柯伯成,张煜,张宁.近V形河谷平行隧道对SH波散射的解析研究[J].地震工程学报,2027,49(1):205-214.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250506001

Ke Bocheng, Zhang Yu, Zhang Ning. Analytical study of SH-wave scattering by parallel tunnels adjacent to a V-shaped valley[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2027, 49(1): 205-214. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20250506001

近V形河谷平行隧道对SH波散射的解析研究

柯伯成[1,2], 张 煜[1,2], 张 宁[1,2]

(1. 安徽建筑大学 土木工程学院,安徽 合肥 230601;
2. 安徽省岩土工程智能建造与灾变防控重点实验室,安徽 合肥 230601)

摘要: 河谷地形地震动的局部放大或衰减对其周围隧道的地震响应具有显著影响。然而,现有研究多聚焦于河谷对邻近单座衬砌隧道动力响应的影响,针对V形河谷与多隧道耦合场地对SH波散射的理论研究尚属空白。采用波函数展开法,研究半空间中V形河谷与平行衬砌隧道耦合场地对平面SH波的二维散射问题。首先,构建河谷、平行衬砌隧道及其镜像产生的波场,基于应力自由边界条件及应力、位移连续性条件建立方程组,求解未知复系数。进而,分析入射波角度、无量纲频率、隧道尺寸及间距对地表位移及平行隧道动应力的影响规律。结果表明:相较于单隧道工况,V形河谷与平行隧道耦合地形引发的地面运动往往更为强烈;随着频率增加,平行隧道一侧河谷的地形放大效应显著增强;随着入射波频率与隧道尺寸的增大,平行隧道的动应力集中现象更加显著。

关键词: V形河谷;平行隧道;波传播与散射;波函数展开法;动应力集中

中图分类号: P315.9; U452.2 **文献标志码**: A **文章编号**: 1000-0844(2027)01-0205-10

DOI:10.20000/j.1000-0844.20250506001

Analytical study of SH-wave scattering by parallel tunnels adjacent to a V-shaped valley

Ke Bocheng[1,2], Zhang Yu[1,2], Zhang Ning[1,2]

(*1. College of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, Anhui, China;*
2. Anhui Provincial Key Laboratory of Intelligent Geotechnics and Disaster Prevention, Hefei 230601, Anhui, China)

Abstract: The local amplification or attenuation of ground motions at a valley topography has an important effect on the seismic response of the adjacent tunnels. Most of the existing research only focuses on the effects of a V-shaped valley on the dynamic response of a single-lined tunnel. Theoretical studies of SH-wave scattering at sites with a V-shaped valley and multiple tunnels have not been explored. In this paper, the wave-function expansion approach is applied to investigate the two-dimensional scattering of plane SH waves by a V-shaped valley coupled with parallel lined tunnels in a

收稿日期:2025-05-06

基金项目:安徽省教育厅杰出青年科研项目(2022AH020027);安徽省自然科学基金水科学联合基金重点项目(2408055US003)

第一作者简介:柯伯成(2000-),男,硕士研究生,主要从事岩土地震工程研究。E-mail: kbc123456789@163.com。

通信作者:张 宁(1985-),男,博士,教授,主要从事岩土地震工程研究。E-mail: ningzhanghhu@163.com。

half-space. First, the wave fields for the valley, the parallel-lined tunnels, and their mirror images are established. A system of equations is then formulated based on the continuity conditions of stress and displacement to determine the unknown complex coefficients. Finally, the effects of the wave incidence angle, the dimensionless frequency, the tunnel size, and the spacing between the tunnels on the surface displacement and the dynamic stress in the tunnels are discussed. The surface displacement amplitudes and the dynamic stress concentration factors for the V-shaped valley coupled with the parallel lined tunnels indicate that the parallel tunnels induce more severe ground motions than a single tunnel. As frequency increases, the amplification effect of the valley topography adjacent to the parallel tunnels becomes significantly greater. The dynamic stress concentration is more obvious in the parallel tunnels with the increase of the incident wave frequency and the size of the tunnel.

Keywords: V-shaped valley; parallel tunnels; wave propagation and scattering; wave function expansion method; dynamic stress concentration

0 引言

隧道作为现代交通、能源和城市基础设施的重要组成部分,广泛应用于公路、铁路等工程。然而,在地震频发区,隧道易出现裂缝、衬砌受损,甚至整体失效。近几十年来,隧道的地震响应问题备受学术界关注[1-6]。

地形是影响地震波传播路径的关键因素,尤其在地形复杂、河谷发育的地区,其影响尤为显著[7-11]。若在河谷附近修建隧道,河谷对地震波的散射作用可能会进一步加剧场地放大效应[12-13],导致衬砌隧道遭受的地震影响远高于常规场地。此外,隧道的抗震性能不仅受河谷地形放大效应的影响,邻近隧道结构的存在亦会加剧地震破坏风险[14-16]。在隧道密集区域,隧道间的相互扰动可能引发结构共振或局部动应力集中[17-18],从而导致衬砌结构发生过度变形甚至破坏。

近年来,关于邻近地形条件下隧道的地震响应研究已取得显著进展。Guo等[19]分析了各向异性介质中半圆形峡谷邻近圆形隧道在SH波激励下的散射特性;Liang等[20]提出了山谷复合地形中圆形隧道地震响应的半解析解;Cao等[21]研究了含非完全黏结界面的隧道在半圆形河谷附近的地震响应;He等[22]分析了截断半圆形峡谷与邻近隧道在SH波激励下的动力相互作用。此外,Chen等[23]聚焦于隧道与V形峡谷耦合模型在SH波激励下的地形效应;Zhang等[24]探讨了不均匀土层中V形峡谷邻近隧道的地震响应。然而,现有研究多集中于河谷与邻近单隧道的耦合模型,鲜少涉及实际工程中更为普遍的V形河谷与多隧道耦合模型(如重庆轨道交通27号线穿江双隧道邻近V形河谷的情形)。

鉴于此,本文采用波函数展开法,建立V形河谷邻近平行隧道对SH波散射的解析解,揭示河谷地形效应对平行隧道动力响应的影响机制。

1 模型与激励

河谷与地下结构的二维组合模型如图1所示。模型包含一半空间内深度为d、半宽为a的对称V形河谷,其侧壁倾角度$\beta=-\arctan(a/d)$。河谷场地附近布设两条内、外半径分别为a_1、a_2的圆形衬砌隧道。隧道1和隧道2中心至河谷中心的水平距离分别为l_1、l_1+l_2,竖向距离分别为d_1、d_2(当$d_1=d_2$时,即为平行双隧道)。假设模型各区域介质均为弹性、均质和各向同性。尽管该理论模型在河谷与隧道几何形状、介质属性等方面存在一定简化与局限,但本文提出的解析方法能够揭示地震波传播的物理机制,所得结果不仅具有较高的精度与可靠性,还可作为数值模拟结果的验证基准。半空间介质的剪切模量为μ_0,剪切波数为c_0;两条衬砌隧道的剪切模量均为μ_1,剪切波数均为c_1。圆弧辅助边界L的半径a不小于d。整体坐标系(x,y)和极坐标系(r,θ)的原点设于圆弧辅助边界中心O;局部坐标系(x_i,y_i)与(r_i,θ_i)($i=1,2,3,4$)的原点分别设于各隧道及其镜像中心。在子区域③中,另设局部坐标系(x_5,y_5)和(r_5,θ_5),其原点位于河谷底部O_5。模型的激励是一列沿z方向偏幅、圆频率为ω、入射角为α、单位振幅的平面SH波。隧道1和隧道2的空间位置可根据研究需要任意设定。

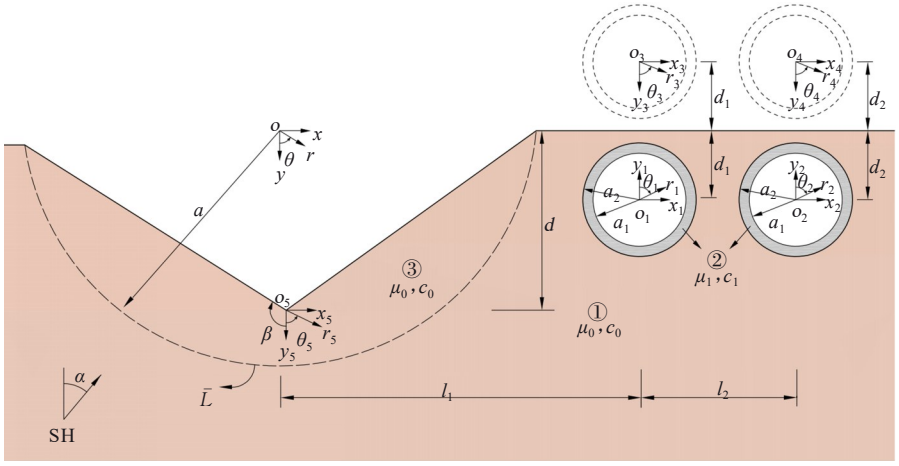


图 1　邻近V形河谷的双隧道二维模型

Fig. 1　Two-dimensional model of twin tunnels adjacent to a V-shaped valley

2　定解问题和求解思路

2.1　模型建立

对于本文研究的稳态反平面问题，可省略时间调和因子 $e^{-i\omega t}$。子区域①、②和③中的位移波场 u 均满足二维亥姆霍兹方程[25]：

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2}+k_j^2 u=0,\ j=0,1 \quad (1)$$

式中：$k_j=\omega/c_j$ 为剪切波数。

河谷表面和隧道衬砌内表面均为应力自由边界，因此，位移需满足河谷表面和双隧道内表面的应力边界条件[26]：

$$\tau_{\theta z}=\frac{\mu_0}{r}\frac{\partial u(r,\theta)}{\partial \theta}=0,\ \theta=\pm\frac{\pi}{2},r>a \quad (2)$$

$$\tau_{\theta z}^{(5)}=\frac{\mu_0}{r_5}\frac{\partial u_5(r_5,\theta_5)}{\partial \theta_5}=0,\theta_5=\pm\beta \quad (3)$$

$$\tau_{rz}^{(1)}=\mu_0\frac{\partial u(r_1,\theta_1)}{\partial r_1}=0,r_1=a_2 \quad (4)$$

$$\tau_{rz}^{(2)}=\mu_0\frac{\partial u(r_2,\theta_2)}{\partial r_2}=0,r_2=a_2 \quad (5)$$

$$\tau_{rz}^{(3)}=\mu_1\frac{\partial u_1(r_1,\theta_1)}{\partial r_1}=0,r_1=a_1 \quad (6)$$

$$\tau_{rz}^{(4)}=\mu_1\frac{\partial u_2(r_2,\theta_2)}{\partial r_2}=0,r_2=a_1 \quad (7)$$

假设双衬砌隧道外表面与基岩介质完全接触，需满足应力和位移连续性条件：

$$\tau_{rz}=\tau_{rz}^{(1)},r_1=a_2 \quad (8)$$

$$\tau_{rz}=\tau_{rz}^{(2)},r_2=a_2 \quad (9)$$

$$u(r_1,\theta_1)=u_1(r_1,\theta_1),r_1=a_2 \quad (10)$$

$$u(r_2,\theta_2)=u_2(r_2,\theta_2),r_2=a_2 \quad (11)$$

辅助边界的处理遵循相同的连续性假设，因此，子区域①和③之间的虚拟边界也需满足连续性条件：

$$\tau_{rz}(a,\theta)=\tau_{rz}^{(5)}(a,\theta),\ 0\leqslant\theta\leqslant|\pi/2| \quad (12)$$

$$u(a,\theta)=u_3(a,\theta),\ 0\leqslant\theta\leqslant|\pi/2| \quad (13)$$

在子区域①中，总位移 u 由两部分（自由场 u^{f} 和散射场 u^{s}）叠加而成：

$$u=u^{\mathrm{f}}+u^{\mathrm{s}} \quad (14)$$

自由场是河谷与隧道均不存在时均质半空间的波场，由入射场与反射场叠加而成[23]：

$$u^{\mathrm{f}}(r,\theta)=\sum_{n=0}^{\infty}2\varepsilon_n(-1)^n\mathrm{J}_{2n}(kr)\cos 2n\alpha\cos 2n\theta+\sum_{n=0}^{\infty}4\mathrm{i}(-1)^n J_{2n+1}(kr)\sin(2n+1)\alpha\sin(2n+1)\theta \quad (15)$$

式中：ε_n 为纽曼因子（$\varepsilon_0=1,\varepsilon_n=2,n\geqslant1$）；$\mathrm{J}_n(\cdot)$ 为 n 阶第一类贝塞尔函数；$k=\omega/c_0$ 为基岩剪切波数。

$u^{\mathrm{s}11}$ 表示由隧道1产生的散射波场：

$$u^{\mathrm{s}11}(r_1,\theta_1)=\sum_{n=0}^{\infty}A_n\mathrm{H}_n^{(1)}(kr_1)\cos n\theta_1+\sum_{n=1}^{\infty}B_n\mathrm{H}_n^{(1)}(kr_1)\sin n\theta_1 \quad (16)$$

式中：A_n 和 B_n 均为待求系数；$\mathrm{H}_n^{(1)}(\cdot)$ 为 n 阶第一类汉克尔函数。

$u^{\mathrm{s}12}$ 表示 $u^{\mathrm{s}11}$ 在半空间表面的镜像波场：

$$u^{\mathrm{s}12}(r_3,\theta_3)=\sum_{n=0}^{\infty}A_n\mathrm{H}_n^{(1)}(kr_3)\cos n\theta_3+\sum_{n=1}^{\infty}B_n\mathrm{H}_n^{(1)}(kr_3)\sin n\theta_3 \quad (17)$$

u^{s21}表示由隧道2产生的散射波场：

$$u^{s21}(r_2,\theta_2)=\sum_{n=0}^{\infty}C_n\mathrm{H}_n^{(1)}(kr_2)\cos n\theta_2+\sum_{n=1}^{\infty}D_n\mathrm{H}_n^{(1)}(kr_2)\sin n\theta_2 \tag{18}$$

式中：C_n和D_n均为待求系数。

u^{s22}表示u^{s21}在半空间表面的镜像波场：

$$u^{s22}(r_4,\theta_4)=\sum_{n=0}^{\infty}C_n\mathrm{H}_n^{(1)}(kr_4)\cos n\theta_4+\sum_{n=1}^{\infty}D_n\mathrm{H}_n^{(1)}(kr_4)\sin n\theta_4 \tag{19}$$

u^{s3}表示区域③产生的散射波场：

$$u^{s3}(r,\theta)=\sum_{n=0}^{\infty}E_n\mathrm{H}_{2n}^{(1)}(kr)\cos(2n\theta)+\sum_{n=0}^{\infty}F_n\mathrm{H}_{2n+1}^{(1)}(kr)\sin\left[(2n+1)\theta\right] \tag{20}$$

式中：E_n和F_n均为待求系数。

在子区域③中，波场的位移u_3可以表示为：

$$u_3(r_5,\theta_5)=\sum_{n=0}^{\infty}G_n\mathrm{J}_{\frac{n\pi}{\beta}}(kr_5)\cos\frac{n\pi}{\beta}\theta_5+\sum_{n=0}^{\infty}H_n\mathrm{J}_{(2n+1)\frac{\pi}{2\beta}}(kr_5)\sin(2n+1)\frac{\pi}{2\beta}\theta_5 \tag{21}$$

在子区域②中，为满足两隧道衬砌内应力边界条件[式(6)和(7)]，可构造波场，位移场表示为：

$$u_1(r_1,\theta_1)=\sum_{n=0}^{\infty}K_n\left[\mathrm{J}_n(k_1r_1)-\frac{\mathrm{J}_n'(k_1a_1)}{\mathrm{Y}_n'(k_1a_1)}\mathrm{Y}_n(k_1r_1)\right]\cos n\theta_1+\sum_{n=1}^{\infty}L_n\left[\mathrm{J}_n(k_1r_1)-\frac{\mathrm{J}_n'(k_1a_1)}{\mathrm{Y}_n'(k_1a_1)}\mathrm{Y}_n(k_1r_1)\right]\sin n\theta_1 \tag{22}$$

$$u_2(r_2,\theta_2)=\sum_{n=0}^{\infty}S_n\left[\mathrm{J}_n(k_1r_2)-\frac{\mathrm{J}_n'(k_1a_1)}{\mathrm{Y}_n'(k_1a_1)}\mathrm{Y}_n(k_1r_2)\right]\cos n\theta_2+\sum_{n=1}^{\infty}T_n\left[\mathrm{J}_n(k_1r_2)-\frac{\mathrm{J}_n'(k_1a_1)}{\mathrm{Y}_n'(k_1a_1)}\mathrm{Y}_n(k_1r_2)\right]\sin n\theta_2 \tag{23}$$

式中：$k_1=\omega/c_1$为衬砌介质的剪切波数；K_n、L_n、S_n和T_n均为待求系数；$\mathrm{Y}_n(\cdot)$为n阶第二类贝塞尔函数。

2.2 确定未知复系数

对式(8)～式(11)在区间[0,2π]上积分，同时对式(12)和(13)在区间[-π/2,π/2]上积分，利用三角函数的正交性建立方程组。该方程组包含A_n,B_n,C_n,D_n,E_n,F_n,G_n,H_n,K_n,L_n,S_n和T_n共12组未知复系数。随后，对各无穷级数进行截断处理，通过求解上述方程组获得未知复系数，进而确定半空间中各区域的波场。

图2给出了工况$\alpha=0°$，$\mu_0/\mu_1=8/75$，$d/a=1$，$a_1/a_2=7/8$，$a_2/a=0.25$，$d_1/a=1$，$d_2=d_1$，$l_1/a=2$，$l_2/a=2$和$\eta=4$的收敛测试结果。由图2可以看出，随着截断项数N的增大，地表位移幅值初期存在波动，随后逐渐收敛于稳定值。通过多种无量纲频率下的级数解进行收敛测试，当$\eta\leqslant0.5$时，取$N=5$；当$0.5<\eta\leqslant1$时，取$N=10$；当$1<\eta\leqslant4$时，取$N=15$，得到的结果满足精度和收敛性要求。值得注意的是，截断项数N随频率η的增大而相应增加。为确保计算结果的准确性，下文将对模型进行退化验证。

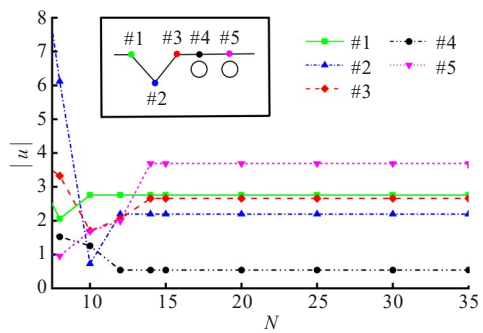


图2 河谷表面5个代表性位置的地表位移收敛测试图

Fig. 2 Convergence measurements of surface displacements at five representative locations on the valley surface

3 验证

为便于分析，引入无量纲频率η及位移幅值$|u|$(评估河谷场地地震响应的关键参数)，其定义分别为：

$$\eta=\frac{\omega a}{\pi c_0}=\frac{ka}{\pi}=\frac{2a}{\lambda} \tag{24}$$

$$|u|=\sqrt{[\mathrm{Re}(u)]^2+[\mathrm{Im}(u)]^2} \tag{25}$$

式中：λ为入射SH波的波长；$\mathrm{Re}(\cdot)$和$\mathrm{Im}(\cdot)$分别表示复位移的实部与虚部。

本文引入动应力集中因子(Dynamic Stress Concentration Factor, DSCF)[27]分析河谷地形中双衬砌隧道的地震响应，其表达式为：

$$\mathrm{DSCF}=\frac{\mu_1\partial u_j}{\mu_0 ka_1\partial\theta_j},\ j=1,2 \tag{26}$$

式中：$j=1,2$分别对应隧道1和隧道2。

本文采用两种典型模型验证结果的准确性。(1)退化模型验证：当隧道2距离河谷足够远时，本研究的耦合模型可退化为Chen等[23]的邻近V形河谷单隧道模型，参数定义为：$a_2/a=0.25$，$d/a=1$，$d_1/$

$a=1$，$d_2/a=1\ 000$，$l_1/a=1.5$，$l_2/a=1\ 000$，$\mu_1/\mu_0=75/8$，$\eta=1$。由于 Chen 等[23]的研究与本文同属波动理论框架，且其模型为本模型的特例，故选取其结果进行对比。(2)经典模型验证：以 Lee 等[28]提出的单一衬砌隧道模型解析解为基准进行验证。当河谷半径很小、隧道 2 与河谷距离较远时，参数分别为：$l_2/a_2=1\ 000$，$a/a_2=0.001$，$d_1/a_2=5$，$l_1/a_2=0.001$，$a_1/a_2=0.9$，$\mu_1/\mu_0=0.35$，$\eta=1$。对比结果如图 3 所示，可以发现本文计算结果与上述两种典型模型的结果吻合良好，从而验证了本文解析解的正确性。

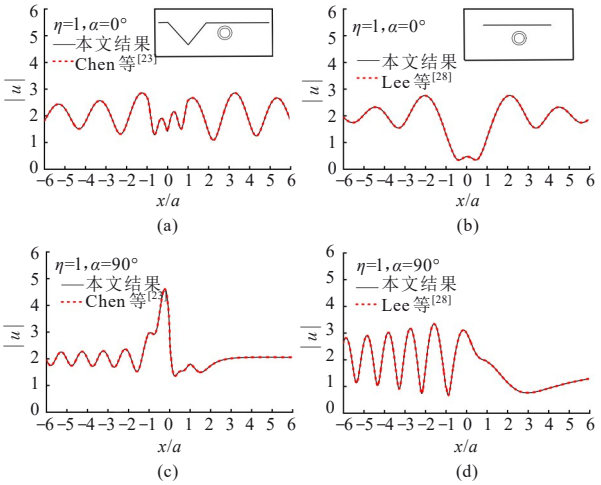


图 3　本文模型与两种典型模型的比较

Fig. 3　Comparison between the proposed model and two typical models

4　结果与讨论

本节分析入射波角度、无量纲频率 η、平行隧道尺寸及间距对地表位移幅值及隧道地震响应的影响规律。

4.1　平行隧道与河谷间距对地形效应的影响分析

为揭示平行隧道与河谷间距对河谷地形放大效应的影响，图 4 给出了 η 分别为 1、2、3、4 时，地表位移幅值随平行隧道与 V 形河谷间距变化的曲线。参考 Chen 等[23]对低频和高频的界定，取 $\eta=1$ 表征低频、$\eta=4$ 表征高频，以考察频率变化的影响。计算模型参数为：$d/a=1$，$d_1/a=0.75$，$d_2=d_1$，$l_2/a=1$，$a_2/a=0.25$，$a_1/a_2=7/8$，$\mu_1/\mu_0=75/8$。结果表明，随着频率升高，平行隧道与河谷间距对河谷右肩区域（$0<x/a<1$）地表位移幅值的影响显著增强，同时平行隧道上方区域的位移幅值峰值也随频率增加而增大。需指出的是，当 $\eta=4$ 时，平行隧道正上方区域出现了明显的双峰值现象。

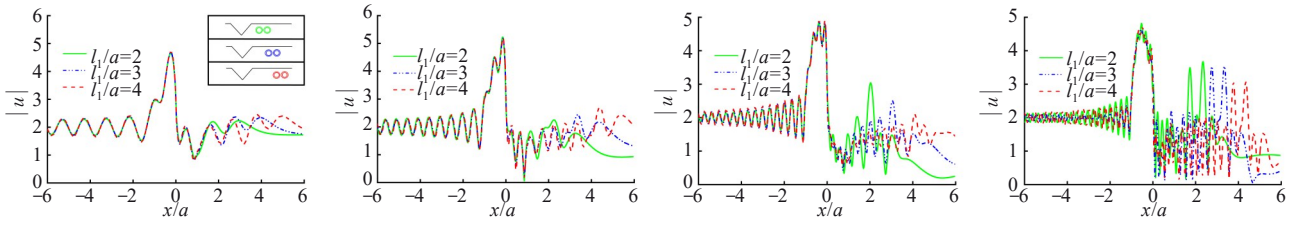


图 4　不同平行隧道-河谷间距下地表位移振幅 $|u|$ 与 x/a 的关系

Fig. 4　Relationship between surface displacement amplitude $|u|$ and x/a under different spacings between parallel tunnels and the valley

综上，随着平行隧道与河谷间距减小，平行隧道一侧河谷的位移峰值呈现向河谷方向迁移的趋势，且在高频作用下，平行隧道上方区域的地表位移峰值通常更高。这是由于在高频下波长相对较短，河谷和平行隧道对地震波的散射和反射作用更为强烈，波在平行隧道上方的干涉效应显著增强，从而导致该区域地表位移峰值增大。

4.2　河谷附近不同间距平行隧道与单个隧道对地表位移的影响对比

为对比河谷附近平行隧道与单个隧道诱发地面运动的差异，并分析平行隧道间距（l_2/a）的影响，设定本文模型中隧道 1 位置与 Chen 等[23]单隧道模型的位置重合，仅改变隧道 2 与河谷的水平距离。

图 5(a)展示了 $\eta=1$ 时不同间距平行隧道与单个隧道的对比结果。计算参数为：$\alpha=90°$，$d/a=1$，$d_1/a=1$，$d_2=d_1$，$l_1/a=1.5$，$a_2/a=0.5$。在水平入射条件下，相较于单个隧道（红色实线表示 Chen 等[23]的研究结果），平行隧道区域的位移幅值波动更为剧烈，且不同间距下的位移曲线相对峰值均大于单隧道工况。其原因在于低频下波长较长，SH 波对河谷地形和单个隧道的绕射能力较强，导致地表位移在河谷和隧道区域的变化较为平缓；而对于平行隧道，

结构间的相互作用显著增强了波的干涉效应。

图 5(b)展示了 $\eta=4$ 时不同间距平行隧道与单个隧道的对比结果。参数定义为：$\alpha=60°$，$d/a=1$，$d_1/a=0.5$，$d_2=d_1$，$l_1/a=2$，$a_2/a=0.25$。当 $l_2/a=1$ 时，河谷左侧无隧道区域的位移曲线走势基本一致，但河谷右侧平行隧道区域(绿线)的位移幅值明显高于单个隧道。当 $l_2/a=2$ 时，平行隧道(蓝线)与单个隧道在 x/a 接近 0(河谷底部)的区域差异明显，前者的位移幅值波动更为剧烈，且在某些区域(如 $x/a=2$ 和 4)幅值更高。当 $l_2/a=3$ 时，紫线与红色实线在河谷右侧区域($x/a>0$)差异明显，平行隧道(粉线)位移幅值在该区域出现明显峰值且整体波动幅度较大，表明平行隧道显著增强了该区域的地面运动。当 $l_2/a=4$ 时，平行隧道工况(青色线)的位移幅值呈现频繁的波动特征。对比结果表明，在不同频率下，平行隧道引起的地面运动均较单隧道更为显著。这主要归因于高频下河谷和平行隧道间的相互作用更强，且平行隧道间的波场干涉效应更为复杂剧烈，导致波在平行隧道上方区域的传播特性发生显著改变。

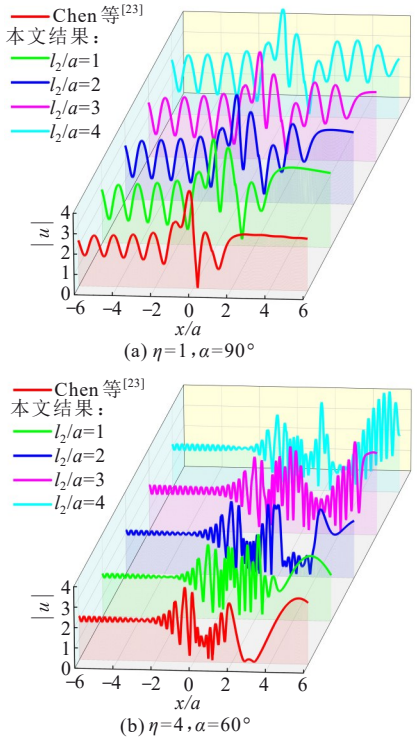


图 5 不同间距平行隧道与单个隧道[23]地表位移振幅 $|u|$ 沿 x/a 的分布对比

Fig. 5 Comparison of surface displacement amplitude $|u|$ distributions along x/a between parallel tunnels at different spacings and a single tunnel [23]

4.3 不同工况下河谷场地的地震动响应对比

图 6 展示了不同入射角下，以无量纲距离 x/a 和无量纲频率 η 为自变量的位移放大系数云图。计算参数为：$a_1/a_2=7/8$，$a_2/a=0.5$，$d/a=1$，$d_1/a=0.5$，$d_2=d_1$，$l_1/a=2$，$l_2/a=0.5$，$\mu_1/\mu_0=75/8$。分析结果表明，当 SH 波垂直入射($\alpha=0°$)时，无隧道时河谷场地的位移放大系数呈对称分布；而在河谷右侧引入单隧道后，右侧场地地震动显著放大；当平行隧道位于河谷右侧时，放大效应进一步增强，峰值达 2.760，超过了单隧道在河谷右侧的情况。当 SH 波斜入射($\alpha=45°$)时，平行隧道区域的放大系数整体高于其余两种工况。当 SH 波水平入射($\alpha=90°$)时，河谷右侧隧道区域的放大系数甚至超过河谷左肩区域，这一现象在单一河谷模型中并未出现。具体量化对比显示，河谷与平行隧道耦合模型的地表位移放大系数最大值为 2.759；而在单隧道-河谷耦合模型及单一河谷模型中，同一位置的位移放大系数分别为 1.835 和 1.689。前者较后者分别增大了 50.4% 和 63.3%。

总体而言，河谷场地的地面运动受邻近隧道影响显著。单隧道增强了河谷邻近侧的放大效应，而平行隧道则使该效应进一步强化，导致邻近侧河谷的位移放大系数显著提升。

4.4 隧道尺寸对动应力分布的影响

DSCF 是评判隧道动应力集中现象的关键指标。为研究河谷场地中平行隧道尺寸变化对其动力响应的影响，图 7 和图 8 展示了不同尺寸隧道的 DSCF 随频率及入射角的变化趋势。参数分别定义为：$d/a=1$，$d_1/a=1$，$d_2=d_1$，$l_1/a=l_2/a=2$，$a_1/a_2=7/8$，$\mu_1/\mu_0=75/8$。观察可知，DSCF 分布曲线呈现明显的不对称性，这主要由隧道邻近河谷及平行隧道间的相互作用共同导致。当 SH 波传播至河谷区域时，受两侧地形约束，波的传播方向发生改变并产生散射，进而影响隧道的动力响应。靠近河谷的隧道 1 受地震波作用更为直接且强烈；同时，平行隧道间的多次散射作用加剧了响应的不对称性。波在隧道 1 区域发生强烈的动应力叠加，导致其 DSCF 曲线形状及数值差异显著；相比之下，隧道 2 距离河谷相对较远，主要受平行隧道间相互作用影响，故其动应力集中程度弱于隧道 1。

综上所述，入射波角度、频率、隧道尺寸及间距等参数存在复杂的耦合机制，共同控制着耦合地形的地表位移和隧道动应力集中。高频下，地震波与

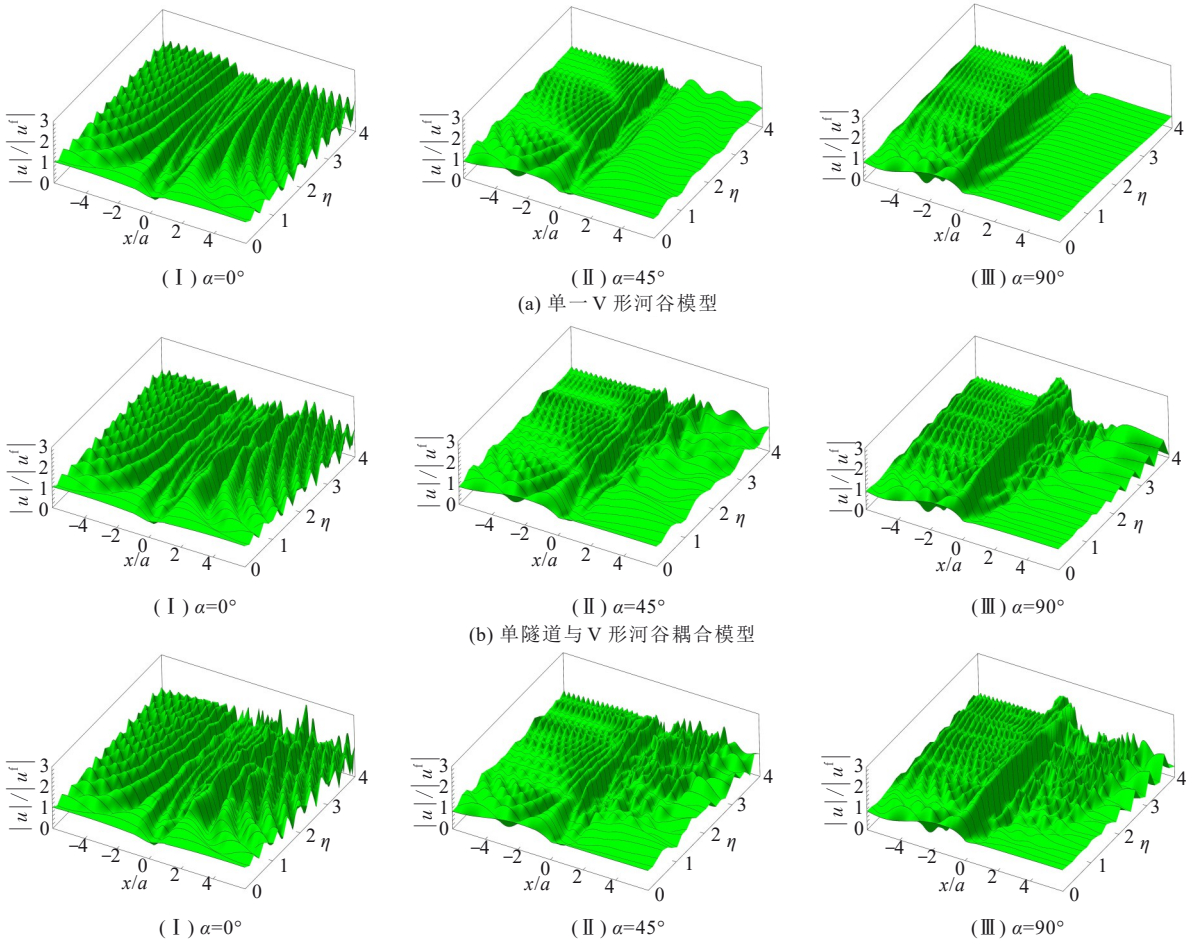


图 6　不同入射角下放大系数的三维图

Fig. 6　Three-dimensional plots of amplification factors at different incident angles

河谷及平行隧道的相互作用强烈，导致平行隧道上方地表位移峰值显著增大；随着间距减小，地表位移双峰特征更趋明显。当较大尺寸平行隧道紧邻河谷时，DSCF 显著增大，动应力集中现象加剧。低频下，河谷与平行隧道间距较小，波场变化相对较为平缓；当较小尺寸平行隧道远离河谷时，DSCF 相对较小，动应力集中现象较弱。因此，在隧道抗震设计与地震风险评估中，需综合考量上述参数的协同影响。

5　结论

本文建立了平面 SH 波作用下 V 形河谷附近平行衬砌隧道地震响应的解析解，初步探索了入射波角度、频率、平行隧道的尺寸及间距对地表位移幅值的影响规律，重点分析了不同尺寸平行隧道的动应力集中特征，并对比了 V 形河谷附近单、双隧道地震响应的差异。主要结论如下：

（1）地形放大效应显著增强：在 V 形河谷与平行隧道的耦合地形中，随着频率增加，地表位移幅值显著增大。邻近河谷的平行隧道诱发的地面运动强度普遍高于单隧道工况。量化分析表明。相较于河谷-单隧道耦合模型及单一河谷模型，平行隧道工况下的河谷表面位移放大系数分别增大了约 50% 和 63%。特别是当平行隧道间距较小时，对河谷右侧区域（$x/a>0$）的地形效应影响尤为显著。

（2）位移峰值迁移与增长规律：随着平行隧道与河谷间距的减小，平行隧道上方地表位移幅值出现显著峰值，且该峰值呈现向河谷方向迁移的趋势；随着频率升高，该位移峰值亦增大。

（3）动应力集中的非线性特征：SH 波入射角度与平行隧道尺寸对隧道 DSCF 的分布影响显著。随着频率增加，不同尺寸隧道发生动应力集中的部位差异明显，且高应力集中区域的数量有所增加。

受限于理论模型在几何形状及介质属性上的

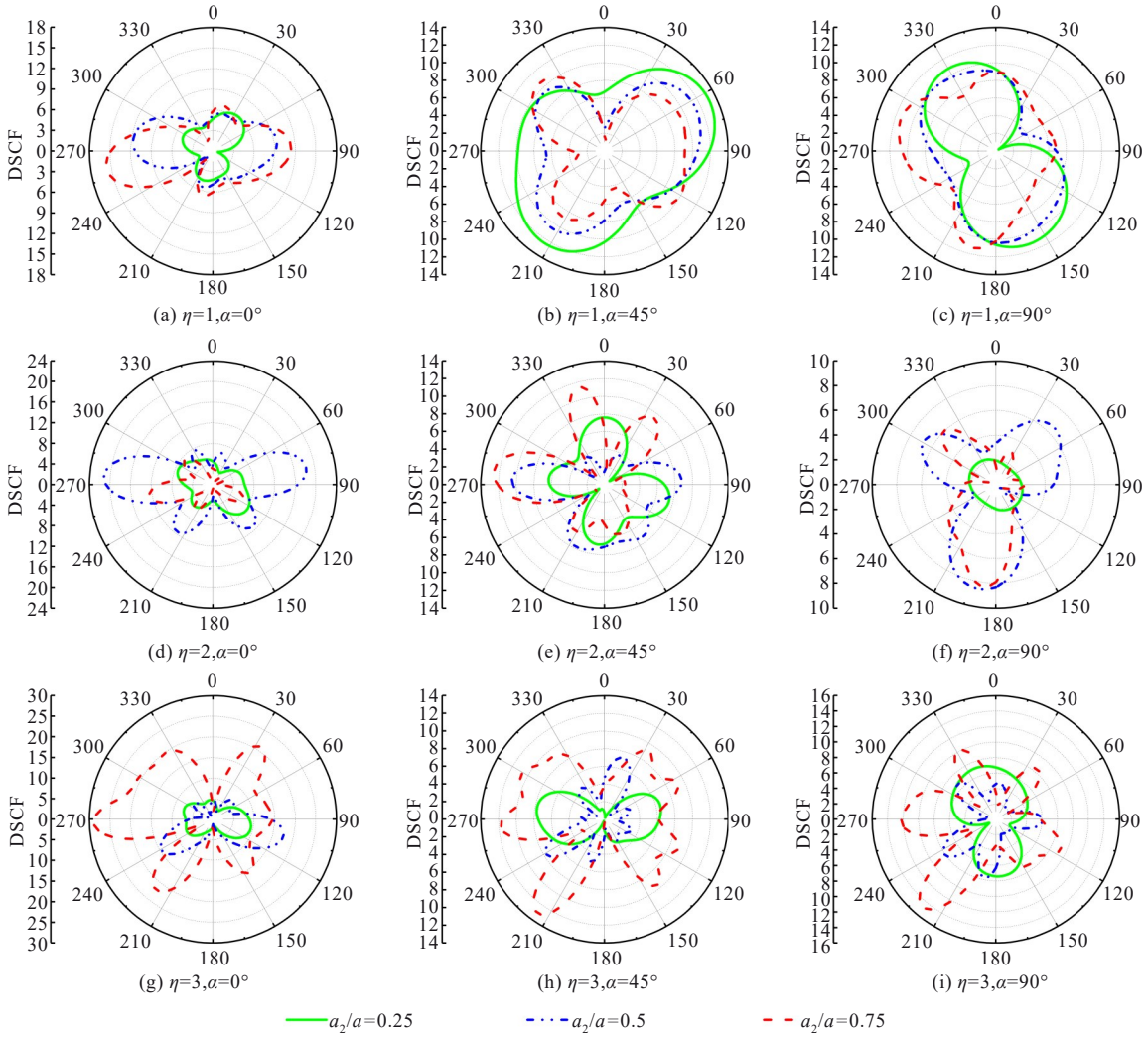


图 7 不同隧道尺寸下隧道 1 的 DSCF 结果

Fig. 7 DSCF results of Tunnel 1 under different tunnel sizes

简化假设,在实际工程应用中,建议进一步纳入河谷不规则性几何形状、介质非均质性及各向异性等因素进行综合评估。

参考文献(References)

[1] 周晓靖, 钟明文, 汪洪武, 等. 地质条件对隧道地震响应的影响因素研究[J]. 地震工程学报, 2021, 43(1): 154-161.
Zhou Xiaojing, Zhong Mingwen, Wang Hongwu, et al. Influence of geological conditions on the seismic response of a tunnel [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(1): 154-161.

[2] 禹海涛, 张正伟, 李攀, 等. 土岩变化地层长隧道纵向地震响应解析解[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(7): 1244-1250.
Yu Haitao, Zhang Zhengwei, Li Pan, et al. Analytical solution for longitudinal seismic responses of long tunnels crossing soil-rock stratum[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(7): 1244-1250.

[3] 陈士军, 鹿庆蕊, 赵凯, 等. 不滑移状态下深埋圆形隧道地震响应研究[J]. 地震工程学报, 2017, 39(6): 1011-1017.
Chen Shijun, Lu Qingrui, Zhao Kai, et al. Seismic response of deep-buried circular tunnels under no-slip interface conditions [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(6): 1011-1017.

[4] 徐安全, 梁建文, 巴振宁. 上软下硬场地中大直径盾构隧道地震响应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43(5): 12-21.
Xu Anquan, Liang Jianwen, Ba Zhenning. Seismic influence of upper-soft and lower-hard site on large diameter shield tunnel [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2023, 43(5): 12-21.

[5] 刘鸿哲, 黄茂松. 超长沉管隧道纵向地震响应频域分析方法[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(11): 1971-1978.
Liu Hongzhe, Huang Maosong. Frequency-domain analysis method for longitudinal seismic response of super-long immersed tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(11): 1971-1978.

[6] 梁建文, 于军港, 张季, 等. 基于黏弹性边界的地下隧道非线性地震响应分析模型[J]. 地震工程学报, 2014, 36(3):

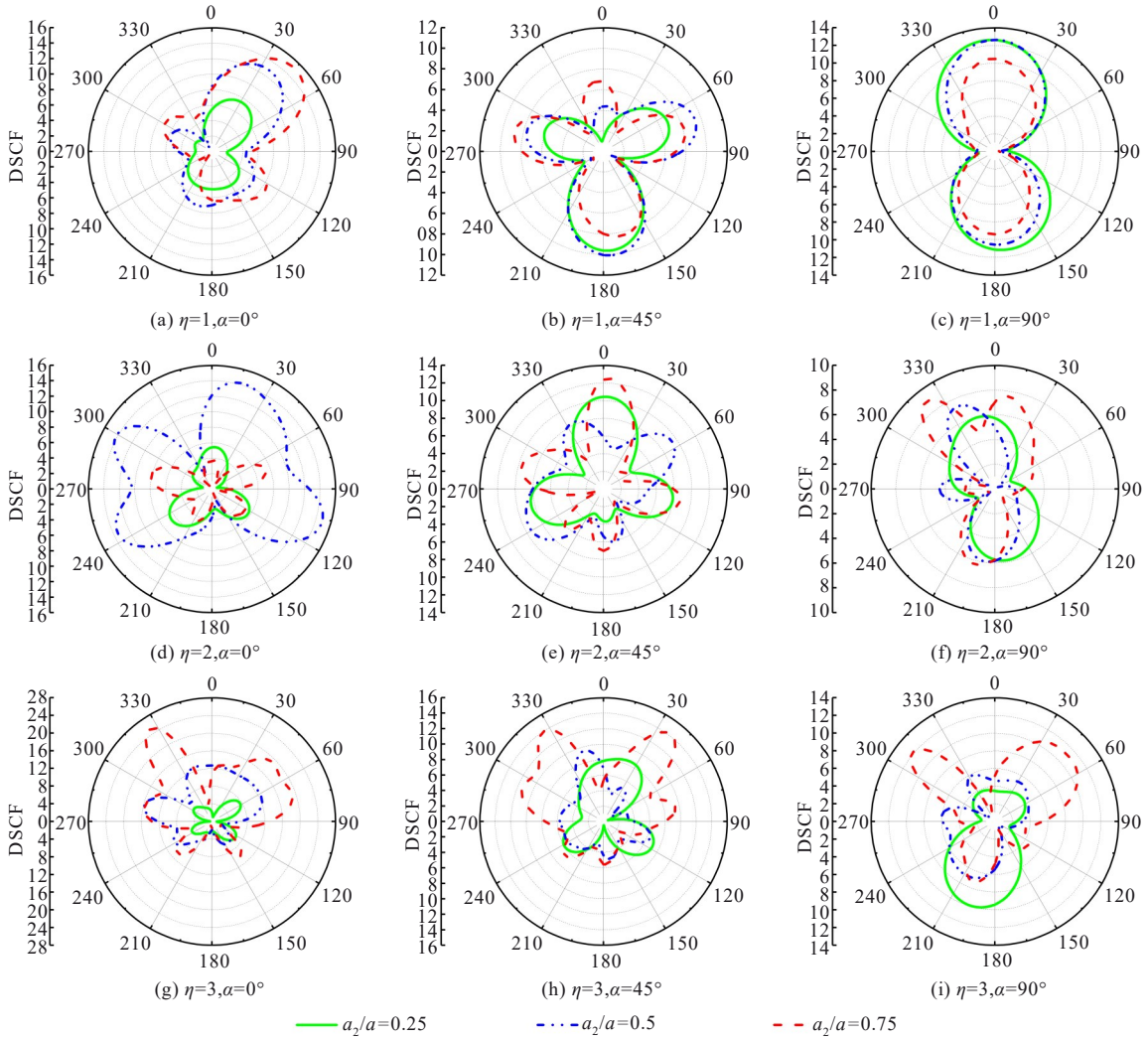


图 8　不同隧道尺寸下隧道 2 的 DSCF 结果

Fig. 8　DSCF results of Tunnel 2 under different tunnel sizes

434-440.

Liang Jianwen, Yu Jungang, ZHANG Ji, et al. A nonlinear seismic response analysis model for underground tunnels based on the viscous-spring boundary[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(3): 434-440.

[7] Poursartip B, Fathi A, Kallivokas L F. Seismic wave amplification by topographic features: a parametric study [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 92: 503-527.

[8] Asimaki D, Mohammadi K. On the complexity of seismic waves trapped in irregular topographies[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 114: 424-437.

[9] Trifunac M D. Scattering of plane sh waves by a semi-cylindrical canyon [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1972, 1(3): 267-281.

[10] Zhang C, Liu Q J, Deng P. Antiplane scattering of SH waves by a trapezoidal valley with a circular-arc alluvium in an elastic half space[J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 2015, 9(3): 1550008.

[11] Zhang N, Gao Y F, Wu Y X, et al. A note on near-field site amplification effects of ground motion from a radially inhomogeneous valley[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2018, 17(4): 707-718.

[12] Alielahi H, Adampira M. Seismic effects of two-dimensional subsurface cavity on the ground motion by BEM: amplification patterns and engineering applications [J]. International Journal of Civil Engineering, 2016, 14(4B): 233-251.

[13] 刘中宪，刘英，孟思博，等. 基于间接边界元法的近断层沉积谷地地震动模拟[J]. 岩土力学，2021，42(4)：1141-1155，1169.

Liu Zhongxian, Liu Ying, Meng Sibo, et al. Near-fault ground motion simulation of alluvial valley based on indirect boundary element method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(4): 1141-1155, 1169.

[14] Lin S Y, Hung H H, Yang J P, et al. Seismic analysis of twin tunnels by a finite/infinite element approach[J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(9): 04017060.

[15] Alielahi H, Adampira M. Effect of twin-parallel tunnels on seismic ground response due to vertically in-plane waves[J].

International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 85: 67-83.

[16] He C, Zhou S H, Guo P J, et al. Analytical model for vibration prediction of two parallel tunnels in a full-space[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 423: 306-321.

[17] Zhang J X, Lei X M, Chan P W, et al. Integrating physics-informed machine learning with resonance effect for structural dynamic performance modeling[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 84: 108627.

[18] He C, Zhou S H, Guo P J, et al. Theoretical modelling of the dynamic interaction between twin tunnels in a multi-layered half-space[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 456: 65-85.

[19] Guo D B, Bian J L, Song Y Q, et al. Response of semicircular canyons and movable cylindrical cavities to SH waves in anisotropic half-space geology[J]. Geophysics, 2024, 89(5): C197-C209.

[20] Liang Y W, Zhou F X, Qu Y L. Semi-analytical solution for seismic response of circular lined tunnel in Alpine valley composite site [J]. Computers and Geotechnics, 2024, 172: 106475.

[21] Cao C, Fang X Q, Zhu C S. Effects of a semi-circular valley on dynamic response of shallow tunnel with imperfect interface under Rayleigh wave incidence[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2025, 190: 109204.

[22] He B, Wu L Z, Lai Y M, et al. Dynamic response of a lined tunnel beneath a truncated semicircular canyon subjected to plane SH waves[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2025, 151(5): 04025009. .

[23] Chen X, Zhang N, Gao Y F, et al. Effects of a V-shaped canyon with a circular underground structure on surface ground motions under SH wave propagation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 127: 105830.

[24] Zhang X M, Qi H. Dynamic stress analysis of circular cavity in density inhomogeneous multi-layer soil structures containing a canyon[J]. Journal of Engineering Mathematics, 2024, 149(1): 1-31.

[25] Zhang N, Wang L, Zhang Y, et al. Effect of a V-shaped canyon on the seismic response of a bridge under oblique incident SH waves[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2024, 53(1): 496-514.

[26] Zhang N, Chen X, Gao Y F, et al. Analytical solution to scattering of SH waves by a circular lined tunnel embedded in a semi-circular alluvial valley in an elastic half - space[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 106: 103615.

[27] Zhang Y, Zhang N, Huang C X, et al. Effect of partially imperfect interface on dynamic response of a circular lined tunnel in an elastic half-space subjected to plane SH waves[J]. International Journal of Geomechanics, 2022, 22 (10): 04022165.

[28] Lee V W, Trifunac M D. Response of tunnels to incident SH-waves [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1979, 105(4): 643-659.

（本文编辑：张向红）