

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240227002

# SH波入射下山体-断层破碎带-隧道相互作用分析\*

黄磊<sup>1,2</sup>, 周颜婷<sup>1</sup>, 刘中宪<sup>1,2</sup>, 段更月<sup>3</sup>, 张传秀<sup>1</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. 北京智宇天成设计咨询有限公司, 北京 100000)

**摘要:** 采用一种高精度间接边界积分方程法(IBIEM), 开展了山体-断层破碎带-隧道整体模型对地震波的散射作用模拟, 考虑了三种影响因素: 入射波强度、隧道与断层破碎带间距以及破碎带动力特性, 模拟了其山体表面及隧道地震动力响应的影响。研究结果表明: 断层破碎带的存在使得山体-断层破碎带-隧道整体系统内相互作用更加复杂, 山体表面位移幅值以及隧道的位移和应力幅值主要呈现放大效应, 山体表面断层破裂处破坏异常严重, 位移幅值陡增, 可达10以上; 在衬砌的拱肩、拱脚处的应力集中较为明显, 衬砌的顶部和底部应力较小; 地震波低频入射时, 隧道内外壁应力和位移曲线较平缓, 随着入射频率的增大, 波的相干效应更加明显, 衬砌隧道应力和位移发生空间重分布, 出现峰值多段集中现象。

**关键词:** 山体; 断层破碎带; 隧道; 地震波散射

**中图分类号:** P315.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)04-0870-11

## Analysis of the Interaction between Mountains-fault Zones-tunnels under SH Wave Incidence

HUANG Lei<sup>1,2</sup>, ZHOU Yanting<sup>1</sup>, LIU Zhongxian<sup>1,2</sup>, DUAN Gengyue<sup>3</sup>, ZHANG Chuanxiu<sup>1</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. Beijing Zhiyu Tiancheng Design Consulting Co., LTD., Beijing 100000, China)

**Abstract:** A high-precision indirect boundary integral equation method (IBIEM) was adopted to simulate the scattering effect of seismic waves on the mountain-fault fracture zone-tunnel model, considering three influencing factors: incident wave intensity, the distance between the tunnel and fault fracture zone, and the dynamic characteristics of the fracture zone. The impact of these factors on the seismic dynamic response of the mountain surface and tunnel was analyzed. The results showed that the presence of the fault fracture zone complicated the interactions within the mountain-fault fracture zone-tunnel system. The displacement amplitude of the mountain surface, as well as the displacement and stress amplitude of the tunnel, primarily exhibited magnification effects. Damage was particularly severe at the fracture of the mountain surface, with displacement amplitudes sharply increasing to more

\* 收稿日期: 2024-02-27; 修回日期: 2024-04-09

基金项目: 天津市教委科研项目(2020KJ039)资助

作者简介: 黄磊(1989—), 女, 讲师, 硕导, 博士。主要从事地震工程、工程波动方面的研究。E-mail: huanglei1289@163.com

通信作者: 刘中宪(1982—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事地震工程、工程波动方面的研究。

E-mail: zhongxian1212@163.com

than 10 units. Stress concentration was more notable at the spandrel and arch foot of the lining, while stress at the top and bottom of the lining was relatively small. When seismic waves were incident at low frequencies, the stress and displacement curves of the tunnel's inner and outer walls were relatively smooth. As the incidence frequency increased, the coherence effect of the wave became more pronounced, causing spatial redistribution in the lined tunnel, with peak values concentrated in multiple sections. The research results can provide a theoretical basis for seismic design of tunnel structures near fault fracture zones in mountains.

**Keywords:** mountains; fault fracture zone; tunnels; seismic wave scattering

## 0 引言

随着我国中西部地区基础设施建设的推进,城市轨道交通、高速铁路(公路)建设蓬勃发展,一些长大隧道在规划选线时,不可避免地穿越山体地形。并且山区内,在断层或裂隙密集带所造成的岩石强烈破碎的地段,会形成断层破碎带。地震活动会对断层破碎带附近的基础设施造成不利影响<sup>[1-5]</sup>。例如,1978年伊豆大岛近海发生了7级地震,震中附近的隧道横断方向发生了剪切错位,无筋混凝土衬砌的拱顶被压坏,影响范围波及到断层前后的300 m左右<sup>[4]</sup>;1995年日本兵库县南部地震,横尾山断层造成隧道产生环切变形,断层滑动致使隧道产生了复杂应力,边墙出现多条裂缝<sup>[5]</sup>。

针对山体隧道结构的震动动力响应问题,国内外学者采用振动台试验法、有限元法和边界元法做出了许多的贡献。李育枢<sup>[6]</sup>、申玉生等<sup>[7]</sup>、H. Xu等<sup>[8]</sup>通过大型振动台试验进行了山岭隧道震动动力响应及减震措施研究;采用有限元方法,喻凌峰<sup>[9]</sup>、皇民等<sup>[10]</sup>研究了不同埋深或间距的山岭隧道结构的地震响应规律及破坏机理;Z. X. Liu等<sup>[11-12]</sup>、H. Alielahi等<sup>[13]</sup>、A. Amornwongpaibun等<sup>[14]</sup>采用边界元法给出了山体-隧道模型对地震波的散射作用及山体、隧道相互作用规律。以上研究均是针对均质山体隧道模型,未考虑断层破碎带的影响,然而地震波在山体、断层破碎带、隧道间会发生多次的反射、散射及相干效应,使地震动力响应更为复杂,严重影响隧道结构的地震安全性,研究山体断层破碎带附近隧道结构的地震动响应规律具有重要的现实意义<sup>[15]</sup>。据作者所知,目前靠近断层破碎带的穿山隧道模型对地震响应的研究非常有限,仅杨长卫等<sup>[16]</sup>采用振动台模型试验法,建立了跨断裂带的山岭隧道缩尺模型,研究了隧道洞口的地震动响应。

为了探究山体断层破碎带附近的隧道对地震波散射的规律,本文采用间接边界元法,进行了“山体-断层破碎带-隧道”系统地震动整体响应分析。与有限元法等域离散型方法相比,边界元方法具有自动满足无限远辐射条件、无高频频散、只需要将模型各边界进行离散、显著降低内存需求等优点<sup>[17-18]</sup>。通过一系列参数分析,定性分析了近断层破碎带的山岭隧道在地震作用下的空间分布规律,并定量揭示了入射波强度、隧道与断层破碎带间距以及破碎带剪切波速等参数对隧道地震动响应的影响,研究结论可为近断层的山岭隧道的布线规划和减隔震设计提供参考。

## 1 计算模型

如图1所示,山体存在断层破碎带,一穿山隧道位于断层破碎带上盘。破碎带长度为 $a$ ,厚度为 $b$ ,高度为 $h$ ,倾角为 $\theta$ ,向上延伸破裂至山体表面。圆形隧道的内外半径分别为 $r_1$ 、 $r_2$ ,隧道与断层破碎带的间距为 $S$ ,SH波自半空间入射,与竖向的夹角为 $\alpha$ ,本模型可以简化为结构截面上的平面应变问题。假设山体、隧道和断层破碎带均为各向同性的线弹性介质。各参数符号说明详见表1。

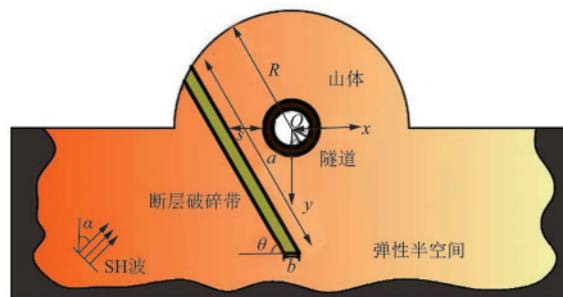


图1 山体-断层破碎带-隧道模型计算简图

Fig.1 Calculation diagram of mountain-fault fracture zone-tunnel model

表1 符号说明

Table 1 Description of symbols

符号	说明	符号	说明
$R$	山体半径	$a$	断层长度
$\zeta$	阻尼比	$b$	断层宽度
$\theta$	断层倾角	$L_1$	半空间地表面
$\alpha$	SH波入射角	$L_2$	山体地表面
$D_1, D_2, D_3$	半空间域、断层域和隧道域	$L_3$	断层破碎带边界
$\nu_1, \nu_2, \nu_3$	$D_1, D_2, D_3$ 域的泊松比	$L_5$	衬砌隧道外壁
$\mu_1, \mu_2, \mu_3$	$D_1, D_2, D_3$ 域的剪切模量	$L_4$	衬砌隧道内壁
$\rho_1, \rho_2, \rho_3$	$D_1, D_2, D_3$ 域的密度	$\eta$	入射频率
$V_{s1}, V_{s2}, V_{s3}$	$D_1, D_2, D_3$ 域的剪切波速		

## 2 计算方法与求解

### 2.1 波场构造

基于弹性波动理论,总波场可分解为自由波场和散射波场。自由波场为弹性波入射下对于不含断层破裂带、隧道等散射地形的半空间波场解答;散射波场通过在山体、断层破碎带、隧道各边界面上施加虚拟荷载,构造产生(如图2所示)。总位移场和总应力场可表示为:

$$u = u^f + u^s \quad (1)$$

$$t = t^f + t^s \quad (2)$$

式中, $u, t$ 分别为总位移和总应力;上角标f,s分别表示自由场和散射场, $u^f, t^f$ 分别为自由场的位移和应

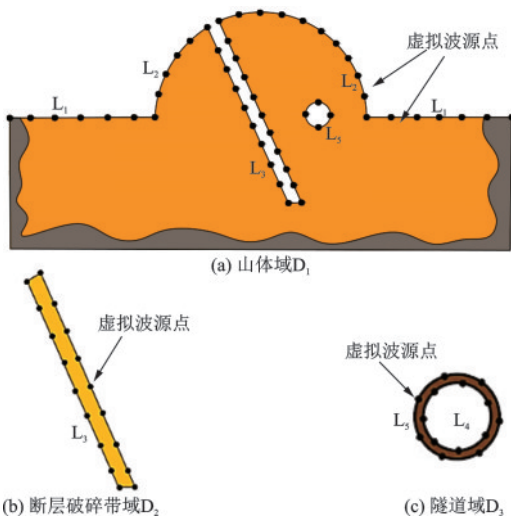


图2 山体-断层破碎带-隧道分域离散与散射波场构造  
Fig.2 Domain division and scattered wave field construction of mountain-fault fracture zone-tunnel

力; $u^s, t^s$ 分别为散射场的位移和应力。

根据单层位势理论,散射波引起的散射体内任一点的位移、应力可表达为:

$$u_i(x) = \int_S \phi_j(\xi) G_{ij}(x, \xi) dS_\xi \quad (3)$$

$$t_i(x) = \int_S \phi_j(\xi) T_{ij}(x, \xi) dS_\xi \quad (4)$$

式中, $m=1,2,3$ ,代表不同计算域; $i, j=x, y$ ; $\xi \in S, S$ 为虚拟荷载面; $\phi_j(\xi)$ 为虚拟波源点 $\xi$ 处的波源密度; $G_{ij}(x, \xi)$ 和 $T_{ij}(x, \xi)$ 分别为位移格林函数和应力格林函数; $dS_\xi$ 为 $S$ 上 $\xi$ 处附近的积分微元。

### 2.2 边界条件的建立与求解

本文采用间接边界积分方法,对山体-断层破碎带-隧道的波动状态进行模拟,采用弹性半空间动力格林函数,自由地表零应力边界条件自动满足,只需要建立各域交界面处的位移应力连续边界条件。边界条件具体可以表述如下:

(1) 山体域 $D_1$ 与断层破碎带域 $D_2$ 在边界 $L_3$ 上应力位移连续:

$$t_{D_1}^f + t_{D_1}^s = t_{D_2}^s \quad (5)$$

$$u_{D_1}^f + u_{D_1}^s = u_{D_2}^s \quad (6)$$

(2) 山体域 $D_1$ 与隧道域 $D_3$ 在边界 $L_5$ 上应力位移连续:

$$t_{D_1}^f + t_{D_1}^s = t_{D_3}^s \quad (7)$$

$$u_{D_1}^f + u_{D_1}^s = u_{D_3}^s \quad (8)$$

(3) 隧道内壁边界 $L_4$ 应力为0:

$$t_{D_3}^s = \mu \frac{\partial u_{D_3}^s}{r \partial r} = 0 \quad (9)$$

根据计算模型边界条件方程式(5)~(9)和散射场位移应力表达式(3)~(4),可以将边界条件表示为如下积分表达式:

$$\int_S \phi_j^{D_1}(\xi) T_{ij}^{D_1}(x, \xi) dS_\xi - \int_S \phi_j^{D_2}(\xi) T_{ij}^{D_2}(x, \xi) dS_\xi = -t_{D_1}^f \quad i, j = x, y \quad (10)$$

$$\int_S \phi_j^{D_1}(\xi) G_{ij}^{D_1}(x, \xi) dS_\xi - \int_S \phi_j^{D_2}(\xi) G_{ij}^{D_2}(x, \xi) dS_\xi = -u_{D_1}^f \quad i, j = x, y \quad (11)$$

$$\int_S \phi_j^{D_1}(\xi) T_{ij}^{D_1}(x, \xi) dS_\xi - \int_S \phi_j^{D_3}(\xi) T_{ij}^{D_3}(x, \xi) dS_\xi = -t_{D_1}^f \quad i, j = x, y \quad (12)$$

$$\int_S \phi_j^{D_1}(\xi) G_{ij}^{D_1}(x, \xi) dS_\xi - \int_S \phi_j^{D_3}(\xi) G_{ij}^{D_3}(x, \xi) dS_\xi = -u_{D_1}^f \quad i, j = x, y \quad (13)$$

$$\int_S \phi_j^{D_3}(\xi) T_{ij}^{D_3}(x, \xi) dS_\xi = 0 \quad i, j = x, y \quad (14)$$

将山体、断层破碎带和衬砌隧道各边界面进

$$\sum_{m1=1}^{N_{D_1}} \phi_j^{D_1}(\xi_{m1}) g_{ij}^{D_1}(x_{n3}, \xi_{m1}) - \sum_{m2=1}^{N_{D_2}} \phi_j^{D_2}(\xi_{m2}) g_{ij}^{D_2}(x_{n3}, \xi_{m2}) = -u_{D_1,ij}^f, \quad n3=1, N_3, i, j = x, y \quad (15)$$

$$\sum_{m1=1}^{N_{D_1}} \phi_j^{D_1}(\xi_{m1}) t_{ij}^{D_1}(x_{n3}, \xi_{m1}) - \sum_{m2=1}^{N_{D_2}} \phi_j^{D_2}(\xi_{m2}) t_{ij}^{D_2}(x_{n3}, \xi_{m2}) = -t_{D_1,ij}^f, \quad n3=1, N_3, i, j = x, y \quad (16)$$

$$\sum_{m1=1}^{N_{D_1}} \phi_j^{D_1}(\xi_{m1}) g_{ij}^{D_1}(x_{n5}, \xi_{m1}) - \sum_{m3=1}^{N_{D_3}} \phi_j^{D_3}(\xi_{m3}) g_{ij}^{D_3}(x_{n5}, \xi_{m3}) = -u_{D_1,ij}^f, \quad n5=1, N_5, i, j = x, y \quad (17)$$

$$\sum_{m1=1}^{N_{D_1}} \phi_j^{D_1}(\xi_{m1}) t_{ij}^{D_1}(x_{n5}, \xi_{m1}) - \sum_{m3=1}^{N_{D_3}} \phi_j^{D_3}(\xi_{m3}) t_{ij}^{D_3}(x_{n5}, \xi_{m3}) = -t_{D_1,ij}^f, \quad n5=1, N_5, i, j = x, y \quad (18)$$

$$\sum_{m3=1}^{N_{D_3}} \phi_j^{D_3}(\xi_{m3}) t_{ij}^{D_3}(x_{n4}, \xi_{m3}) = 0, \quad n4=1, N_4, \quad i, j = x, y \quad (19)$$

式中,  $N_{D_1} = N_1 + N_2 + N_3 + N_5$ ,  $N_{D_2} = N_3$ ,  $N_{D_3} = N_4 + N_5$ 。

$$t_{ij}(x_n, \xi_m) = \frac{1}{2} \delta_{ij} + \int_{\xi_n - \frac{\Delta s}{2}}^{\xi_n + \frac{\Delta s}{2}} T_{ij}(x_n, \xi_m) dS_\xi \quad (20)$$

$$g_{ij}(x_n, \xi_m) = \int_{\xi_n - \frac{\Delta s}{2}}^{\xi_n + \frac{\Delta s}{2}} G_{ij}(x_n, \xi_m) dS_\xi \quad (21)$$

当  $x \neq \xi$  时, 利用高斯积分法求解上式中  $t_{ij}(x_n, \xi_m)$  和  $g_{ij}(x_n, \xi_m)$ ; 当  $x = \xi$  时, 虚拟荷载作用于本单元, 为了避免奇异性, 利用格林函数展开式进行解析积分求解:

$$t_{ij}(x_n, \xi_m) = \frac{1}{2} \delta_{ij} \quad (22)$$

$$g_{ij}(x_n, \xi_m) = \int_{-\Delta s/2}^{\Delta s/2} -\frac{i}{4\mu} H_0^{(2)}(ks) ds = -\frac{i\Delta s}{4\mu} \left[ 1 + i\frac{2}{\pi} (1 - \gamma - \lg(\frac{k\Delta s}{4})) \right] \quad (23)$$

式中,  $i$  为虚数单位;  $\delta_{ij}$  为 Delta 函数;  $\gamma$  为 Euler 常数 (一般取 0.577 2);  $k$  为入射波波数;  $\mu$  为拉梅常数;  $\Delta s$  为边界离散单元长度。

根据上述边界条件建立方程, 求解方程即可得出每个单元上虚拟荷载的密度, 格林函数乘以虚拟荷载密度即可得到散射波场。散射场与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, 这个特点可以看作对惠更斯原理的直接实现。

### 3 精度验证

本文研究的山体内近断层隧道对平面 SH 波的

行离散, 如图 2 所示, 将边界  $L_1 \sim L_5$  对应离散点数为  $N_1 \sim N_5$ , 式 (10) ~ (14) 可表示为如下离散形式:

散射问题, 目前还没有精确解, 因此本文将模型进行退化验证。

(1) 首先将本文模型退化为山体内无断层情况, 即定义断层内外材料参数相同, 与现有文献结果 [19] 进行对比。模型参数取值为: 山体半径为  $R$ , 隧道外径为  $r_1$ , 隧道内径  $r_2$ ,  $R/r_1 = 10$ ,  $r_1/r_2 = 10/9$ , 山体和隧道密度比  $\rho_1/\rho_2 = 4/5$ , 剪切模量比  $\mu_1/\mu_2 = 1/5$ , 地震波垂直入射, 无量纲频率  $\eta = 1$  ( $\eta = \omega R/\pi V_s$ ,  $\omega$  为圆频率,  $V_s$  为剪切波速)。图 3(a) 给出了山体表面的位移幅值, 可以看出本文计算方法所得结果与已有结果吻合良好, 证明了该方法与程序的正确性和计算精度。

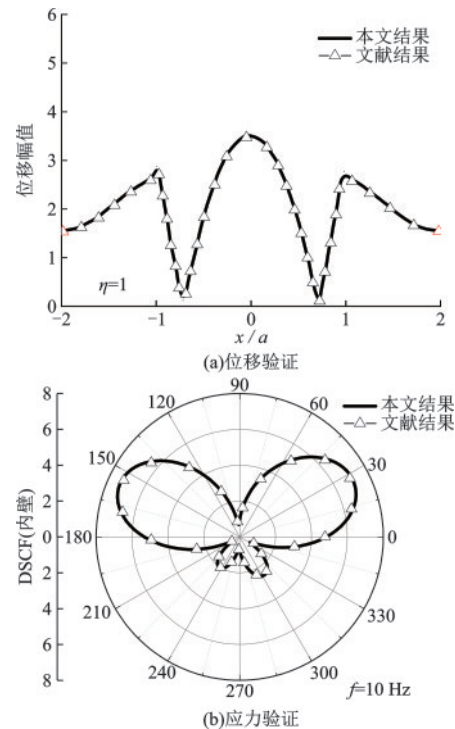


图 3 本文结果与文献结果 [19, 21] 对比

Fig.3 Comparison between the results of this paper and those of other literature

(2)然后将本文模型退化为半空间断层附近隧道模型,即定义山体高度为0,与现有文献结果[2]进行对比。模型参数取值为:断层宽度50 m,长度1 000 m,倾角 $\theta=60^\circ$ ,隧道内半径 $r_1=5$  m,隧道外半径 $r_2=5.5$  m,断层、隧道剪切波速分别为240、2 400 m/s,密度分别为1 800、2 500 kg/m<sup>3</sup>,地震波垂直入射,入射频率 $f=10$  Hz。图3(b)给出了隧道内壁出平面剪应力,可以看出本文计算方法所得结果与已知结果吻合良好,进一步证明了该方法

与程序的正确性和计算精度。

## 4 算例分析

本算例采用间接边界积分方程法,考虑了断层破碎带剪切波速、断层与隧道间距、SH波不同入射频率对隧道剪应力幅值、隧道位移及山体表面位移的影响。参数设置见表2。

表2 山体-断层破碎带-隧道模型计算参数

Table 2 Calculation parameters of mountain-fault fracture zone-tunnel model

	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	剪切波速/(m·s <sup>-1</sup> )	山体半径/m	长度/m	宽度/m	倾角/(°)	内径/m	外径/m
山体	2 000	1 200	100	—	—	—	—	—
断层	1 800	400/600/800	—	1 000	20	60	—	—
隧道	2 500	2 400	—	—	—	—	6.7	7.2

### 4.1 山体表面地震响应规律

图4给出了SH波入射下,断层地形以及断层剪切波速对山体表面位移幅值的影响,图中横坐标为山体地表各观测点位 $x/a$ ,纵坐标为地表位移幅值。断层与隧道间距 $S=45$  m,地震波垂直入射 $\alpha=0^\circ$ ,入射无量纲频率 $\eta=0.25, 0.5, 1, 2, 5, 10$ ,断层剪切波速 $V_{s2}=400, 600, 800$  m/s及无断层情况。

从图4可以看出:整体上看,断层的存在对地表位移幅值影响较大,主要表现为放大效应,随着频

率 $\eta$ 的增加位移幅值曲线震荡加剧。如当频率 $\eta$ 分别取0.25和0.5时,无断层地形的位移幅值峰值为3.28和2.74,剪切波速为400 m/s断层地形的位移幅值峰值为4.68和3.43,放大效果分别达44%和25.2%。另外,对比图中断层不同介质参数,总体上看,软质断层即剪切波速 $V_{s2}$ 越小,地表位移幅值的放大越明显。如当频率 $\eta=0.25$ 时,不同剪切波速相比,无断层情况地表位移峰值为3.25,断层剪切波速分别为400、600、800 m/s情况地表位

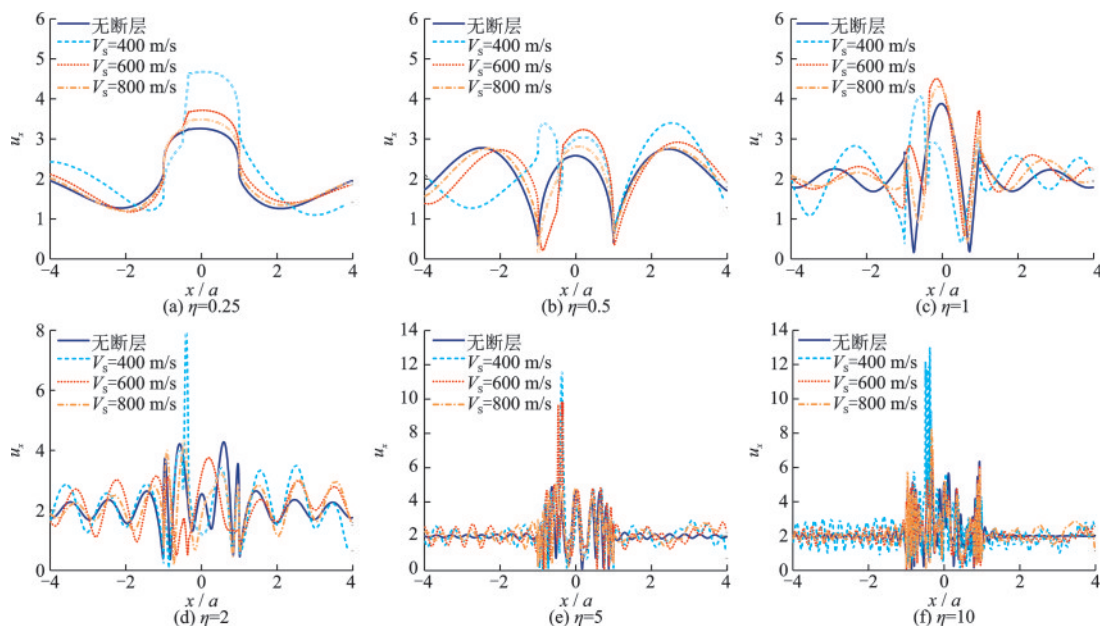


图4 SH波入射下山体表面位移幅值

Fig.4 Surface displacement amplitude of the mountain under SH wave incidence

移峰值分别为4.68、3.71、3.48。剪切波速越大,较硬质断层的位移幅值曲线趋势逐渐贴近无断层的曲线趋势。山体表面位移幅值( $x/a=-1\sim 1$ )明显大于山体外侧地表位移幅值。高频入射时,山体表面断层破裂处,位移幅值陡增,破坏异常严重, $\eta=2、5、10$ 时,对应位移峰值可达7.98、11.86、12.86,在山体表面断层破裂处不宜建造甲、乙、丙类建筑物。

## 4.2 衬砌隧道地震响应规律

### 4.2.1 断层破碎带不同剪切波速对隧道地震响应规律的影响

#### (1)隧道应力响应

图5给出SH波入射下,不同断层剪切波速情况衬砌隧道内外壁的出平面剪应力。考虑了4种无量纲入射频率 $\eta=1、2、5、10$ ,地震波垂直入射 $\alpha=0^\circ$ ,

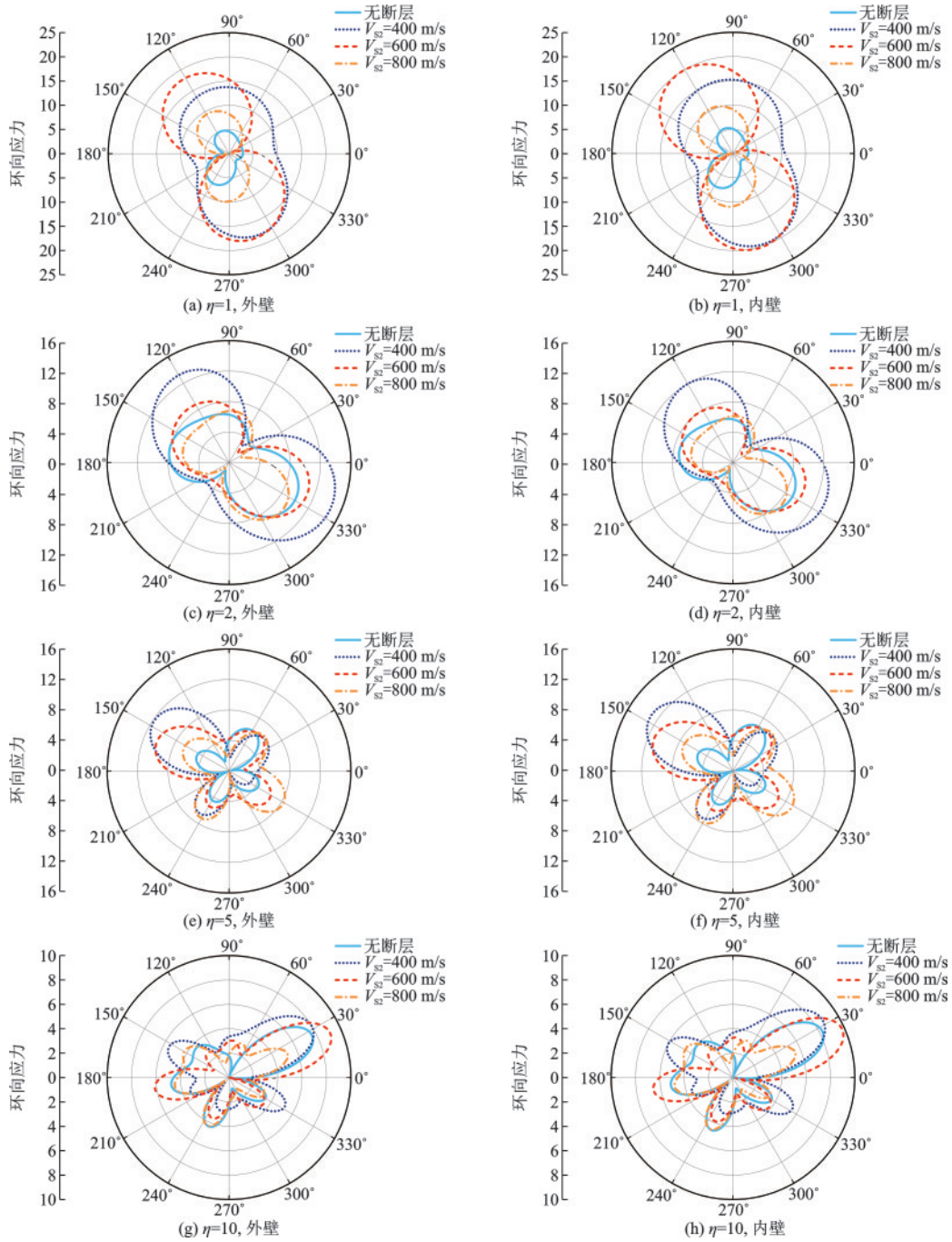


图5 不同断层剪切波速情况衬砌隧道内外壁的应力

Fig.5 Stress on the inner and outer walls of lined tunnels under different shear wave velocities of the faults

断层域剪切波速  $V_{s2}=400、600、800$  m/s 及无断层情况。

由图 5 可知,整体上看,由于波在山体、断层破碎带和衬砌隧道表面的多次散射叠加,反应规律更为复杂,断层的存在对隧道内外表面的剪应力具有放大效应。地震波低频入射时,隧道内外壁应力曲线较平缓,但应力集中效应显著。如图 5(a、c)所示,低频时无断层地形隧道外壁应力峰值分别为 6.97 和 9.97,断层地形 ( $V_{s2}=400$  m/s)隧道外壁应力峰值分别为 18.31 和 14.62,增幅为 162.7% 和 46.6%。随着入射频率的增大,波的相干效应更加明显,应力曲线震荡加剧,如图 5(g) 所示,高频时无断层和断层地形 ( $V_{s2}=400$  m/s)隧道外壁应力峰值分别为 7.63 和 9.06,增幅为 18.7%。

另外可以看出,隧道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,在衬砌的拱

肩、拱脚处的应力集中较为明显,衬砌的顶部和底部应力较小,在工程中应对隧道拱肩、拱脚处加强抗震设防。

### (2)隧道位移响应

图 6 给出 SH 波入射下,不同入射波频率和断层剪切波速下的衬砌隧道位移云图,断层与隧道间距为 45 m。主要探讨参数为入射波频率与断层剪切波速,地震波垂直入射  $\alpha=0^\circ$ ,无量纲频率  $\eta=1、2、5、10$ ,断层域剪切波速  $V_{s2}=400、600、800$  m/s。

从图 6 可以看出,较低频率入射时,衬砌隧道的位移放大区域集中在拱肩或拱脚处,随着入射频率的增加,衬砌隧道位移空间响应发生重分布,出现峰值多段集中现象。软质断层对低频入射波具有放大作用,随着断层剪切波速  $V_{s2}$  的增加,低频时衬砌隧道的位移峰值出现减小的现象,如图 6(a~c)所示,  $\eta=1$ ,  $V_{s2}$  分别取 400、600、800 m/s 时对应的衬

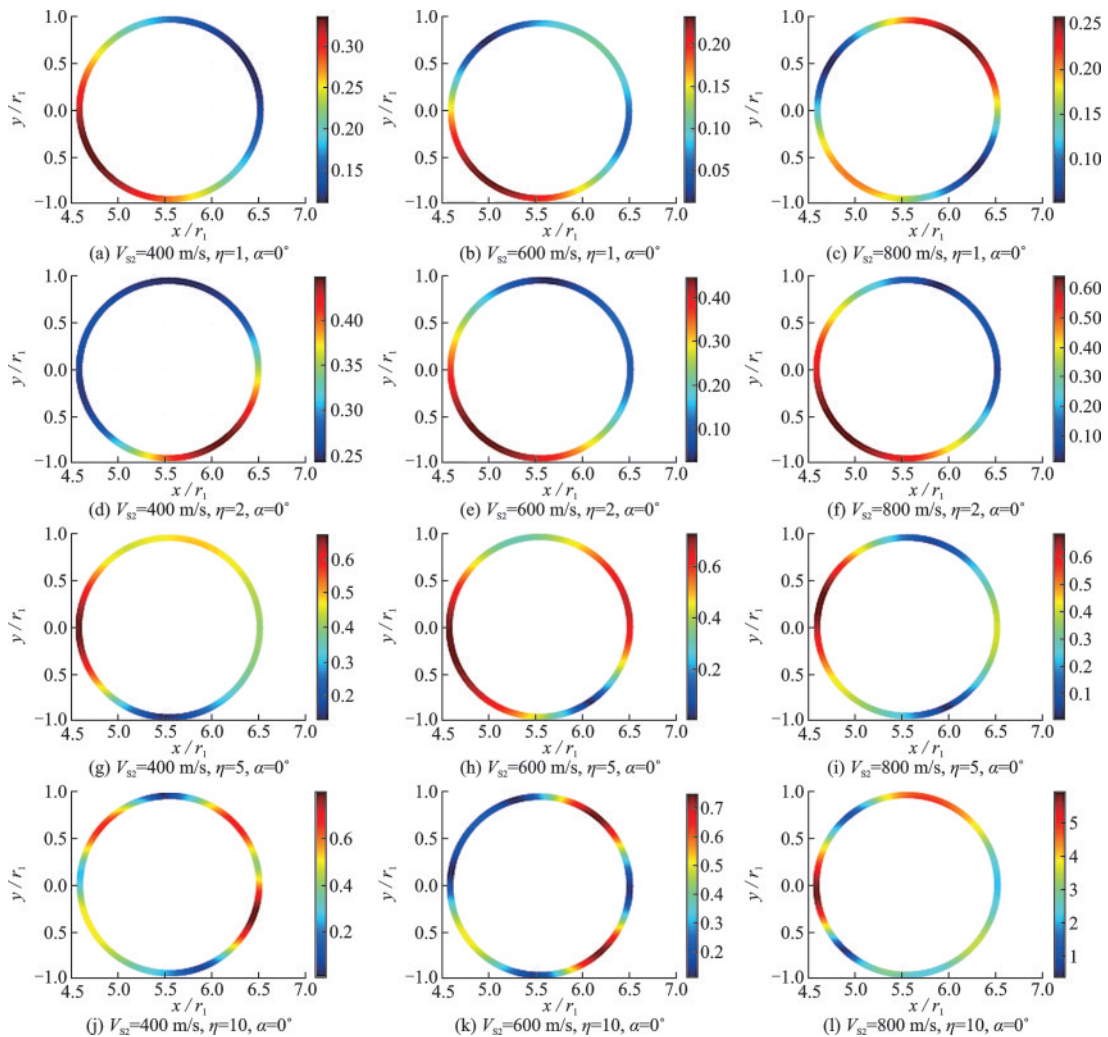


图 6 不同断层剪切波速情况衬砌隧道内外壁的位移云图

Fig.6 Displacement of lined tunnels under different shear wave velocities of faults

砌隧道位移峰值从0.35减小到0.26,减幅为25.7%; SH波高频入射时,较软断层对高频波有一定的滤波作用,如图6(j~l)所示,随着断层剪切波速的增加,衬砌隧道位移峰值从0.67增加到0.93。

#### 4.2.2 隧道与断层破碎带间距对隧道地震响应规律的影响

##### (1)隧道应力响应

图7给出SH波入射下,断层与隧道不同间距情

况衬砌隧道内外壁的剪应力幅值。考虑了4种无量纲入射频率 $\eta=1, 2, 5, 10$ ,地震波垂直入射 $\alpha=0^\circ$ ,断层与隧道间距 $S=30, 45, 60$  m及无断层情况。

由图7可知,断层与隧道的间距 $S$ 对衬砌隧道动力响应特征影响显著,主要表现为随着间距 $S$ 的增加,衬砌隧道应力峰值逐渐减小。低频时( $\eta=1$ ),如图7(b)所示,断层与隧道间距 $S$ 分别取30、45、60 m及无断层时,对应的衬砌隧道内壁应力

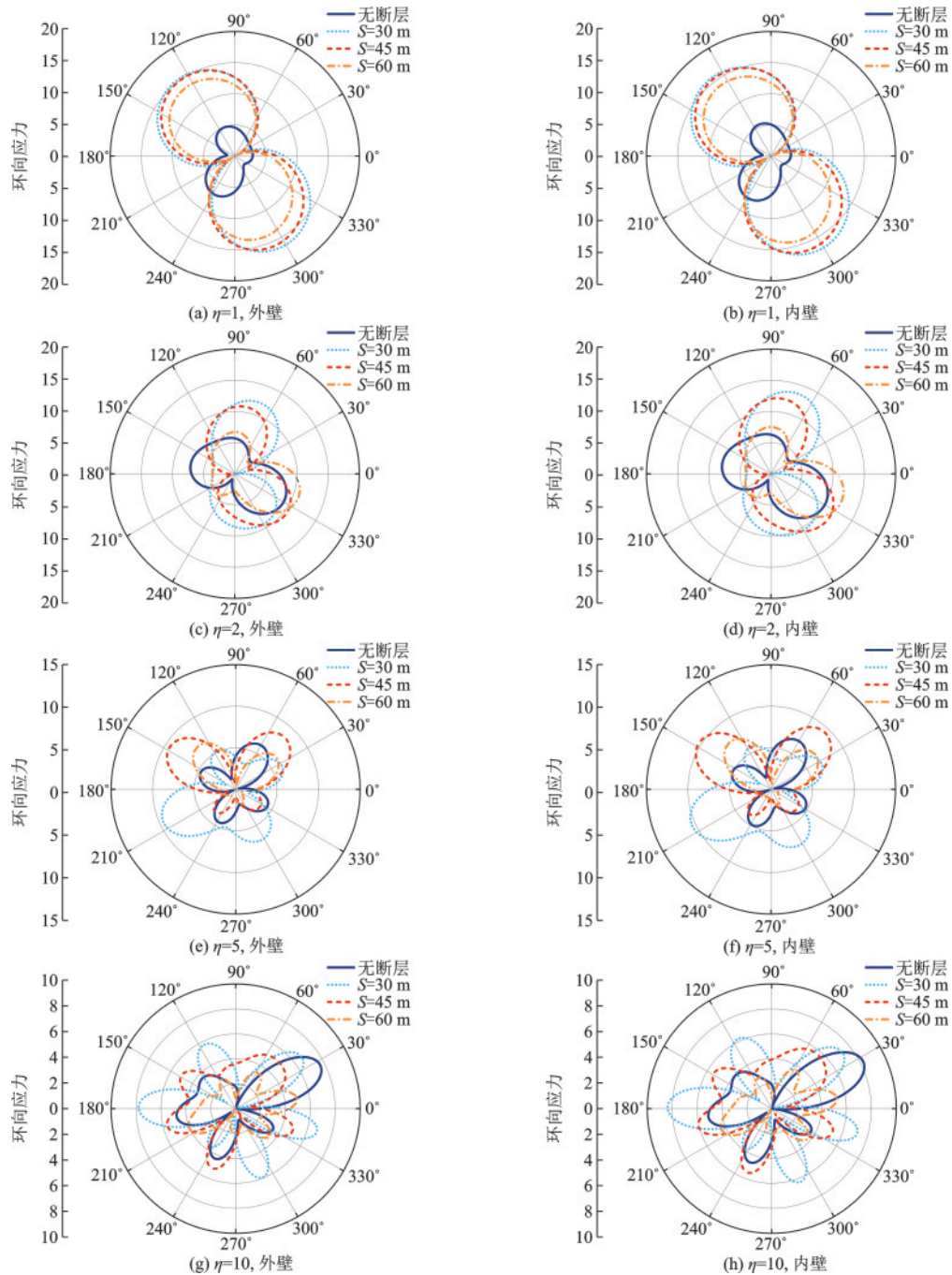


图7 不同断层距情况衬砌隧道内外壁的应力

Fig.7 Stress on the inner and outer walls of lined tunnels under different fault distances

峰值分别为16.9、16.2、14.3、7.67,这是由于随着断层与隧道间距的增加,相干作用减弱。较高频率时( $\eta=5$ ),隧道与断层破碎带间距对隧道应力的影响小于较低频率时,如图7(f)所示,断层与隧道间距 $S$ 分别取30、45、60 m及无断层时,对应的衬砌隧道内壁应力峰值分别为10.45、10.30、7.52、6.70。

### (2)隧道位移响应

图8给出SH波入射下,不同入射波频率和断层与隧道不同间距情况的衬砌隧道位移云图。主要探讨参数为入射波频率、隧道与断层破碎带间距,地震波垂直入射 $\alpha=0^\circ$ ,无量纲频率 $\eta=1、2、5、10$ ,断层与隧道间距 $S=30、45、60$  m。

从图8可以看出,随着断层与衬砌隧道间距 $S$

的增加,衬砌隧道位移逐渐减小。如图8(d~f)所示,随着断层与隧道间距的增大,即 $S$ 分别取30、45、60 m时对应的衬砌隧道位移峰值分别为0.48、0.41、0.38,这是由于随着衬砌隧道与断层间距的增加,相干作用减弱,距离越远,波源对相互作用的影响越小。地震波入射频率对衬砌隧道位移响应影响显著,随着入射频率的增加,衬砌隧道位移响应峰值也随之增大。如图8(c,f,i,l)所示,断层与隧道间距 $S=60$  m时,随着入射频率增大,即 $\eta=1、2、5、10$ 时对应的衬砌隧道位移峰值分别为0.22、0.35、0.43、1.2。低频时,隧道位移峰值主要出现在拱脚位置,随着入射频率的增加发生重分布,出现峰值多段集中现象。

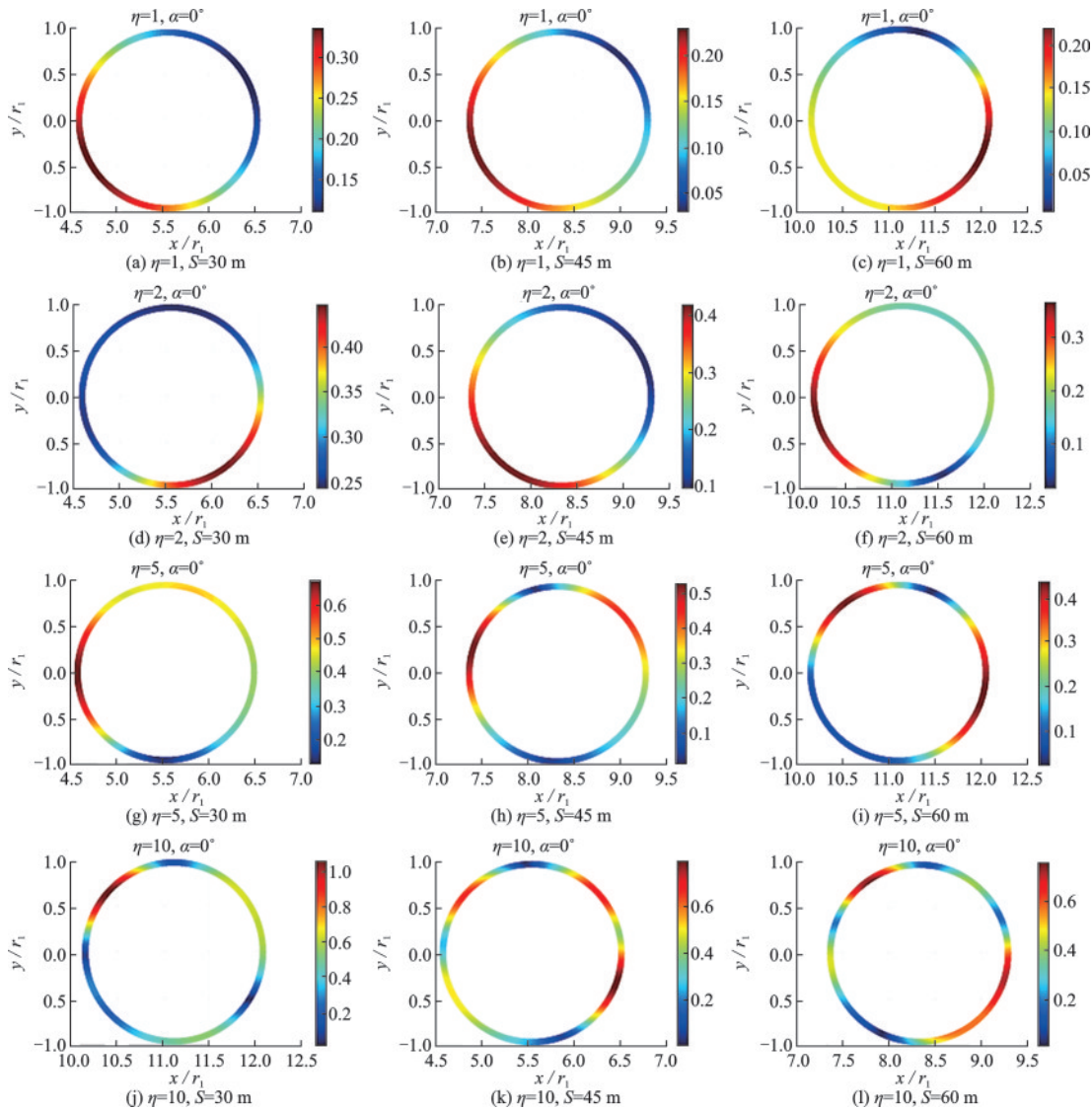


图8 不同断层距情况衬砌隧道的位移幅值

Fig.8 Displacement amplitude of lined tunnels under different fault distances

## 5 结 论

运用高精度的间接边界积分方程法,对山体-断层破碎带-衬砌隧道的整体地震反应进行了计算模拟和参数分析,研究了SH波入射时,入射波的频率、隧道和断层破碎带之间的距离、断层破碎带动力特性对山体和位于断层上盘隧道结构地震动力响应的影 响。得出的主要结论如下:

(1)断层的存在对附近的土层产生较大影响,使得山体-断层破碎带-隧道整体系统内相互作用更加复杂,随着断层与隧道间距的增大,相干作用减弱,衬砌隧道应力与位移峰值逐渐减小。

(2)断层破碎带附近的山体表面位移幅值呈现放大效应,软质断层对地表位移幅值的放大效应大于较硬质断层,山体表面断层破裂处破坏异常严重,位移幅值陡增,位移幅值可达10以上。

(3)断层对附近的衬砌隧道内外表面的出平面剪应力具有放大效应。隧道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,在衬砌的拱肩、拱脚处的应力集中较为明显,衬砌的顶部和底部应力较小。

(4)地震波低频入射时,隧道内外壁应力和位移曲线较平缓,随着入射频率的增大,波的相干效应更加明显,衬砌隧道应力和位移空间效应发生重分布,出现峰值多段集中现象。

### 参考文献:

[1] 彭述权,刘贤,樊玲,等.地震动和断层错动联合作用下隧道纵向响应解析[J].震灾防御技术,2023,18(2): 215-225.  
Peng S Q, Liu X, Fan L, et al. Analytical solution for the longitudinal response of tunnels under combined seismic-fault misalignment [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2023, 18(2): 215-225. (in Chinese)

[2] 刘中宪,刘佳乔,黄磊.近断层场地中衬砌隧道对平面SH波的散射[J].防灾减灾工程学报,2020,40(4): 556-565,605.  
Liu Z X, Liu J Q, Huang L. Scattering of plane SH wave by lining tunnel in near fault site [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(4): 556-565,605. (in Chinese)

[3] 张锴.穿越断层带多破裂面隧道地震动力响应及设防

分区研究[J/OL].铁道标准设计,2024: 1-11.  
Zhang K. Study on seismic dynamics response of tunnels through multirupture surfaces fault and fortification of partitions [J/OL]. Railway Standard Design, 2024: 1-11. (in Chinese)

[4] Asakura T, Sato Y. Damage to mountain tunnels in hazard area[J]. Soils and Foundations, 1996, 36: 301-310.

[5] Iai S. International Standard (ISO) on seismic actions for designing geotechnical worksan overview [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, 25 (7-10): 605-615.

[6] 李育枢.山岭隧道地震动力响应及减震措施研究-以国道318线黄草坪隧道为例[D].上海:同济大学,2006.  
Li Y S. Study on earthquake responses and vibration-absorption measures for mountain tunnel: a case study of Huangcaoping tunnel on no.318 national highway [D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese)

[7] 申玉生,高波,王峥峥.强震区山岭隧道振动台模型试验破坏形态分析[J].工程力学,2009,26(增1): 62-66.  
Shen Y S, Gao B, Wang Z Z. Failure mode analysis of mountain tunnel shake table test in high-intensity earthquake area [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26 (Sup1): 62-66. (in Chinese)

[8] Xu H, Li T B, Xia L, et al. Shaking table tests on seismic measures of a model mountain tunnel[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2016, 60: 197-209.

[9] 喻凌峰.山岭隧道不同埋深的结构动力响应特征及震害机理研究[J].现代隧道技术,2022,59(3): 227-235.  
Yu L F. Research on the characteristics of structural dynamic response and the seismic mechanism of mountain tunnels with different depths [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(3): 227-235. (in Chinese)

[10] 皇民,赵玉如,蔺世豪,等.洞室间距对双洞山岭隧道地震动力响应影响分析[J].河南理工大学学报(自然科学版),2021,40(2): 27-35.  
Huang M, Zhao Y R, Lin S H, et al. Analysis of the influence of interval between double tunnels on the seismic dynamic response of double mountain tunnels [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2021, 40(2): 27-35. (in Chinese)

[11] Liu Z X, Ai T C, Huang L, et al. Seismic dynamic response analysis of mountain tunnels with seismic reduction and isolation measures [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2023, 27(1): 109-121.

[12] Liu Z X, Zhang H, Cheng A, et al. Seismic interaction between a lined tunnel and a hill under  $P_1$  and SV waves by IBEM [J]. International Journal of Structural Stabili-

- ty and Dynamics, 2019, 19(2): 1950004.
- [13] Alielahi H, Adampira M. Evaluation of 2D seismic site response due to hill-cavity interaction using boundary element technique [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2018, 22(6): 1137-1167.
- [14] Amornwongpaibun A, Luo H, Lee V W. Scattering of anti-plane (SH) waves by a shallow semi-elliptical-hill with a concentric elliptical tunnel [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2016, 20(3): 363-382.
- [15] 高玉峰, 代登辉, 张宁. 河谷地形地震放大效应研究进展与展望 [J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(4): 734-752.
- Gao Y F, Dai D H, Zhang N. Progress and prospect of topographic amplification effects of seismic wave in Gan-yon sites [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(4): 734-752. (in Chinese)
- [16] 杨长卫, 张良, 张凯文等. 山岭隧道跨断裂带段及洞口段地震响应大型振动台模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(4): 993-1002.
- Yang C W, Zhang L, Zhang K W, et al. Large scale shaking table model test on seismic onset of mountain tunnel portal section passing through fault zone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(4): 993-1002. (in Chinese)
- [17] 刘中宪, 王建旭, 金立国, 等. Rayleigh波入射下建筑群-隧道群相互作用特性研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(6): 1153-1164.
- Liu Z X, Wang J X, Jin L G, et al. Study on the interaction characteristics of building group and tunnel group under Rayleigh wave excitation [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(6): 1153-1164. (in Chinese)
- [18] Liang J W, Wu M T, Ba Z N, et al. Surface motion of a layered transversely isotropic half-space with a 3D arbitrary-shaped alluvial valley under P-, SV- and SH-waves [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 140: 106388.
- [19] 张海, 苏振飞, 刘中宪, 等. 凸起地形中半圆形衬砌隧道对SH波的散射解析解 [J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(3): 769-777.
- Zhang H, Su Z F, Liu Z X, et al. An analytical solution to scattering of plane SH waves by a semi-circular lining tunnel in a semi-circular shape hill [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(3): 769-777. (in Chinese)

(本文编辑: 池营营)