朱辉,孙纬宇,严松宏,等.非一致激励下近河谷隧道地震动力响应研究[J].地震工程学报,2026,48(5):1115-1124.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250801001

ZHU Hui,SUN Weiyu,YAN Songhong,et al.Seismic dynamic response of a tunnel near valleys under non-uniform excitation[J].China Earthquake Engineering Journal,2026,48(5):1115-1124.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250801001

非一致激励下近河谷隧道地震动力响应研究

朱 辉[1],孙纬宇[1,2],严松宏[1,2],欧尔峰[1],李 景[1],梁庆国[1,2],张 建[3]

(1.兰州交通大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730070;
2.甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室,甘肃 兰州 730070;
3.甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司,甘肃 兰州 730030)

摘要:河谷地形具有显著的地震动放大效应,会对场地内大型基础设施的抗震性能产生严重影响。为研究河谷地形对邻近隧道地震动力响应的影响规律,采用基于黏弹性人工边界的地震波动输入方法,实现SV波在不同入射角度下的非一致激励;考虑隧道与河谷地形的不同相对位置,建立圆形、梯形和V形等多种河谷场地模型,并以此进行非线性动力时程分析;同时,以无河谷地形效应的完整场地模型为参照,系统分析河谷地形对邻近隧道加速度分布、加速度放大系数及衬砌应力的影响规律。结果表明:河谷地形显著放大隧道衬砌的加速度响应,且随着地震波入射角度的增大,加速度放大效应逐渐增强,最大加速度放大系数可达1.69;加速度放大效应的强度与河谷几何形态有关,梯形河谷的放大效应最强,圆形河谷次之,V形河谷最弱;隧道与河谷的相对位置显著影响衬砌的加速度放大效应,当隧道位于河谷前方时,地震波任意入射角度下衬砌加速度均被显著放大,当隧道位于河谷后方时,衬砌加速度仅在地震波垂直入射时被放大,倾斜入射削弱了河谷的地形效应;靠近河谷侧隧道拱肩及完整侧隧道拱脚处衬砌应力响应受河谷地形的影响较大,在抗震设防中应重点关注。

关键词:隧道;河谷地形效应;加速度放大系数;非一致激励;动力响应

中图分类号:TU352.1;P315.9 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2026)05-1115-10

DOI:10.20000/j.1000-0844.20250801001

Seismic dynamic response of a tunnel near valleys under non-uniform excitation

ZHU Hui[1], SUN Weiyu[1,2], YAN Songhong[1,2], OU Erfeng[1], LI Jing[1], LIANG Qingguo[1,2], ZHANG Jian[3]

(*1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;*
2. Key Laboratory of Road & Bridge and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou 730070, Gansu, China;
3. Gansu Provincial Transportation Planning, Survey and Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730030, Gansu, China)

Abstract: Valley topography produces a pronounced seismic amplification effect that can severely

收稿日期:2025-08-01

基金项目:国家自然科学基金项目(52208392);高铁联合基金项目(U2468217)

第一作者简介:朱 辉(1997-),男,博士研究生,主要从事隧道抗震方面的研究。E-mail:342525561@qq.com。

通信作者:孙纬宇(1988-),男,博士,副教授,博士生导师,主要从岩土与隧道工程方面的研究。E-mail:sunwy_11@163.com。

compromise the seismic performance of large infrastructure at the site. To investigate the influence of valley topography on the seismic dynamic response of a nearby tunnel, a seismic wave input method based on viscoelastic artificial boundaries was used to apply non-uniform excitation of SV waves at different incident angles. Considering various relative positions between the tunnel and the valley, multiple valley site models, including circular, trapezoidal, and V-shaped configurations, were established for nonlinear dynamic time-history analysis. A complete site model without the valley topographic effect served as a reference to systematically analyze the influence of valley topography on the acceleration distribution, acceleration amplification factor, and lining stress of the nearby tunnel. The results indicate that valley topography markedly amplifies the acceleration response of the tunnel lining. As the seismic wave incidence angle increases, the acceleration amplification effect progressively strengthens, with the maximum amplification factor reaching 1.69. The intensity of this amplification effect depends on the valley geometry: the trapezoidal valley exhibits the strongest amplification, followed by the circular valley, whereas the V-shaped valley produces the weakest effect. The relative position of the tunnel with respect to the valley also governs the acceleration amplification effect on the lining. When the tunnel is located in front of the valley, the lining acceleration is markedly amplified at all seismic wave incident angles. When the tunnel is located behind the valley, the lining acceleration is amplified only under vertical incidence; oblique incidence weakens the valley's topographic effect. The lining stress response at the arch shoulder on the valley side and at the arch foot on the opposite side is strongly influenced by valley topography and warrants particular attention in seismic fortification design.

Keywords: tunnel; valley topographic effect; acceleration amplification factor; non-uniform excitation; dynamic response

0 引言

截至2024年底,我国已运营铁路隧道18 997座[1]、公路隧道28 724座[2],是目前世界上交通隧道数量最多、规模最大、发展速度最快的国家。随着隧道建设规模的不断扩大,受地质条件和线路走向的限制,越来越多的隧道在邻近河谷地区修建。河谷场地由于其特殊的几何形状,会对地震波传播产生叠加作用,使河谷盆地中心产生聚焦效应,河谷地表面产生局部放大效应。在汶川地震[3]、泸定地震[4]等震害调查中,已证实这种地形放大效应会对场地内大型基础设施的抗震性能产生严重影响。因此,邻近河谷场地交通基础设施的抗震安全问题应引起特别关注。

目前,对于河谷场地的地形效应,国内外学者分别采用解析法和数值法进行了广泛研究。解析法通常将河谷简化为圆形或圆弧形等规则地形。针对不同地震波型,学者们开展了系统的研究。如Trifunac[5]、Wong等[6]、梁建文等[7]研究了河谷场地对平面SH波的动力放大作用;Cao等[8]、梁建文等[9]研究了P波作用下圆弧形沉积河谷动力响应的解析解;Lee等[10]研究了不同深宽比的圆形河谷对SV波的散射和衍射作用。相比于解析法,数值法不受地形条件限制,应用更加广泛。如周国良等[11]、孙纬宇等[12]研究了SV波入射下梯形河谷的地震动分布特征;刘必灯等[13]研究了SV波入射下V形河谷的地震动分布规律;陈云雀等[14]分析了P波入射下U形与V形河谷场地的地震响应特征。以上研究为河谷场地的地震响应分析提供了重要理论基础,但仍存在一定局限和不足:一方面,相关研究大多集中于河谷场地自身的地震动分布规律及地形放大效应,缺乏对河谷场地内地下结构动力特性的系统研究;另一方面,已有涉及邻近河谷工程结构的研究多以桥梁[15-16]、高土石坝[17]、框架[18]等地上结构为主,对于邻近河谷的隧道等地下结构的研究较少。此外,尽管已有少量工作涉及河谷地形与地下结构的相互作用,如禹海涛等[19]、张中杰等[20]通过振动台试验研究了邻近河谷地铁车站的地震响应特征;Gao等[21]分析了SH波作用下半圆形河谷与邻近隧道间的多重散射效应,但相关研究

往往局限于单一理想化河谷形态或特定工况，尚未全面考虑不同几何形态河谷及隧道与河谷相对位置的耦合效应。因此，邻近河谷场地隧道结构的地震动力响应仍亟需深入研究。

鉴于此，本文在考虑河谷场地与隧道结构相对位置的基础上，建立圆形、梯形和V形三种不同类型的河谷场地模型。基于这些模型，进行非线性动力时程分析，并以无河谷地形效应的完整场地为参照，研究地震动非一致激励下邻近河谷隧道的动力响应特征，揭示不同几何形态河谷及隧道与河谷相对位置对隧道结构响应的影响规律。

1　地震动非一致激励输入方法

在隧道等地下结构的抗震研究中，通常假设地震波的入射方向为垂直方向，这对于远场地震来说是成立的。但对于近场地震而言，地震波是以一定角度倾斜入射的，而倾斜入射引起的非一致变形会对地下结构的地震响应规律产生严重影响。地震波的倾斜入射是对地下结构产生非一致激励的主要原因，而非一致激励地震波的输入主要考虑地震波的行波效应。基于黏弹性人工边界的地震波动输入方法，可实现地震波任意角度的入射，并可以考虑地震波的行波效应，是目前被诸多学者广泛采用的一种地震动输入方法。

地震波动输入方法的核心是将地震波转化为作用在模型黏弹性人工边界上的等效节点荷载。黏弹性人工边界可以模拟半无限地基的辐射阻尼与弹性恢复性能，主要通过在模型边界上设置连续分布的弹簧-阻尼器系统来实现。刘晶波等[22]系统提出了二维一致黏弹性人工边界，并对其参数进行了标定，具体表示为：

$$\begin{cases} K_{\mathrm{BN}}=\alpha_{\mathrm{N}}G/R,\ C_{\mathrm{BN}}=\rho C_{\mathrm{P}} \\ K_{\mathrm{BT}}=\alpha_{\mathrm{T}}G/R,\ C_{\mathrm{BT}}=\rho C_{\mathrm{S}} \end{cases} \tag{1}$$

式中：K_{BN}、K_{BT}分别为法向和切向的弹簧刚度系数；C_{BN}、C_{BT}分别为法向和切向的阻尼系数；α_{N}、α_{T}分别法向和切向的人工边界修正系数，分别取1.0和0.5；ρ为介质密度；G为剪切模量；R为波源到人工边界的距离；C_{P}和C_{S}分别为压缩波速和剪切波速。

基于黏弹性人工边界，可将地震动转化为模型边界上的等效节点荷载。图1为地震波以角度α入射时的自由波场分解与地震波的传播过程。假设作用在人工边界上的等效节点荷载为F_{B}，则左、右边界及底边界等效节点荷载分量为：

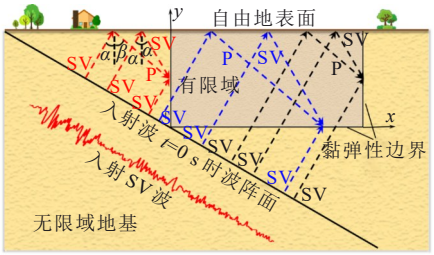


图1　自由波场分解及地震波传播过程

Fig. 1　Free wave field decomposition and seismic wave propagation process

$$\begin{cases} F_{\mathrm{Bx}}^{-x}(t)=\left[K_{\mathrm{BN}}u_{\mathrm{Bx}}^{-x}(t)+C_{\mathrm{BN}}\dot{u}_{\mathrm{Bx}}^{-x}(t)+\sigma_x^{-x}\right]A_{\mathrm{B}} \\ F_{\mathrm{By}}^{-x}(t)=\left[K_{\mathrm{BT}}u_{\mathrm{By}}^{-x}(t)+C_{\mathrm{BT}}\dot{u}_{\mathrm{By}}^{-x}(t)+\tau_{xy}^{-x}\right]A_{\mathrm{B}} \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} F_{\mathrm{Bx}}^{x}(t)=\left[K_{\mathrm{BN}}u_{\mathrm{Bx}}^{x}(t)+C_{\mathrm{BN}}\dot{u}_{\mathrm{Bx}}^{x}(t)+\sigma_x^{x}\right]A_{\mathrm{B}} \\ F_{\mathrm{By}}^{x}(t)=\left[K_{\mathrm{BT}}u_{\mathrm{By}}^{x}(t)+C_{\mathrm{BT}}\dot{u}_{\mathrm{By}}^{x}(t)+\tau_{xy}^{x}\right]A_{\mathrm{B}} \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} F_{\mathrm{Bx}}^{-y}(t)=\left[K_{\mathrm{BT}}u_{\mathrm{Bx}}^{-y}(t)+C_{\mathrm{BT}}\dot{u}_{\mathrm{Bx}}^{-y}(t)+\tau_{yx}^{-y}\right]A_{\mathrm{B}} \\ F_{\mathrm{By}}^{-y}(t)=\left[K_{\mathrm{BN}}u_{\mathrm{By}}^{-y}(t)+C_{\mathrm{BN}}\dot{u}_{\mathrm{By}}^{-y}(t)+\sigma_y^{-y}\right]A_{\mathrm{B}} \end{cases} \tag{4}$$

式中：上标表示节点B所在边界的外法线方向，下标表示节点B的荷载分量方向，与坐标轴方向相同时为＋，与坐标轴方向相反为－；A_{B}为节点B所影响的面积。

通过编制ANSYS-APDL程序即可实现上述地震波的非一致激励输入。为验证该输入程序的正确性，建立验证数值计算模型如图2所示。模型的整体尺寸为1 800 m（宽）×600 m（高）。模型上边界为自由地表面，左、右边界和底边界分别设置黏弹性人工边界。模型的主要参数为：弹性模量E=1.25 GPa，泊松比μ=0.3，密度ρ=2 000 kg/m^3。在模型对称轴0 m、300 m、600 m深度处分别设置A、B、C三个监测点。采用一个脉冲波作为入射SV波，入射角α取为20°。入射波位移时程如图3所示。

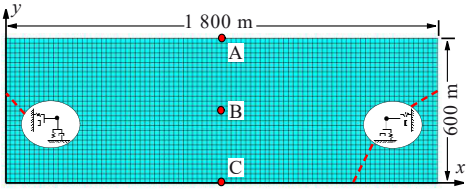


图2　弹性半空间有限元模型

Fig. 2　Finite element model of elastic half-space

图4给出了SV波以20°入射时A、B、C三个监测点x方向上的理论解和数值解结果。可以发现各监测点位移时程的理论解和计算解基本吻合，这验证了本文所编制的SV波入射程序的正确性。

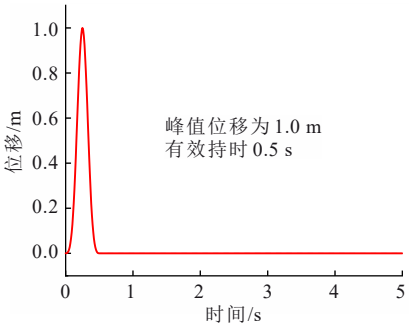


图 3 入射波位移时程曲线

Fig. 3 Displacement time history of incident wave

图 5 给出了 SV 波以 20°入射时均匀弹性半空间的位移场云图。从图中可以看到，入射波的传播过程与文献[23]中半圆形河谷场地的位移场云图变化规律基本一致，这进一步证明了本文数值计算程序的可靠性。

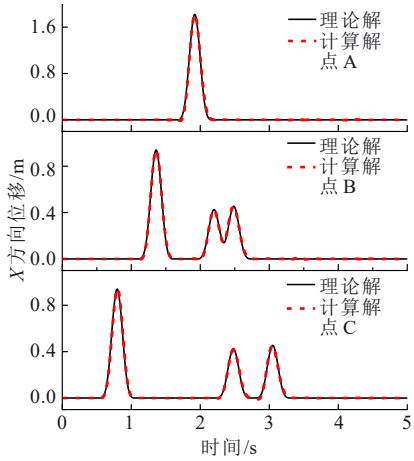
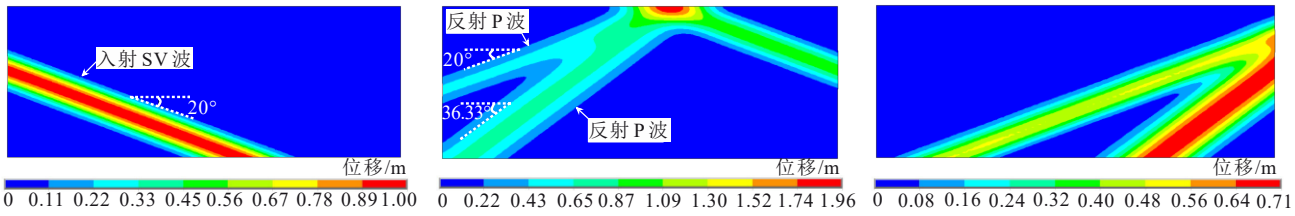


图 4 监测点处位移时程曲线

Fig. 4 Displacement time history curve at monitoring points



(a) t=0.90 s (b) t=2.00 s (c) t=2.70 s

图 5 SV 波 20°入射时半空间位移场云图

Fig. 5 Displacement field contour of half-space for SV wave incident at 20°

2 近河谷隧道数值模型及参数

不同河谷形态对场地地震动放大效应和邻近地下结构地震响应的影响并不一致。选取圆形(常见于长期风化或滑坡堆积形成的弧形谷地)、梯形(常见于冲积作用或人工整治后的宽缓谷地)及 V 形(常见于山区强烈切割作用下形成的陡峻峡谷)等三类典型河谷场地进行数值模拟，分别对应于平缓、过渡与陡峭三种坡度条件，并以无河谷的完整场地为参照进行对比分析。模型整体尺寸为 552 m(宽)×160 m(高)，河谷深度和宽度分别为 50 m 和 100 m，建立的计算模型如图 6 所示。限于篇幅，此处仅给出圆形河谷场地的有限元模型，其余河谷场地模型的尺寸、位置等均与之相同。

隧道最大洞径 D 为 16.14 m，最大净空高度为 12.48 m，埋深取河谷深度的一半(25 m)，距河谷顶部边缘的水平距离取 0.5 倍隧道最大洞径。隧道初期支护(C25 混凝土)和二次衬砌(C35 钢筋混凝土)的厚度分别为 0.35 m 和 0.70 m，均采用弹性模型；围岩级别为 V 级，采用 DP 本构模型(服从 Drucker-Prager 屈服准则)。围岩与支护结构均采用二维平面应变单元 PLANE42 进行模拟。衬砌及隧道附近围岩的最大网格尺寸分别约为 0.8 m 和 1.6 m，其余围岩最大网格尺寸约为 2.5 m，小于围岩中最小剪切波长 λ_{min} 的 1/10。主要材料参数如表 1 所列。

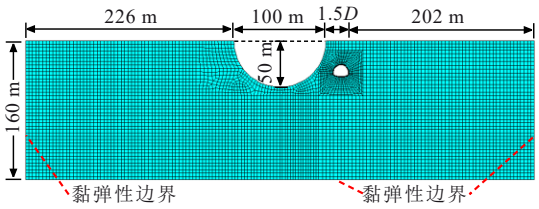


图 6 近河谷隧道有限元模型

Fig. 6 Finite element model of the tunnel near valley

表 1 模型材料参数

Table 1 Material parameters of the model

材料	密度 /(kg/m³)	弹性模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角/(°)
初期支护	2 300	25.0	0.20	-	-
二次衬砌	2 500	32.5	0.20	-	-
围岩	2 000	0.8	0.30	0.15	30.0

入射地震波选用经典的 El-Centro 波，输入时长截取为 40 s，时间步长为 0.02 s，加速度幅值调整为 $0.2g$。入射波加速度时程如图 7 所示。计算中采用黏性阻尼（Rayleigh 阻尼）模拟地基的黏滞性，即：

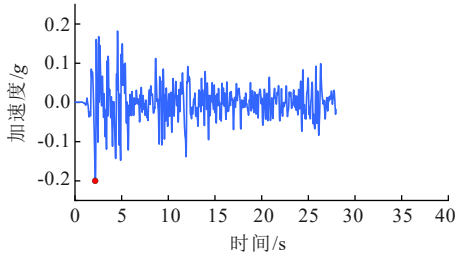


图 7　入射地震波加速度时程

Fig. 7　Acceleration time history of incident seismic wave

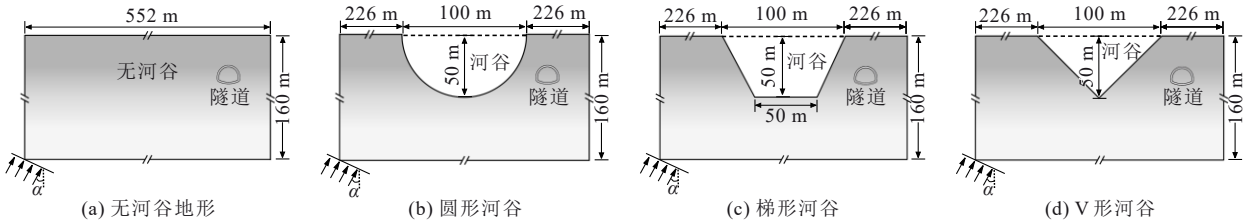
$$[C]_{\text{Rayleigh}}=\alpha_M[M]+\beta_K[K] \tag{5}$$

式中：$[C]_{\text{Rayleigh}}$为结构阻尼矩阵；$[M]$为结构质量矩阵；$[K]$为结构刚度矩阵；α_M和β_K分别为质量矩阵系数和刚度矩阵系数，计算中可先对结构进行模态分析，求得结构的自振频率后按式（6）求解。

$$\alpha_M=\frac{4\pi\xi f_i f_j}{f_i+f_j}\quad \beta_K=\frac{\xi}{\pi(f_i+f_j)} \tag{6}$$

式中：ξ为地基阻尼比，本文取 0.05；f_i和f_j分别为模型第 i 和第 j 阶自振频率，计算中分别取第 1、3 阶自振频率[12]。

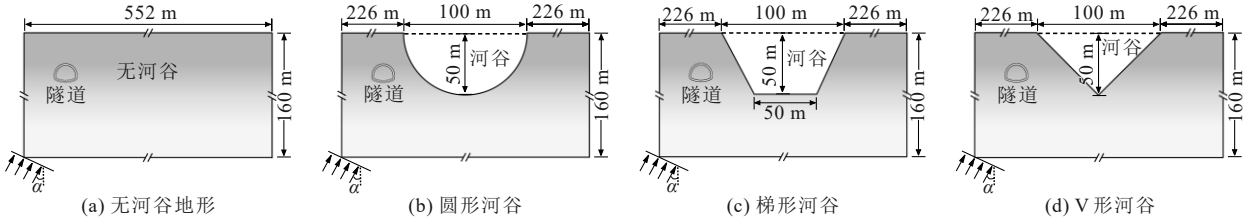
根据地震波动法输入中 SV 波入射角 α 与 P 波反射角 β 的关系：$\sin\beta=\left(C_{\text{P}}/C_{\text{S}}\right)\sin\alpha$，当 P 波反射角 $\beta=90°$ 时，入射角 α 达到临界值[24-26]，即 $\alpha_{\text{cr}}=\arcsin\left(C_{\text{S}}/C_{\text{P}}\right)\approx 32.26°$。因此，本文假设地震波从模型左下角与竖直方向成 α 角倾斜入射，入射角在临界值范围内取 0°（垂直入射）、15°和 30°。隧道与河谷的相对位置对地震动的传播机制具有显著影响。为探究其对隧道地震响应的影响，本文设置了两种工况进行对比分析：工况一为隧道位于河谷后方，即地震波先穿越河谷地形，再作用于隧道结构；工况二为隧道位于河谷前方，即地震波先作用于隧道，随后传播至河谷区域。两种工况的计算模型如图 8～9 所示。



(a) 无河谷地形　(b) 圆形河谷　(c) 梯形河谷　(d) V 形河谷

图 8　隧道位于河谷后方模型示意图

Fig. 8　Schematic diagram of the model with tunnel behind the valley



(a) 无河谷地形　(b) 圆形河谷　(c) 梯形河谷　(d) V 形河谷

图 9　隧道位于河谷前方模型示意图

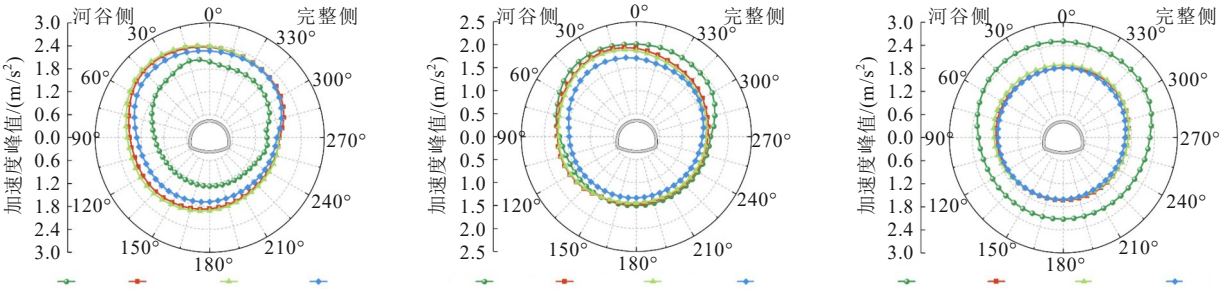
Fig. 9　Schematic diagram of the model with tunnel in front of the valley

3　邻近河谷隧道地震响应结果分析

3.1　隧道衬砌加速度分布特征

为获得衬砌加速度的分布特征，对不同河谷地形下隧道二衬内缘的加速度峰值进行提取，并取其绝对值，结果如图 10～11 所示。

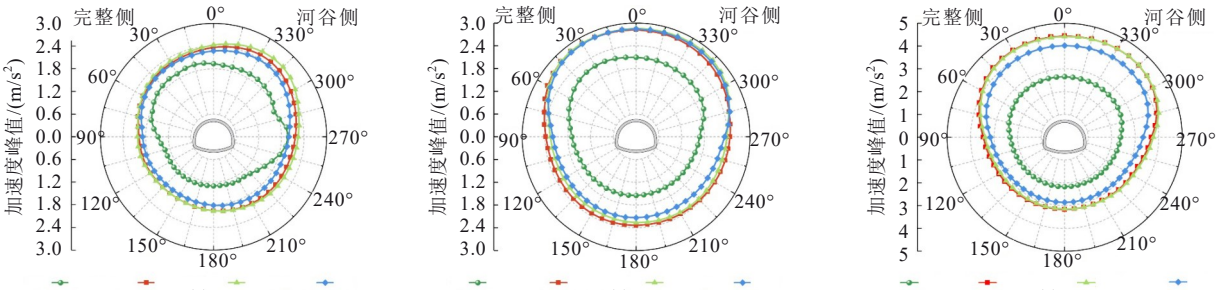
图 10 为隧道位于河谷后方时衬砌加速度峰值分布情况。可以看出，当地震波 0°入射时，与无河谷的完整场地相比，圆形、梯形及 V 形河谷场地的隧道衬砌加速度峰值均显著增大，三种场地衬砌平均加速度增长幅值分别为 34.18%、36.47% 和 25.27%。不同河谷场地下，仰拱、拱脚处加速度峰值相对较小，而拱顶、拱肩处加速度峰值较大，其中左拱肩处加速度峰值明显大于其他部位。这一现象表明，距离地表及河谷边缘越近，地震动的加速度放大效应越强烈。当地震波 15°和 30°入射时，相



(a) 0°入射 (b) 15°入射 (c) 30°入射

图 10 隧道位于河谷后方时衬砌加速度峰值分布

Fig. 10 Peak acceleration distribution of the lining with tunnel behind the valley



(a) 0°入射 (b) 15°入射 (c) 30°入射

图 11 隧道位于河谷前方时衬砌加速度峰值分布

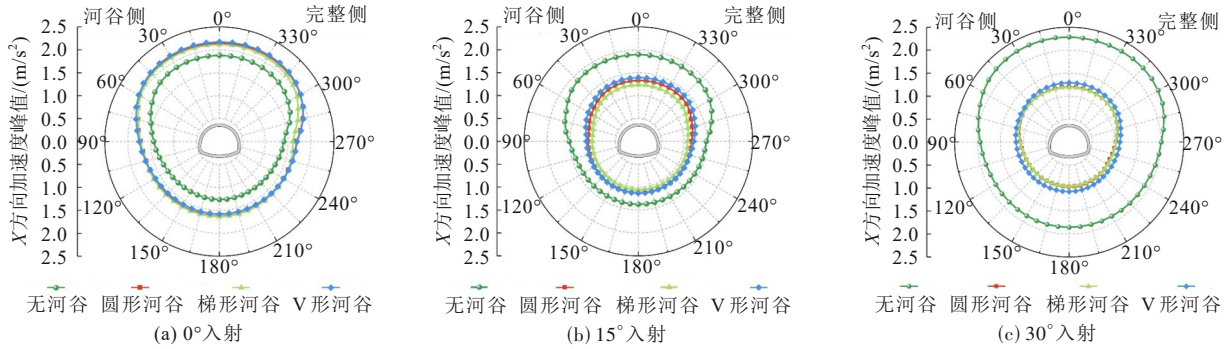
Fig. 11 Peak acceleration distribution of the lining with tunnel in front of the valley

较于完整场地，不同河谷场地的隧道衬砌加速度峰值均有所减小。其中，地震波 15°入射时，三种场地衬砌平均加速度减小幅值分别为 3.32%、5.12% 和 13.20%；而当地震波 30°入射时，隧道衬砌加速度峰值的减小趋势最为显著，分别为 24.43%、23.38% 和 26.32%。同时发现，地震波 15°和 30°入射时，隧道衬砌加速度峰值沿隧道中心对称分布，靠近河谷边缘一侧的左拱肩处加速度峰值与右拱肩处基本一致，河谷边缘加速度放大效应明显减弱。

图 11 为隧道位于河谷前方时衬砌加速度峰值分布情况。可以看出，当地震波 0°、15°和 30°入射时，与完整场地相比，圆形、梯形及 V 形河谷地形下隧道衬砌加速度峰值均显著增大，且增大效应随地震波入射角度的增加而增强。其中，当地震波 0°入射时，三种场地衬砌平均加速度增长幅值分别为 32.46%、35.27% 和 24.95；地震波 15°入射时，分别为 42.35%、40.09% 和 35.57%；地震波 30°入射时，分别为 55.64%、55.23% 和 40.82%。此外，当地震波 0°入射时，靠近河谷边缘右拱肩处的加速度峰值明显大于其他部位，而当地震波 15°和 30°入射时，衬砌加速度峰值则沿隧道中心对称分布。

基于以上分析发现，当隧道位于河谷前方时，河谷场地隧道衬砌加速度在地震波任意角度入射下均表现出明显的地形放大效应；而当隧道位于河谷后方时，仅在地震波 0°入射时出现了地形放大效应。为分析这一现象的原因，提取了隧道位于河谷后方时衬砌 X 方向（水平向）和 Y 方向（竖向）的加速度峰值，并进行对比，结果如图 12～13 所示。

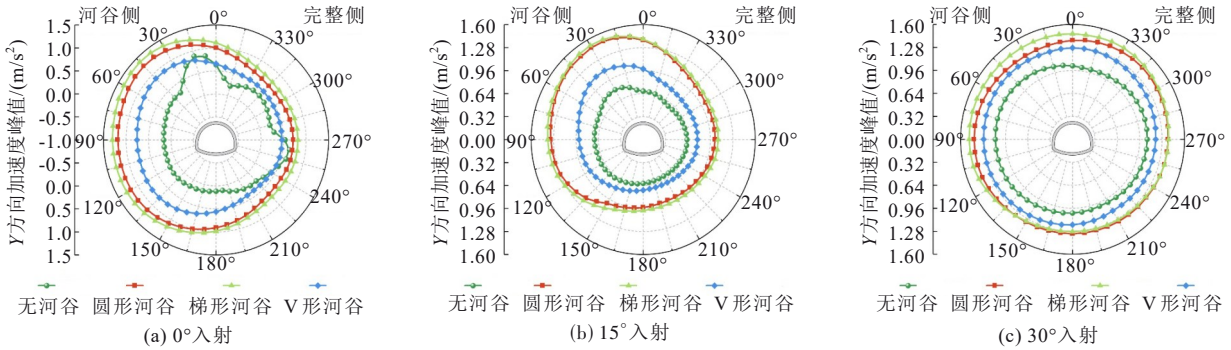
由图 12～13 可知，与完整场地相比，地震波任意角度入射下隧道衬砌 Y 方向的加速度峰值均显著增大（0°入射时，圆形、梯形及 V 形河谷场地衬砌 Y 方向平均加速度增长幅值分别为 307.95%、350.00% 和 165.76%；15°入射时，分别为 75.99%、82.08% 和 28.63；30°入射时，分别为 29.23%、32.72% 和 16.52%），且在地表及河谷边缘区域地震动放大效应最为突出。相比之下，隧道衬砌在 X 方向的加速度峰值变化规律则较为复杂：当地震波 0°入射时，X 方向的加速度峰值较完整场地出现轻微增大，三种场地的平均加速度增长幅值分别为 21.22%、20.19% 和 21.04%；而当地震波 15°和 30°倾斜入射时，X 方向的加速度峰值则显著减小，其中 15°入射的平均加速度减小幅值分别为 24.72%、



(a) 0°入射　(b) 15°入射　(c) 30°入射

图 12　隧道位于河谷后方时衬砌 X 方向加速度峰值分布

Fig. 12　X-direction peak acceleration distribution of the lining with tunnel behind the valley



(a) 0°入射　(b) 15°入射　(c) 30°入射

图 13　隧道位于河谷后方时衬砌 Y 方向加速度峰值分布

Fig. 13　Y-direction peak acceleration distribution of the lining with tunnel behind the valley

30.06% 和 22.48%，30° 入射时分别为 47.35%、47.55% 和 42.89%。造成 X 方向的加速度峰值减小的主要原因在于斜入射地震波与河谷地形的相互作用：当地震波 0°垂直入射时，地震波振动方向与 X 方向一致，河谷地形的反射波和散射波与入射波在 X 方向叠加，导致河谷后方局部区域的 X 方向加速度增大；而当地震波 15°和 30°倾斜入射时，地震波传播方向与 X 方向之间存在夹角，波场能量在空间上重新分配，河谷地形的散射作用使部分 X 方向的波能量转化为沿 Y 方向或沿河谷坡面传播的散射波，从而导致 X 方向加速度出现衰减。因此，当隧道位于河谷后方且地震波倾斜入射时，衬砌加速度未表现出明显的地震动放大效应。

3.2　隧道衬砌加速度放大系数

定义衬砌加速度放大系数为河谷场地中隧道衬砌最大加速度峰值 A_{valley} 与完整场地中隧道衬砌最大加速度峰值 A_{intact} 之比。图 14 为不同河谷地形下隧道衬砌加速度放大系数的变化规律。

从图 14 中可以看出，当隧道位于河谷前方时，衬砌加速度放大系数均大于 1，表明河谷地形对邻近隧道衬砌加速度具有显著的放大效应。从不同

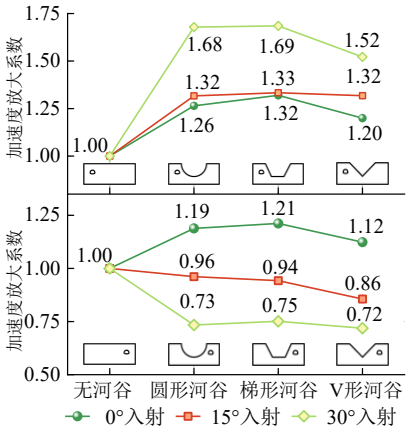


图 14　隧道衬砌加速度放大系数

Fig. 14　Acceleration amplification factor of the tunnel lining

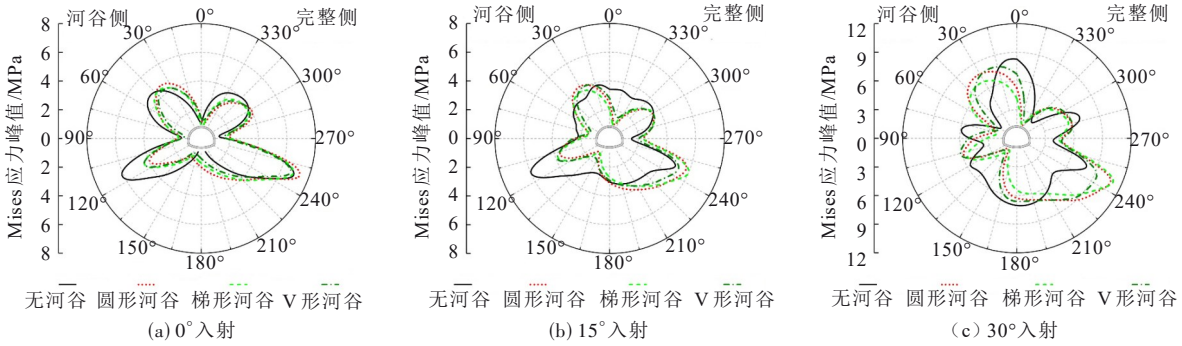
河谷地形来看，在河谷深度与河谷地表宽度相同的情况下，梯形河谷对隧道衬砌加速度的放大效应最为显著，圆形河谷次之，V 形河谷的放大效应最弱。其主要原因在于，不同几何形态的河谷对地震波能量的聚集与散射特性存在差异。在相同深宽比条件下，梯形河谷因上宽下窄，入射波在坡脚与坡面的多次反射，易产生能量聚焦效应，从而导致放大效应最为显著。圆形河谷的边界曲率连续，聚焦作用相对较弱，放大效应居中。V 形河谷边坡陡峭，入

射波能量更多以散射形式耗散，难以形成能量聚集，因此放大效应最弱。同时，河谷边界的波场模式转换也会导致放大效应的差异。梯形河谷的平直边坡更有利于表面波的生成与叠加，而V形河谷陡坡更易引起波散射和能量分散，不利于能量聚集。此外，从地震波入射角度来看，随着地震波入射角度的增大，河谷地形的加速度放大系数逐渐增大。由此可见，地震波倾斜入射所引起的非一致激励会加剧河谷地形对隧道加速度的放大效应。

当隧道位于河谷后方时，仅在地震波0°入射（垂直入射）时，河谷地形对隧道衬砌加速度具有放大效应，且加速度放大系数最大为1.21（圆形河谷）；当地震波15°和30°倾斜入射时，河谷场地隧道衬砌加速度放大系数均小于1。这一现象表明，地震波倾斜入射会削弱河谷地形对地震动的放大效应，且随着地震波入射角度的增大，这种削弱作用愈加明显。因此，在邻近河谷隧道的抗震设防中，应重点考虑地震活跃带、河谷地形及邻近河谷隧道之间的相对位置。

3.3 隧道衬砌应力分布特征

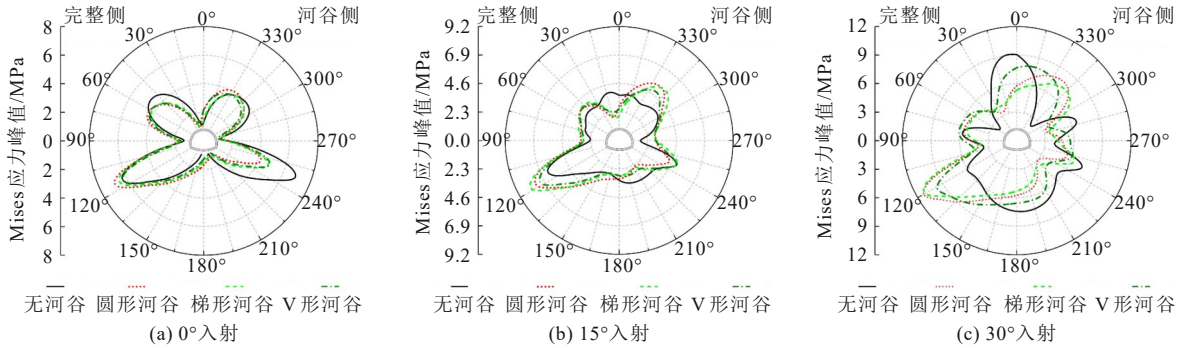
为分析不同工况下衬砌的整体应力分布水平和相对变化趋势，提取了隧道二衬内缘的Mises应力峰值，结果如图15～16所示。可以发现，衬砌的应力分布特征不受隧道和河谷相对位置的影响。无论隧道位于河谷前方或后方，衬砌的应力分布结果基本一致，且两者呈镜像对称。随着地震波入射角度的增加，衬砌的Mises应力峰值逐渐增大。



(a) 0°入射 (b) 15°入射 (c) 30°入射

图15 隧道位于河谷后方时衬砌Mises应力

Fig. 15 Mises stress distribution of the lining with tunnel behind the valley



(a) 0°入射 (b) 15°入射 (c) 30°入射

图16 隧道位于河谷前方时衬砌Mises应力

Fig. 16 Mises stress distribution of the lining with tunnel in front of the valley

在地震波不同角度入射下，各河谷地形对隧道衬砌应力的影响规律基本一致。具体而言，当地震波0°入射时，隧道衬砌应力呈“X”形分布，左、右拱肩及左、右拱脚处的Mises应力较大。这是由于地震波正向（垂直向上）入射时，入射波与隧道圆拱边界发生对称反射和叠加，能量在拱肩与拱脚处交叉集中，从而形成典型的“X”形分布。与完整场地相比，河谷场地隧道在靠近河谷侧拱肩及完整侧拱脚处的Mises应力有所增大，而与其共轭方向的拱肩及拱脚处的Mises应力显著减小。其原因在于河谷地形的存在打破了波场对称性，导致能量在靠近河谷侧聚集，从而放大该侧拱肩与对侧拱脚的应力，而与之共轭位置的应力则减弱。当地震波15°和30°倾斜入射时，隧道衬砌应力呈不规则分布，完整场地下隧道拱顶及仰拱部位的Mises应力较大，而对于河谷场地隧道，衬砌应力峰值则表现出明显的偏

转特性。这主要是因为地震波入射角度增大后，波动传播路径倾斜，导致波场不再对称，叠加效应偏向河谷一侧，使靠近河谷侧的拱肩和完整侧的拱脚处应力显著增大，且随着地震波入射角度的增加，这种增大趋势愈加明显。由此可见，在地震作用下，邻近河谷隧道结构中，河谷地形对靠近河谷侧拱肩和完整侧拱脚处的衬砌应力响应具有显著的地形放大效应。

4　结论

（1）地震作用下，河谷地形对邻近河谷隧道的衬砌加速度具有显著的地形放大效应，且该放大效应受隧道与河谷相对位置及地震波入射角度的影响。

（2）当隧道位于河谷前方时（地震波先作用于隧道后传播至河谷），三种入射角度下隧道衬砌加速度均表现出明显的地形放大效应；当隧道位于河谷后方时（地震波先经过河谷后作用于隧道），仅在地震波垂直入射（0°）时出现放大效应，而在倾斜入射（15°、30°）时衬砌加速度反而减弱。

（3）在入射角临界值范围（$0° \leqslant \alpha \leqslant 30°$）内，地震波倾斜入射引起的非一致激励会加剧河谷地形对隧道加速度的放大效应，且随着入射角度的增加，加速度放大效应逐渐增强。

（4）河谷几何形态对隧道衬砌加速度放大效应的影响明显，在相同深宽比条件下，梯形河谷放大效应最强，圆形次之，V形最弱。

（5）衬砌应力分布呈现特定规律：地震波垂直入射（0°）时，衬砌应力呈“X”形分布；15°和30°倾斜入射时，呈不规则分布。完整场地中衬砌应力分布基本保持左右对称，而在河谷地形条件下则表现为明显的偏转特征，其中靠近河谷侧拱肩与完整侧拱脚处的应力响应最大。

（6）本文仅分析了隧道与河谷相对位置及不同河谷形态对隧道地震响应的影响，尚未考虑隧道与河谷之间的距离、隧道埋深等因素，尤其是当隧道位于河谷下方时，地震波传播路径的变化会显著影响隧道的地震响应。此外，二维模型无法全面反映地震波的空间传播特性，因此，后续研究需进一步引入三维模型，并结合振动台试验等方法，深入探讨邻近河谷隧道的地震响应。

参考文献（References）

[1] 巩江峰，王伟，黎旭，等. 截至2024年底中国铁路隧道情况统计及2024年新开通项目隧道情况介绍[J]. 隧道建设（中英文），2025，45(3)：636-653.
GONG Jiangfeng，WANG Wei，LI Xu，et al. Statistics of China's railway tunnels by the end of 2024 and overview of tunnels of new projects in 2024[J]. Tunnel Construction，2025，45(3)：636-653.

[2] 中华人民共和国中央人民政府. 2024年交通运输行业发展统计公报[EB/OL].(2025-06-12)[2025-7-18]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202506/content_7027415.htm.
The Central People's Government of the People's Republic of China. Statistical bulletin on the development of the transport industry 2024 [EB/OL]. (2025-06-12) [2025-07-18]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202506/content_7027415.htm.

[3] 李平，刘红帅，薄景山，等. 汶川M_S8.0地震河谷地形对汉源县城高烈度异常的影响[J]. 地球物理学报，2016，59(1)：174-184.
LI Ping，LIU Hongshuai，BO Jingshan，et al. Effects of river valley topography on anomalously high intensity in the Hanyuan Town during the Wenchuan M_S8.0 earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics，2016，59(1)：174-184.

[4] 赵仕兴，罗麒锐，熊峰，等. 复杂区域地形条件下台地地震动放大效应研究[J]. 振动与冲击，2024，43(23)：230-239，304.
ZHAO Shixing，LUO Qirui，XIONG Feng，et al. Amplification effect of plateau ground motion under complex regional terrain conditions[J]. Journal of Vibration and Shock，2024，43(23)：230-239，304.

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

[6] WONG H L，TRIFUNAC M D. Scattering of plane SH waves by a semi-elliptical canyon[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics，1974，3(2)：157-169.

[7] 梁建文，张郁山，顾晓鲁，等. 圆弧形层状沉积河谷场地在平面SH波入射下动力响应分析[J]. 岩土工程学报，2000，22(4)：396-401.
LIANG Jianwen，ZHANG Yushan，GU Xiaolu，et al. Surface motion of circular-arc layered alluvial valleys for incident plane SH waves[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2000，22(4)：396-401.

[8] CAO H，LEE V W. Scattering and differaction of plane P waves by circular cylindrical canyons with variable depth-to-width ratio [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering，1990，9(3)：141-150.

[9] 梁建文，严林隽，李军伟，等. 圆弧形沉积河谷场地在平面P波入射下的响应[J]. 岩土力学，2001，22(2)：138-143.
LIANG Jianwen，YAN Linjun，LI Junwei，et al. Response of circular-arc alluvial valleys under incident plane P waves[J]. Rock and Soil Mechanics，2001，22(2)：138-143.

[10] LEE V W，CAO H. Diffraction of SV waves by circular can-

yons of various depths[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1989, 115(9): 2035-2056.

[11] 周国良, 李小军, 侯春林, 等. SV波入射下河谷地形地震动分布特征分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1161-1166.
ZHOU Guoliang, LI Xiaojun, HOU Chunlin, et al. Characteristic analysis of ground motions of canyon topography under incident SV seismic waves[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1161-1166.

[12] 孙纬宇, 汪精河, 严松宏, 等. SV波斜入射下河谷地形地震动分布特征分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(20): 237-243, 265.
SUN Weiyu, WANG Jinghe, YAN Songhong, et al. Characteristic analysis of ground motions of a canyon topography under obliquely incident SV waves[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(20): 237-243, 265.

[13] 刘必灯, 周正华, 刘培玄, 等. SV波入射情况下V型河谷地形对地震动的影响分析[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(2): 17-24.
LIU Bideng, ZHOU Zhenghua, LIU Peixuan, et al. Influence of V-shaped canyon site on ground motions for incident SV waves[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(2): 17-24.

[14] 陈云雀, 何蕴龙. P波倾斜入射时河谷地震动响应研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2013, 46(6): 702-710.
CHEN Yunque, HE Yunlong. Research on valley seismic response under obliquely incident P-waves[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2013, 46(6): 702-710.

[15] 周国良, 李小军, 李铁萍, 等. SV波入射下峡谷地形对多支撑大跨桥梁地震反应影响分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1572-1578.
ZHOU Guoliang, LI Xiaojun, LI Tieping, et al. Canyon topography effects on seismic responses of multi-support bridge under incident SV seismic waves[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1572-1578.

[16] LI S, WANG M D, ZHANG F, et al. Near-source topographic effect on seismic responses of a multi-span continuous railway bridge crossing a symmetrical V-shaped canyon[J]. Journal of Central South University, 2022, 29(8): 2434-2448.

[17] 朱亚林, 孔宪京, 邹德高, 等. 河谷地形对高土石坝动力反应特性影响的分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1590-1597.
ZHU Yalin, KONG Xianjing, ZOU Degao, et al. Effect of valley topography on dynamic response properties of high earth-rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(9): 1590-1597.

[18] 黄博, 廖凯龙, 赵宇, 等. 考虑河谷地形影响的多层框架结构地震易损性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(4): 692-701, 723.
HUANG Bo, LIAO Kailong, ZHAO Yu, et al. Seismic fragility analysis of multi-storey frame structure considering effect of valley terrain[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(4): 692-701, 723.

[19] 禹海涛, 王治坤, 张中杰, 等. 近河谷地铁车站振动台模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(9): 1800-1808.
YU Haitao, WANG Zhikun, ZHANG Zhongjie, et al. Shaking table tests on a near-valley subway station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(9): 1800-1808.

[20] 张中杰, 禹海涛, 宋毅, 等. 圆形河谷地形效应振动台模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(5): 1102-1111.
ZHANG Zhongjie, YU Haitao, SONG Yi, et al. Shaking table tests on topographic effects of circular-arc valleys[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(5): 1102-1111.

[21] GAO Y F, CHEN X, ZHANG N, et al. Scattering of plane SH waves induced by a semicylindrical canyon with a subsurface circular lined tunnel[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(6): 06018012.

[22] 刘晶波, 谷音, 杜义欣. 一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1070-1075.
LIU Jingbo, GU Yin, DU Yixin. Consistent viscous-spring artificial boundaries and viscous-spring boundary elements[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1070-1075.

[23] 杜修力. 工程波动理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 374-375.
DU Xiuli. Theories and methods of wave motion for engineering[M]. Beijing: Science Press, 2009: 374-375.

[24] 刘金芳, 尹晓霞, 高凤. SV波斜入射下混凝土重力坝易损性分析[J]. 地震工程学报, 2024, 46(2): 318-324, 334.
LIU Jinfang, YIN Xiaoxia, GAO Feng. Fragility analysis of the concrete gravity dam under the oblique incidence of SV waves[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(2): 318-324, 334.

[25] 李明达, 郎秋玲, 张以晨, 等. 含侧部岩溶空洞盾构隧道的地震响应及损伤研究[J]. 地震工程学报, 2025, 47(6): 1315-1325.
LI Mingda, LANG Qiuling, ZHANG Yichen, et al. Seismic response and damage characteristics of shield tunnels adjacent to lateral karst cavities[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2025, 47(6): 1315-1325.

[26] ZHU H, YAN S H, SUN W Y, et al. Seismic response analysis of subway station under obliquely incident SV waves[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 9139.

(本文编辑:张向红)