以看出随着入射波入射频率的增大,应力曲线的振荡逐渐加剧,波的相干效应也更加明显,但在低频波入射下,洞周应力曲线较平缓,但应力集中更加显著,如 $f=5\text{ Hz}$ , $\alpha=45^\circ$ 的情况,幅值达到15。

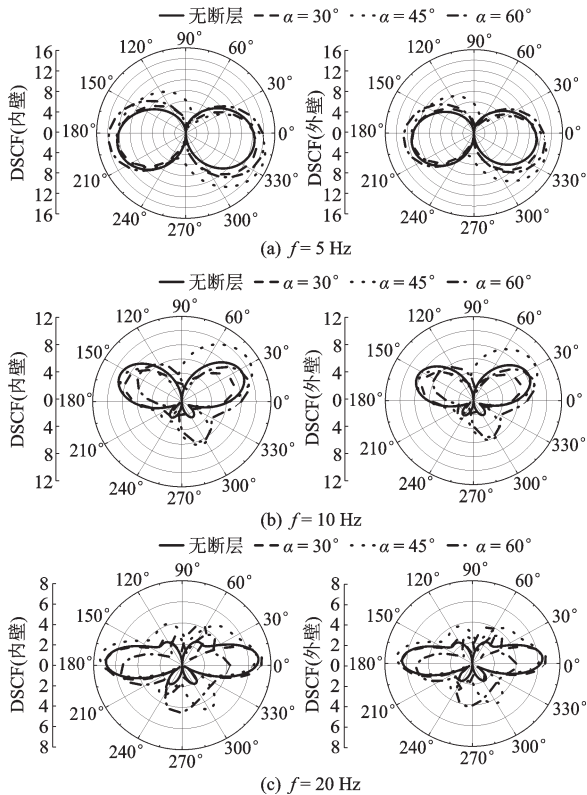


图6 SH波入射下不同断层倾角衬砌表面环向应力幅值(模型2)  
Fig.6 Annular stress amplitude of lining surface with different fault inclinations under SH wave incidence (model 2)

#### 4.2.2 SH波入射下与断层不同距离衬砌表面环向应力幅值

由图7可以看出SH波入射下,与断层不同距离对应的衬砌内外表面的环向应力集中因子。断层倾角 $\alpha=45^\circ$ ,SH波的入射角度 $\theta=90^\circ$ 。入射频率 $f=5、10、20\text{ Hz}$ ,衬砌隧道与断层的水平距离: $S=10、50、100\text{ m}$ ,断层倾角 $\alpha=45^\circ$ 。由图7可以看,衬砌隧道位于断层的下盘,隧道表面的动应力集中因子具有显著的放大效应。如 $f=10\text{ Hz}$ ,垂直入射情况时,隧道与断层的水平距离 $S=10、50、100\text{ m}$ ,隧道内外壁应力幅值分别为10.4、10.8、11.2和9.6、

9.8、10.3,与无断层内外壁应力幅值9.1和8.3相比具有一定的放大作用,可以看出,断层破碎带与衬砌隧道的距离因素与震害程度密切相关,其破坏程度随着距离的增加逐渐增大;还可以看出随着入射频率的增大,应力曲线振荡逐渐加剧,在低频入射下,洞周应力曲线较平缓,但应力集中更加显著,如 $f=5\text{ Hz}$ , $S=100\text{ m}$ 的情况,内外壁的应力幅值达到16.2和14.8,内外壁的应力增幅分别为29.60%和29.82%,随着频率的增大,应力曲线的振荡逐渐加剧。

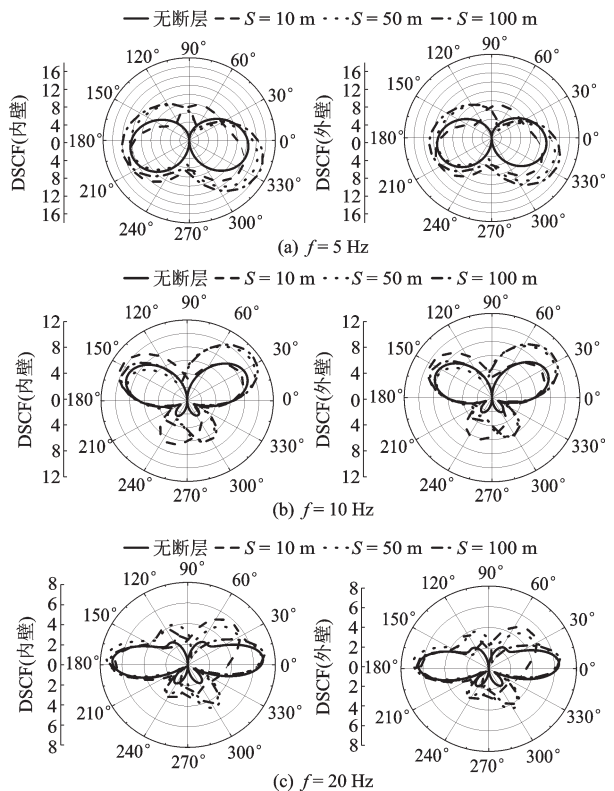


图7 SH波入射下与断层不同距离衬砌表面环向应力幅值(模型2)  
Fig.7 Annular stress amplitude of lining surface at different distance to the fault under incident SH wave (model 2)

#### 4.2.3 SH波入射下不同入射角度衬砌表面环向应力幅值

图8给出了SH波入射下,SH波不同入射角度对应的衬砌内外表面的环向应力集中因子。断层倾角 $\alpha=45^\circ$ ,断层与隧道的水平距离 $S=50\text{ m}$ 。入射频率 $f=5、10、20\text{ Hz}$ ,入射角度 $\theta=0^\circ、30^\circ、60^\circ、90^\circ$ , $S=50\text{ m}$ 。整体上看,各频率SH波不同角度入射时,动应力集中因子最大值一般出现在波水平入射的情况,如 $f=10\text{ Hz}$ ,内外壁的应力幅值达到12.0和11.0,内外壁的应力增幅分别为7.14%和6.80%;

随着入射角度的增大,衬砌内外壁的动应力呈现先减小再增大的趋势,SH波以 $30^\circ$ 入射时,衬砌动应力最小;随着SH波入射频率的增大,波动能量在隧道附近集中效应更显著,动力集中因子峰值逐渐减小,如 $f=20\text{ Hz}$ , $S=50\text{ m}$ ,SH波垂直入射时,内外壁的应力幅值只有7.4和6.9。

### 4.3 衬砌环向应力云图

图9~14为隧道位于断层上盘和下盘时SH波入射下考虑断层倾角变化对应的衬砌隧道的应力特征云图。SH波垂直入射,入射频率 $f=5、10、20\text{ Hz}$ ,衬砌隧道与断层的水平距离 $S=10\text{ m}$ 。

根据边界积分方程理论进行大量计算,探究不同的变量因子(距离、断层倾角、入射角度和频率)作用时衬砌隧道的动应力集中因子的数值变化规律。由图9~14可知,衬砌隧道的应力特征云图由多种影响因子(隧道位于断层的上盘还是下盘、断层的倾角、隧道与断层的距离、入射波频率、入射角度等)决定,可以看出,内壁应力要大于外壁,并且衬砌不同位置处应力幅值差异明显,在衬砌的左右两侧和拱肩、拱脚的应力集中较为明显,衬砌的顶部和底部应力因子较小。当隧道处于断层破碎带下盘时,对衬砌的应力幅值和空间分布特征影响显著,并且在低频时影响更为显著。

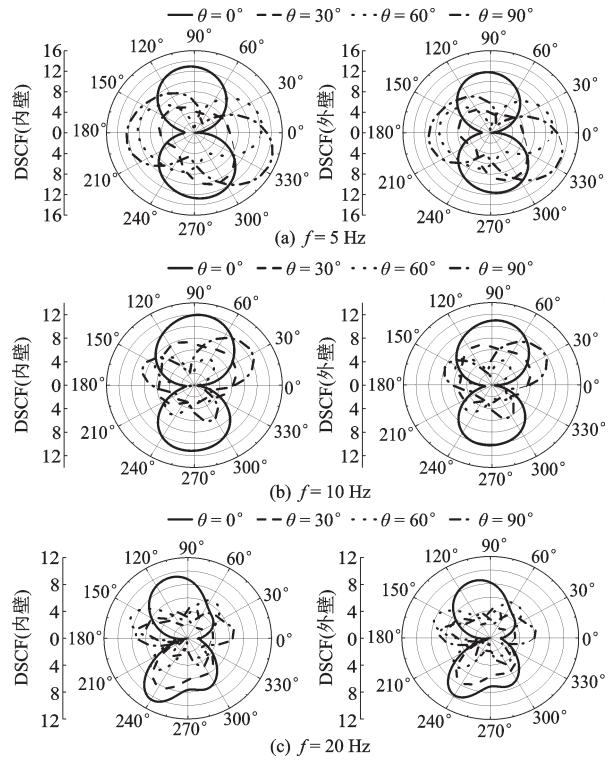


图8 SH波入射下不同入射角度衬砌表面环向应力幅值(模型2)

Fig.8 Annular stress amplitude of lining surface at different incident angles under SH wave incidence (model 2)

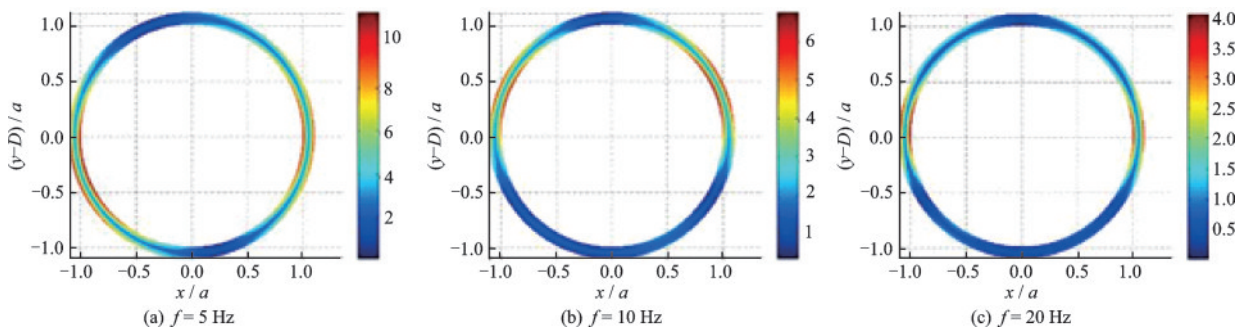


图9 SH波垂直入射下环向应力云图(模型1,  $\alpha=30^\circ$ )

Fig.9 Annular stress cloud diagram under normal incidence of SH wave (model 1,  $\alpha=30^\circ$ )

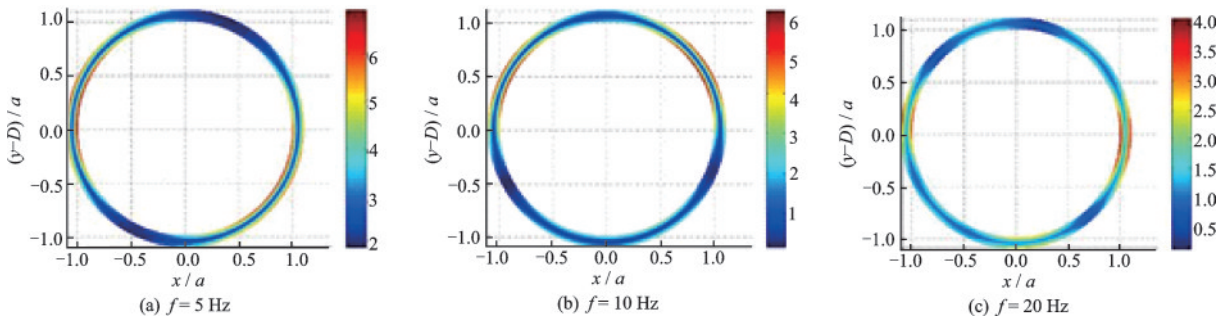


图10 SH波垂直入射下环向应力云图(模型1,  $\alpha=45^\circ$ )

Fig.10 Annular stress cloud diagram under normal incidence of SH wave (model 1,  $\alpha=45^\circ$ )

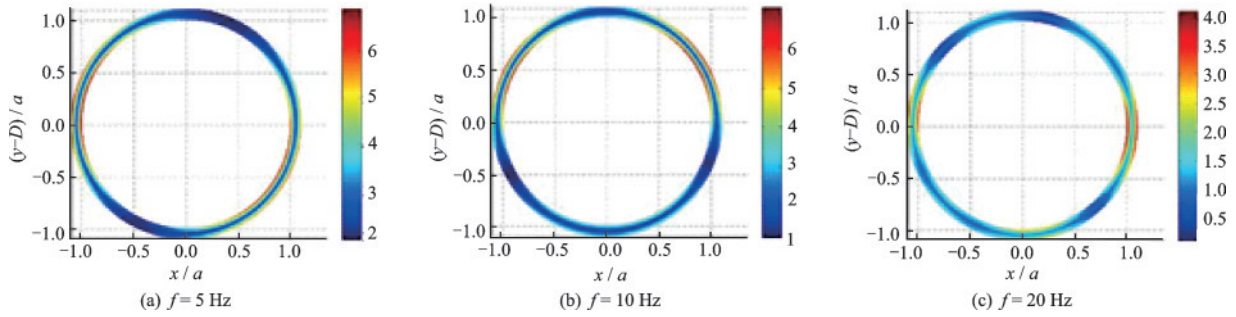


图 11 SH波垂直入射下环向应力云图(模型 1,  $\alpha=60^\circ$ )

Fig.11 Annular stress cloud diagram under normal incidence of SH wave (model 1,  $\alpha=60^\circ$ )

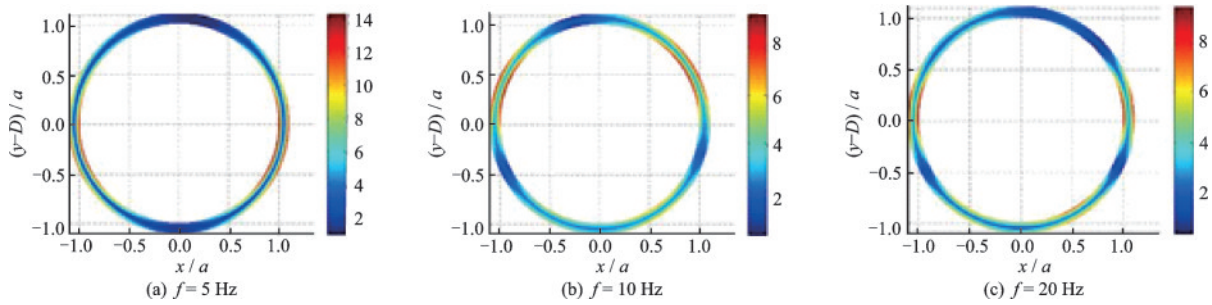


图 12 SH波垂直入射下环向应力云图(模型 2,  $\alpha=30^\circ$ )

Fig.12 Annular stress cloud diagram under normal incidence of SH wave (model 2,  $\alpha=30^\circ$ )

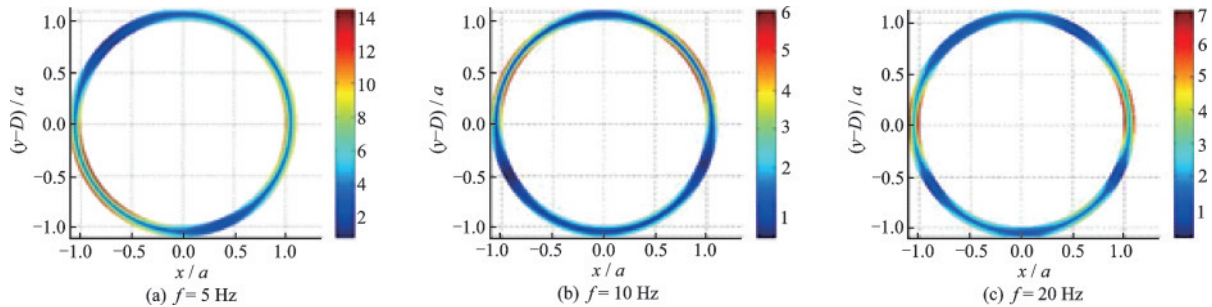


图 13 SH波垂直入射下环向应力云图(模型 2,  $\alpha=45^\circ$ )

Fig.13 Annular stress cloud diagram under normal incidence of SH wave (model 2,  $\alpha=45^\circ$ )

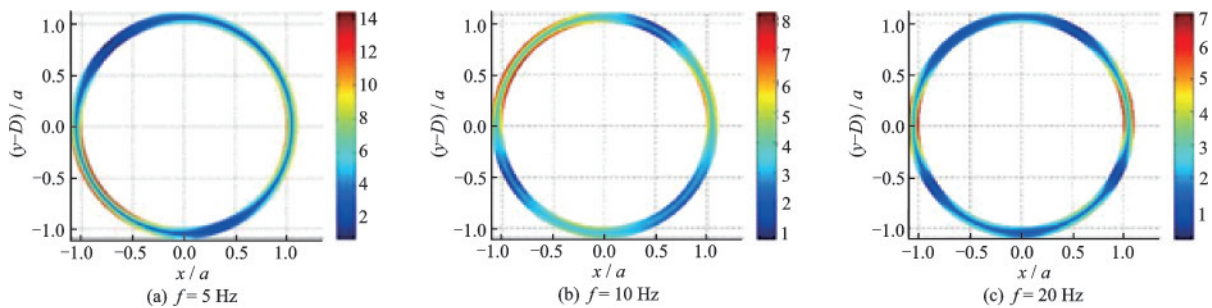


图 14 SH波垂直入射下环向应力云图(模型 2,  $\alpha=60^\circ$ )

Fig.14 Annular stress cloud diagram under normal incidence of SH wave (model 2,  $\alpha=60^\circ$ )

## 5 结 论

通过 MATLAB 建立模型,运用高精度的间接

边界积分方程法,对断层破碎带-衬砌隧道(刚性)的整体地震反应进行了二维计算模拟和参数分析,对比了衬砌隧道位于倾斜断层的上盘和下盘两种情况,研究了平面 SH 波对断层破碎带-衬砌隧道之间

相互作用的影响。并进一步研究了断层的倾斜角度、入射波的频率以及隧道和断层破碎带之间的距离等因素对该复杂场地之间相互作用的影响,研究结果表明:

(1)断层破碎带与衬砌洞室地震相互作用是真实存在的,断层破碎带对衬砌内外壁动应力集中程度具有显著影响。

(2)断层破碎带作为“二次振源”,使得衬砌隧道地表土层地震动发生空间重分布,但对地震动的放大或者缩小程度需根据不同参数进行具体讨论。总体上不同断层倾角、隧道与断层的不同距离和SH波不同入射角度对衬砌内外壁的应力分布特征具有明显的影响。

(3)从内外壁的应力对比可以看出一般规律,即内壁的应力要大于外壁的应力,且内外壁的应力曲线特征较为相似。

(4)隧道位于断层破碎带上盘时,破碎带对隧道结构的动力放大作用不明显,隧道的地震破坏程度比位于下盘要轻。从总体上看,位于断层下盘的衬砌隧道在低频段放大效应更为明显,部分频率处相比无断层达到30%的放大。

本研究有助于更好地理解复杂空间中波的传播和散射规律,对于揭示地震波作用下实际地下隧道动力响应和波散射规律具有重要意义,可为地下结构物的抗震设计、安全评估等提供部分理论依据。本文只研究了均匀半空间的断层破碎带,而实际情况中,近地表土层通常呈层状分布,土层的自振特性对地震动的幅值具有显著影响。因此可以将均匀半空间改为层状半空间,再进一步研究层状半空间中断层破碎带与衬砌隧道之间的动力关系。

## 参考文献:

[1] 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 J W, Feng L X, Ba Zh N. Amplification of plane SH wave by the site containing fault fracture zone [J]. Acta Seismologica Sinica, 2010, 32(3): 300-309. (in Chinese)

[2] Lee V W, Trifunac M D. Response of tunnels to incident SH-waves[J]. Journal of the Engineering Mechan-

ics Division, 1979, 105(4): 643-659.

- [3] 刘中宪,梁建文,张贺. 弹性半空间中衬砌洞室对平面P波和SV波的散射(II):数值结果[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(4):77-88.  
Liu Zh X, Liang J W, Zhang H. Scattering of P and SV waves by a lined tunnel in elastic half space (II): Numerical results [J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19(4): 77-88. (in Chinese)
- [4] 刘中宪,王楚楚,蒋坪临,等. 球面压缩波入射下深埋三维衬砌洞室的动应力集中效应[J]. 应用力学学报, 2017, 34(5):904-911.  
Liu Zh X, Wang Ch Ch, Jiang P L, et al. The dynamic stress concentration effect of deeply buried three-dimensional lining cavity under the spherical compression wave[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2017, 34(5): 904-911. (in Chinese)
- [5] 赵瑞斌,刘萌,刘中宪,等. 沉积谷中衬砌隧道对SH波的散射[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2 687-2 695, 2 705.  
Zhao R B, Liu M, Liu Zh X, et al. Scattering of SH wave by lining tunnel in sedimentary valley [J]. Geotechnical Mechanics, 2016, 37(9): 2 687-2 695, 2 705. (in Chinese)
- [6] 刘中宪,刘蕾,梁建文. 楔形空间中任意形状孔洞对平面SH波的散射:IBEM求解[J]. 固体力学学报, 2014, 35(3):292-301.  
Liu Zh X, Liu L, Liang J W. Scattering of plane SH wave by arbitrary shape holes in wedge space: IBEM solution [J]. Journal of Solid Mmechanics, 2014, 35(3): 292-301. (in Chinese)
- [7] 刘中宪,张征,梁建文. 弹性半空间中含黏性滑移界面圆形衬砌洞室对平面SH波的散射[J]. 应用力学学报, 2019, 36(2):379-385, 508-509.  
Liu Zh X, Zhang Zh, Liang J W. Scattering of plane SH waves by circular lining cavity containing viscous sliding interface in elastic half space [J]. Journal of Applied Mechanics, 2019, 36(2): 379-385, 508-509. (in Chinese)
- [8] 李廷春,吕连勋,刘建章,等. 基于隧道与断层破碎带距离因素的震害规律分析[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(1):52-61.  
Li T Ch, Lyu L X, Liu J Zh, et al. Analysis of seismic damage law based on the distance factor between tunnel and fault fracture zone [J]. Modern Tunnel Technology, 2016, 53(1): 52-61. (in Chinese)

(本文编辑:池营营)

(下转第605页)