

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240221001

# SV/P波斜入射下岩溶盾构隧道的地震响应和损伤研究\*

李明达<sup>1,2</sup>, 郎秋玲<sup>1</sup>, 李艳朋<sup>3</sup>, 张以晨<sup>1</sup>, 孟康<sup>4</sup>, 周晶<sup>2</sup>

(1. 长春工程学院吉林应急管理学院, 吉林 长春 130012; 2. 大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024; 3. 长春工程学院水利工程学院, 吉林 长春 130012; 4. 西华大学建筑与土木工程学院, 四川 成都 610039)

**摘要:** 为研究侧部岩溶空洞位于地震波传播路径隧道后方时, SV波、P波斜入射对隧道结构动力响应及损伤特征的影响。基于有限元软件实现了黏弹性人工边界和任意角度地震动的波动输入, 并验证其准确性。分析了SV波、P波不同角度地震波入射下, 隧道结构的变形和应力分布特征, 基于拉伸损伤因子与混凝土裂缝宽度的对应关系, 提出了3种损伤状态, 并比较了结构损伤演化过程和损伤特征。结果表明: 随着入射角度的增大, 结构变形和应力均增大, 应力空间分布差异明显, 且侧部岩溶空洞对近洞侧结构拉应力具有减弱效应。当SV波30°入射时, 拱顶和拱底的拉应力是P波的1.96倍和3.07倍。当SV波30°, P波60°入射时, 拱顶和拱底外表面均出现宽度大于0.2 mm的轴向裂缝。随着地震动持续作用, 隧道损伤逐渐加重, 最终在拱底出现局部损伤集中。侧部溶洞在一定程度上起到了消能减振的作用, 但也加剧了结构的局部破坏。

**关键词:** 盾构隧道; 岩溶溶洞; 地震响应; 损伤特征; 数值模拟

**中图分类号:** TU354 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)04-0796-11

## Study on Seismic Response and Damage Characteristics of Karst Shield Tunnels under Oblique Incidence of SV/P Waves

LI Mingda<sup>1,2</sup>, LANG Qiuling<sup>1</sup>, LI Yanpeng<sup>3</sup>, ZHANG Yichen<sup>1</sup>, MENG Kang<sup>4</sup>, ZHOU Jing<sup>2</sup>

(1. School of Jilin Emergency Management, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. School of Hydraulic Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China;

4. School of Architecture and Civil Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

**Abstract:** This study aims to investigate the influence of oblique incidence of SV and P waves on the dynamic response and damage characteristics of tunnel structures when a lateral karst cave is located behind the tunnel along the seismic wave propagation path. The viscous-spring artificial boundary and seismic wave input at arbitrary angles were implemented using finite element software, and their accuracy was verified. The deformation and stress distribution characteristics of the tunnel structure at different incidence angles of SV and P waves were analyzed. Based on the relationship between the tensile damage factor and concrete crack width, three damage states were proposed, and the structural damage evolution process and damage characteristics were compared. The results showed that as the

\* 收稿日期: 2024-02-21; 修回日期: 2024-06-28

基金项目: 吉林省教育厅科学研究项目(JJKH20251163KJ)资助

作者简介: 李明达(1992—), 男, 讲师, 博士。主要从事地下结构防灾减灾研究。E-mail: 837407645@qq.com

incidence angle increased, both the structural deformation and stress increased, with significant spatial differences in stress distribution. Additionally, the lateral karst cave had a mitigating effect on the tensile stress of the structure near the cave. When the incidence angle of the SV wave was  $30^\circ$ , the tensile stress at the vault and bottom was 1.96 times and 3.07 times that of the P wave, respectively. When the incidence angle of the SV wave was at  $30^\circ$  and the P wave  $60^\circ$ , axial cracks with a width greater than 0.2 mm appeared on the outer surfaces of the vault and bottom. As the seismic waves continued, the tunnel's damage gradually worsened, with localized damage eventually concentrated at the bottom. The lateral karst cave contributes to energy dissipation and vibration reduction to some extent, but it also exacerbates localized structural damage.

**Keywords:** shield tunnel; karst cave; seismic response; damage characteristics; numerical simulation

## 0 引言

隧道是城市生命线工程系统中的重要环节之一。近年来,强震造成的隧道破坏引起了学者们的极大关注<sup>[1-2]</sup>。受路线规划和场地条件等限制,隧道不可避免地穿过岩溶区或断层破碎带等不良地质区域。岩溶地区曾建造了许多隧道,如瑞士 Albula Tunnel II 隧道<sup>[3]</sup>,韩国 Sol-an 隧道<sup>[4]</sup>,我国宜万铁路隧道<sup>[5]</sup>等。岩溶作用会加速围岩强度退化,受到外部扰动时会更易引起围岩失稳塌陷,进而造成隧道损伤或破坏。

以往岩溶隧道的相关研究中,多关注其在施工过程中,面临突水、突泥等因素下结构的稳定性。学者们对此提出了多种模型来评估岩溶隧道的稳定性,如斗篷山隧道等<sup>[6]</sup>。同时,也采取了一系列措施减少施工过程中灾害的发生,如宜万铁路中采用排水系统,大型干燥空洞中桩基、承台等措施<sup>[5]</sup>。目前,对隧道侧部一定距离以外的岩溶空洞尚未有明确统一的处理范围限值,相关隧道工程将这一水平限值设定为 3 m<sup>[7-8]</sup>。对于需长期运营的隧道,侧部空洞会对其长期稳定性构成威胁。如隧道同时位于岩溶地区和地震多发区,在地震过程中结构易发生较大的形变,使得隧道破坏可能更为严重。目前,不良地质中,跨断层隧道的动力响应研究较多<sup>[9-10]</sup>,而岩溶地区隧道结构的地震研究较少。

臧万军等<sup>[11]</sup>比较了不同埋深下,有/无侧部溶洞对隧道结构的地震响应差异;何聪<sup>[12]</sup>研究了不同溶洞位置及洞径下,隧道结构的动力响应规律,并比较了柔性减震结构的减震效果;李明达等<sup>[13]</sup>分析了五种溶洞位置及其组合效应对隧道结构地震响应的规律;朱雯婷<sup>[14]</sup>基于溶洞随机分布,比较了不同体积率下隧道结构的地震响应规律。然而,

上述对隧道结构的研究主要基于混凝土结构线弹性模型分析结构的变形及受力特征,未进一步研究强震作用下隧道结构的破坏特征。且侧部岩溶空洞的相对位置可能会引起结构地震响应特性的差异,当岩溶空洞位于地震波传播路径隧道后方时,考虑溶洞引起的隧道结构支撑强度可能降低,进而产生更大的位移形变,增大隧道结构破坏风险。该相对位置关系对隧道结构地震响应的影响鲜有研究。L.Yan 等<sup>[15]</sup>研究了均质和多层非均质地基中圆形隧道在地震波斜入射下的横向地震响应。周双喜等<sup>[16]</sup>研究了 SV 波斜入射下双线并行圆形盾构隧道的地震响应特性。B.Sun 等<sup>[17]</sup>分析了 SV 波和 P 波入射方向和入射角度对隧道结构地震响应影响的差异。上述研究表明,地震波类型及入射角度对隧道动力响应特性的影响存在差异。

本文研究了侧部岩溶空洞位于地震波传播路径隧道后方时,SV 波、P 波不同角度入射对隧道结构地震动力响应及损伤特征的影响。分析了隧道结构变形和应力分布特征,通过引入拉伸损伤因子与裂缝宽度之间的对应关系,提出了结构损伤状态分类准则,探究了地震作用下隧道结构的损伤演化过程和损伤特征。研究结果对隧道设计、建设及监测具有一定指导意义。

## 1 黏弹性人工边界及模型验证

### 1.1 黏弹性人工边界与地震动输入

地下结构数值计算的研究中,已建立了许多方法来模拟人工边界。其中,黏弹性人工边界已得到广泛应用。它可以有效地模拟弹性地基恢复和辐射阻尼,并减少黏性边界的低频漂移误差。

黏弹性人工边界是通过在人工截断边界上设

置对应的弹簧和阻尼器并联形成的等效物理系统实现。为了准确输入地震波,对于人工截断边界上任一节点上的位移与应力,应与该结构在自由场中的位移和应力相等<sup>[18]</sup>。因此,人工截断边界节点的应力如下:

$$\sigma(x_l, y_l, z_l, t) = F_l(t) - f_l(t) \quad (1)$$

式中,  $F_l(t)$  表示假定施加在人工边界的节点  $l$  上的应力;  $\sigma(x_l, y_l, z_l, t)$  表示由位移产生的人工边界节点  $l$  处的应力;  $f_l(t)$  表示由弹簧和阻尼器计算的应力。阻尼器和弹簧的方程为:

$$f_l(t) = C\dot{u}(x_l, y_l, z_l, t) + Ku(x_l, y_l, z_l, t) \quad (2)$$

式中,  $C$  和  $K$  表示阻尼器和弹簧的系数。

结合公式(1)和(2),我们可以得到人工边界上的应力:

$$F_l(t) = \sigma(x_l, y_l, z_l, t) + C\dot{u}(x_l, y_l, z_l, t) + Ku(x_l, y_l, z_l, t) \quad (3)$$

## 1.2 模型验证

有限元数值计算中,单元尺寸会影响结果的准确性。廖振鹏研究中给出的建议尺寸如下<sup>[19]</sup>:

$$x_e \leq (1/10 \sim 1/8)\lambda_w \quad (4)$$

式中,  $\lambda_w$  是地震波所需的最小波长。

验证模型几何尺寸为 1 200 m(X向) × 1 000 m(Y向) × 1 200 m(Z向),单元尺寸为 20 m,如图 1(a)所示。模型顶部为自由边界,其他边界为黏弹性人工边界。参数与下文中围岩参数一致,如表 1 所示。

验证模型中,以脉冲函数时程曲线作为 SV 波从结构底部沿 X 轴正方向输入,脉冲函数为  $y(t) = 0.5[1 - \cos(2\pi t)]$  ( $0 \leq t \leq 1$  s)。文献[21]表明,SV 波斜入射时存在入射临界角,小于该角时,反射 SV 波和 P 波,大于该角时,仅反射 SV 波。本模型中,SV 波入射角度为 20°(角度为入射波和 Y 轴夹角),小于临界入射角 32.3°。图 1(b)为不同时刻下,波在模型中传播的位移云图,图中可以明显看出反射 SV 波和 P 波。图 1(c)为结构顶面中心 A 点和体中心 B 点的位移理论解和数值解。综上,可以看出黏弹性人工边界能够很好地模拟结构的地震响应。

表 1 验证模型的参数<sup>[20]</sup>

Table 1 Parameters of validation model<sup>[20]</sup>

弹性模量/ GPa	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	泊松比	P 波波速/ (m·s <sup>-1</sup> )	SV 波波速/ (m·s <sup>-1</sup> )
2	2 200	0.3	1 106	591

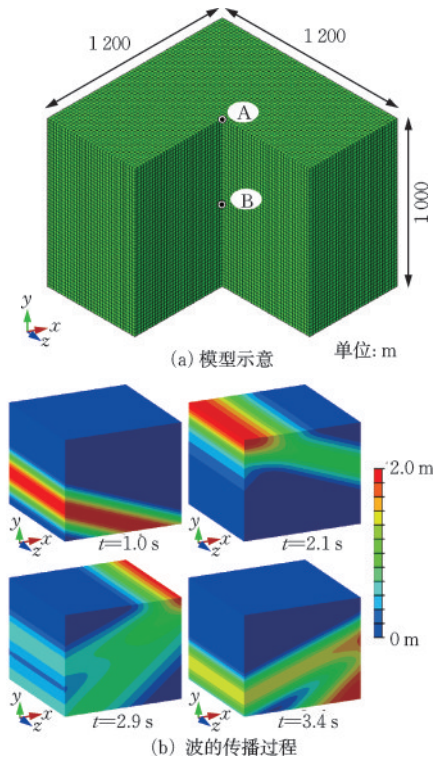


图 1 黏弹性人工边界验证

Fig.1 Validation of viscous-spring artificial boundary

## 2 地下结构模型

### 2.1 模型介绍

本研究以大连地铁某区间盾构隧道为工程背景,该隧道穿越多种地质条件,其中,岩溶发育区对隧道的稳定性更易造成不利影响,同时该地区还位于郯庐地震带,强震作用下,更易造成严重的人员伤亡和经济损失。

盾构隧道外径  $D$  为 11.8 m,外半径  $R$  为 5.9 m,幅宽为 2 m,厚度为 0.5 m。钢筋混凝土管片采用混凝土强度等级为 C50。根据施工图中的管片配筋图计算得到管片环向和纵向的配筋率分别为 1.48%

和1.09%。管片中钢筋、混凝土材料在受力时协同作用,对于受弯构件,简化为考虑弯曲刚度等效的原则,即保证折算前后抗弯刚度相等,依据钢筋的刚度贡献计算得到折算后混凝土的弹性模量为38.6 GPa。已有研究盾构隧道有限元模型计算中多采用“修正惯用法”进行结构的动力计算,参考同类型狮子洋盾构隧道关于横向刚度有效率的研究<sup>[22]</sup>及日本隧道规范建议值<sup>[23]</sup>,本文横向抗弯刚度有效率取为0.8。三维有限元模型中,折减后混凝土的弹性模量为31 GPa,相当于C35混凝土强度等级。隧道衬砌结构和围岩的材料参数见表2。混凝土衬砌和围岩分别采用了混凝土损伤塑性本构模型和摩尔-库仑本构模型。隧道结构和围岩的阻尼比均设定为5%。

表2 围岩、混凝土衬砌材料参数<sup>[20]</sup>

Table 2 Material parameters of surrounding rock and concrete lining<sup>[20]</sup>

材料	本构模型	输入参数	数值
混凝土衬砌	CDP	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2 500
		弹性模量/GPa	31.5
		泊松比	0.2
		拉伸屈服应力/MPa	2.2
		压缩屈服应力/MPa	23.4
围岩	MC	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2 200
		弹性模量/GPa	2
		泊松比	0.3
		内摩擦角/(°)	40
		粘聚力/MPa	4

三维模型在有限元软件ABAQUS中建立,为减少数值计算工作量,结构尺寸为120 m(X)×100 m(Y)×100 m(Z),隧道轴向长度(Z轴)为100 m,埋深12 m。模型中围岩与隧道均采用实体单元建立,围岩网格尺寸不超过6 m,隧道轴向网格尺寸为1 m,并对空洞附近局部区域、隧道环向及径向网格加密。根据相关文献对溶洞空间形态的研究<sup>[24]</sup>,在隧道侧部设置外径为D的球形空腔以模拟岩溶洞,与隧道的净距设置为0.2D。隧道与围岩之间采用Tie接触。隧道轴向划分6个关键截面,分别是位于中心位置的截面1-1,距中心位置R的截面2-2,之后每隔0.5R设置截面3-3、4-4、5-5,以及与截面5-5距离2R的截面6-6用于对比观测结构的变形。结构尺寸、有限元模型示意及截面细节如图2所示。

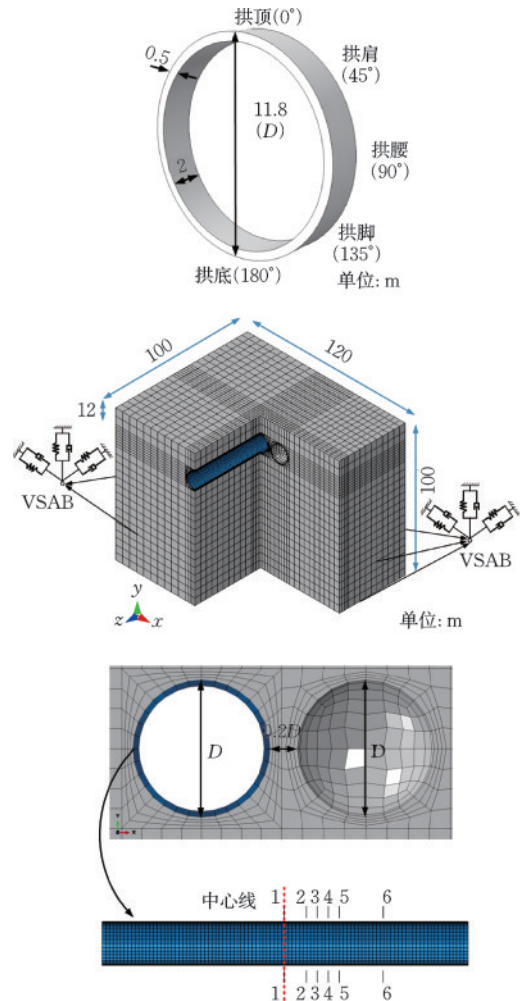


图2 三维模型结构图和部分截面图

Fig. 2 3D model structure and partial sectional views

## 2.2 地震波输入

根据《建筑抗震设计规范》<sup>[25]</sup>,该地区抗震设防烈度为Ⅶ度,设计地震分组为第二组,设计基本地震加速度值为0.10g。三维黏弹性人工边界在结构围岩外部边界的四周和底部施加。选取经修正后的El-centro地震波,为节省计算成本,对原始地震波截取持时为20 s的截断地震波,峰值加速度(PGA)为0.20g,地震波的加速度时程曲线如图3(a)所示。截断地震波及原始地震波的加速度反应谱曲线如图3(b)所示,对比可以看出截断地震波持时选取合理。

## 3 结果分析与讨论

本文为比较SV波、P波对隧道地震响应影响的差异,均假定以El-centro波作为入射波分别计算分

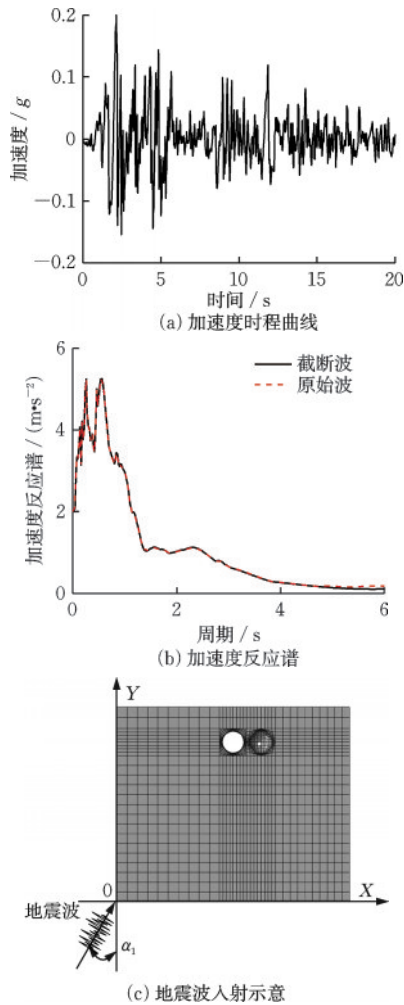


图3 地震波及其入射示意

Fig. 3 Seismic wave and its incidence

析。地震波从模型底部沿X轴正方向入射,入射方向与三维坐标系中Y轴的夹角定义为入射角度,如图3(c)所示。本节仅探讨SV波入射临界角(32.3°)以内的情况,其中SV波取为0°、5°~30°,P波取为0°、10°~60°。

### 3.1 位移分析

本节分析了SV波、P波不同入射角度下隧道的变形特征。地震作用时,结构变形时刻变化,为便于比较,提取地震作用过程中隧道节点竖向位移峰值监测结构变形。当竖向位移大于零时,表明在该节点位置出现隆起;相反,则表明该节点沉降。根据隧道结构形状特点,选择隧道拱顶和拱底内表面的竖向位移进行分析。

SV波入射角度为0°和30°时,拱底和拱顶的位移曲线如图4所示。0°入射时,图4(a)中结构轴向出现拱顶沉降和拱底隆起。图4(a1)中,拱顶在轴

向3倍隧道洞径(3D)范围内沉降明显。截面1-1沉降量最大,为0.655 mm,轴向沉降量的最大差值为0.138 mm。图4(a2)中,拱底在轴向2D范围内隆起明显。截面1-1隆起量最大,为0.434 mm,轴向隆起量最大差值为0.108 mm。30°入射时,图4(b)中结构轴向均表现为沉降。截面1-1处拱顶和拱底沉降量分别为171.969 mm和170.625 mm。拱底的沉降量远大于0°入射,且竖向位移曲线与0°入射时差异明显。这是由于随着入射角度增大,斜波的竖向分量明显增大,使得隧道的竖向变形显著,同时,中心附近区域受到侧部岩溶空洞引起的结构支撑强度可能降低,且隧道拱顶、拱底之间临空面较大,进而产生较大的位移形变,而隧道末端可能是由于模型端部约束不足引起。总的来看,入射角度对隧道的空间变形影响显著,隧道竖向位移在轴向2~3倍的隧道洞径范围内差异明显。

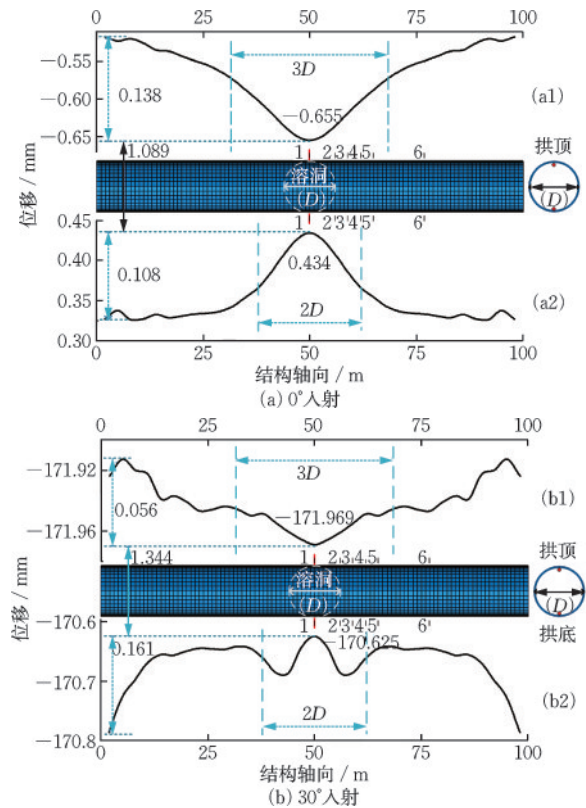


图4 隧道拱顶和底部的竖向位移

Fig.4 Vertical displacement of tunnel vault and bottom

不同入射角度下,拱顶和拱底截面1-1的竖向位移最大值曲线如图5所示。图5(a)中,随着SV波入射角度增大,拱顶和拱底均出现沉降,幅值变化趋势大致相同,沉降量增幅逐渐趋缓,沉降量从40 mm增至171 mm。同一入射角度下,拱顶和拱底

之间的位移差异较小。图5(b)中随着P波入射角度的增大,拱顶和拱底的沉降量均逐渐减小,位移从425 mm左右降低到233 mm左右。与SV波相比,由于P波是压缩波,振动方向与传播方向一致,随着入射角度的增大,引起结构竖向位移变形越小。

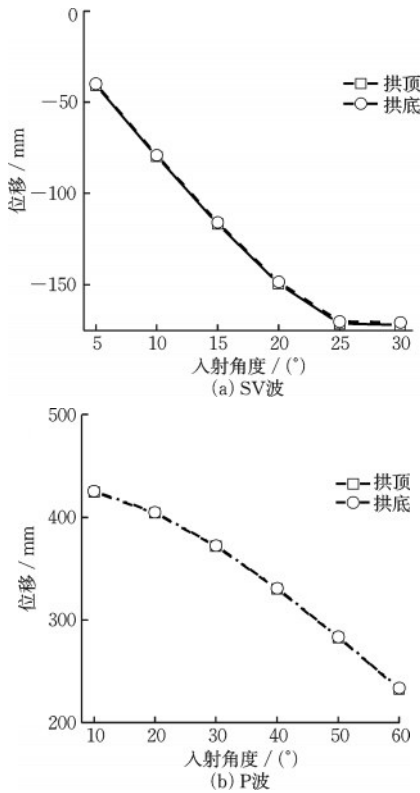


图5 不同角度的竖向位移曲线  
Fig.5 Vertical displacement curves at different angles

### 3.2 应力分析

SV波0°和30°入射时,分析隧道轴向6个关键截面的应力分布特征,应力包络图如图6和图7所示。各图中数据点均为地震作用过程中的应力峰值。通过比较各截面应力分布特征,选取截面1-1,分析SV波、P波不同入射角度下,对结构拉、压应力分布特征的影响差异,如图8和图9所示。

SV波0°入射时,各截面的拉应力包络图和应力值曲线如图6所示。图6(a)中,各图沿拱肩和拱脚的对角线近似对称。近空洞侧(0°~180°)的应力随着距中心位置越远而增大,另一侧应力变化趋势相反。截面6-6和4-4与截面5-5的应力差均在3%左右,与上节隧道变形受影响的范围一致。各截面拉应力最大值均位于拱脚,截面1-1应力值为

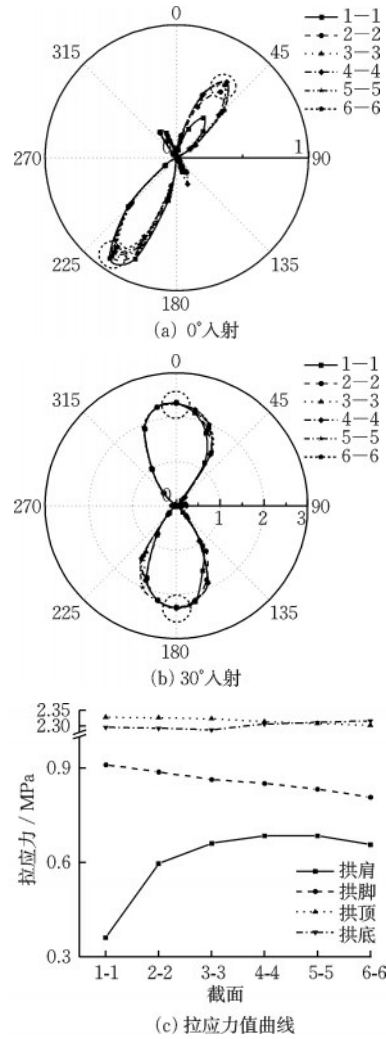


图6 各截面的拉应力  
Fig.6 Tensile stress at each cross-section

0.91 MPa。图6(b)中,各图形似沙漏,且各截面间应力差异较小。拱顶和拱底应力均大于拉伸屈服应力2.2 MPa,说明隧道已经损坏。对比可知,入射角度显著改变了结构应力的空间分布。图6(c)为图6(a)、(b)中的应力较大值曲线(以虚线圈出)。0°入射时,从截面1-1到5-5,拱脚应力从0.91 MPa下降到0.83 MPa,降低了8.79%;拱肩应力从0.36 MPa增大到0.68 MPa,增大了88.89%。30°入射时,拱顶和拱底的应力变化差值为1%左右,且此时隧道已经损伤,应力沿隧道轴向变化不明显。

同理,各截面压应力包络图和应力值曲线如图7所示。图7(a)中,各图形似四叶草。近空洞侧应力随着距中心位置越远而减小,另一侧应力幅值变化不明显。图7(b)中各图形似哑铃。近空洞侧应力随着距中心位置越远而增大。图7(c)为图7(a)、(b)中的应力较大值曲线(以虚线圈出)。0°入射时,

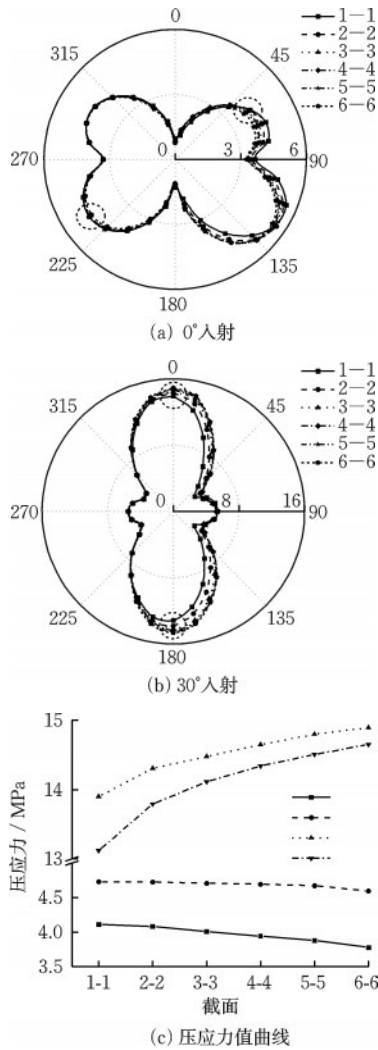


图7 各截面的压应力

Fig.7 Compressive stress at each cross-section

从截面 1-1 到 5-5, 拱脚应力从 4.73 MPa 下降到 4.67 MPa, 降低了 1.26%; 拱肩应力从 4.11 MPa 下降到 3.88 MPa, 降低了 5.60%。30° 入射时, 拱顶和拱底应力增幅分别为 7.17% 和 11.69%。综上所述, 受侧部岩溶空洞影响, 近洞一侧应力变化明显, 距离中心位置越远, 结构轴向应力分布也出现明显差异。

SV 波、P 波不同入射角度下, 隧道截面 1-1 的拉、压应力图及应力值曲线如图 8 和图 9 所示。SV 波斜入射时, 图 8(a) 中, 各拉应力图均为沙漏形, 且拉应力随着入射角的增加而增大。入射角度为 20° 时, 拱顶和拱底的应力值均大于 2.20 MPa, 入射角度继续增大, 应力增幅不再明显变化。图 8(b) 中压应力图形状从四叶草变为哑铃形。应力最大值位置从拱脚变为拱顶。图 8(c) 中, 拱顶和拱底拉、压

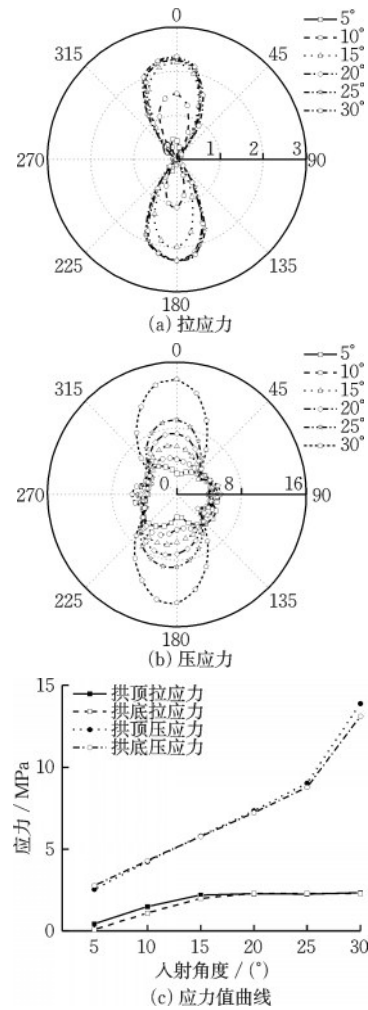


图8 SV波各入射角度下的应力

Fig.8 Stress at different incidence angles of SV wave

应力均随着入射角的增加而增大。入射角度从 5° 增大到 30° 时, 拉应力分别增大 4.55 倍和 3.42 倍, 而压应力分别增大 4.49 倍和 3.74 倍。可以看出, 随着入射角度增大, 结构应力受侧部空洞减弱效应的影响减小。

P 波斜入射时, 图 9(a) 中, 应力图形状与 SV 波相似, 各工况下拉应力较大值位于拱顶和拱底。随着入射角度增大, 拉应力逐渐增大, 当入射角度大于 50° 时, 拱顶和拱底拉应力均大于屈服应力, 增幅变化不明显。图 9(b) 中, 随着入射角度增大, 压应力分布特征变化明显, 拱顶、拱底应力增幅显著。图 9(c) 中, 随着入射角度从 10° 增至 60° 时, 拱顶和拱底拉、压应力均随之增大, 且压应力分别增大 5.48 倍和 4.11 倍。

由此可见, 入射角度和地震波类型会明显改变结构的应力分布特征。当入射角度为 30° 时, SV 波拱顶和拱底的拉应力分别为 2.33 MPa 和 2.30 MPa,

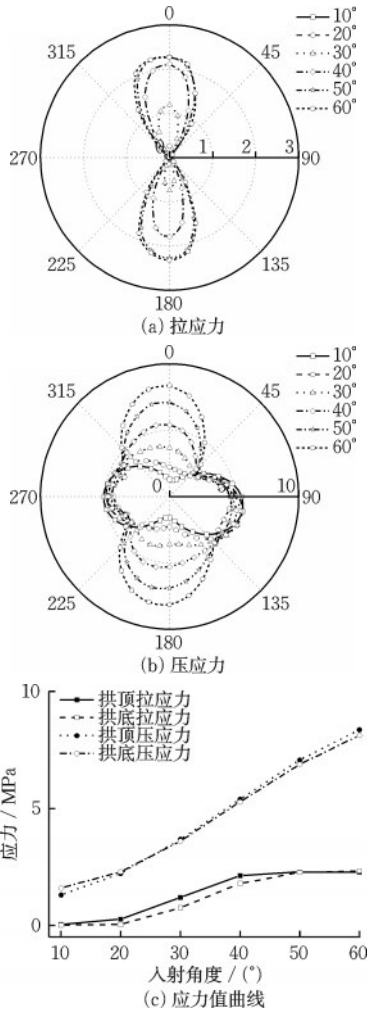


图9 P波各入射角度下的应力  
Fig.9 Stress at different incidence angles of P wave

分别是P波同入射角度下对应位置的1.96倍和3.07倍,相比之下SV波对结构的影响更大。比较截面1-1至6-6的应力分布,侧部空洞在一定程度上可以降低结构地震响应。

### 3.3 损伤演化过程和损伤机理分析

为了更好地量化结构损伤,采用软件ABAQUS中CDP本构模型计算的拉伸损伤因子( $d_t$ )来描述结构损伤的严重程度。根据已有研究<sup>[26]</sup>,得到拉伸损伤因子与混凝土裂缝宽度之间的关系,如下式所示:

$$d_t = \frac{w_t}{[w_t + (\sigma_t h_c) / E_c]} \quad (4)$$

式中, $h_c$ 表示特征值的长度,本模型中等于八节点积分单元的单元边长; $\sigma_t$ 和 $E_c$ 分别为混凝土拉伸应力和弹性模量; $w_t$ 表示隧道的裂缝宽度。

根据《地铁设计规范》<sup>[27]</sup>,盾构隧道管片为钢筋

混凝土结构,裂缝宽度允许值为0.2 mm时,可得临界拉伸损伤因子( $d_{tc}$ )为0.74。损伤状态划分见表3。

表3 损伤状态分类

Table 3 Classification of damage states

类别	损伤状态	裂缝宽度	拉伸损伤因子
I	无损伤	$w_t=0$	$d_t=0$
II	轻微损伤	$0.2 > w_t > 0$	$d_t > d_{tc} > 0$
III	严重损伤	$w_t \geq 0.2$	$d_t \geq d_{tc}$

本节分析SV波30°入射时,不同时刻的隧道受拉损伤状态,如图10所示。图10(a)、(b)、(c)分别为第2、3.14、12 s隧道的拉伸损伤状态,及其内表面拱顶和拱底的损伤细节。

图10(a)为2 s时隧道损伤云图,此时,地震波加速度尚未达到峰值,隧道损伤程度较轻。隧道外表面没有损伤,内表面拱顶中心位置的拉伸损伤值为0.03,中心区域损伤值低于轴向其他位置。3.14 s时,图10(b)中可以看到类似趋势,此时已经超过了加速度峰值,地震作用过程中,损伤逐渐累积,接近严重破坏的临界状态。拱顶、拱底的内、外表面均有损伤,且内表面的损伤程度更严重。损伤最大值在拱顶的内表面,损伤值为0.73。拱底中心区域Z2的损伤程度比轴向其他位置更低,中心位置的损伤值为0.09。区域Z1和Z3,最大损伤值为0.16。前述现象表明,地震作用过程中,侧部岩溶空洞减弱了隧道中心区域的损伤程度。12 s时,结构损伤程度达到最大,如图10(c)所示。拱顶外表面损伤值均大于0.74,表明外表面有轴向贯通裂缝,且裂缝宽度大于0.2 mm。区域Z2的损伤比其他位置低,中心位置的损伤值为0.57。相邻区域Z1、Z3均出现集中损伤,最大损伤值为0.85。

地震作用过程中,隧道的损伤程度逐步加重,受侧部岩溶空洞的影响,结构轴向损伤存在明显差异。实际上,隧道变形受到外部围岩主导,侧部空洞会引起隧道轴向变形不一致。地震作用未开始时,在地应力作用下,隧道拱顶和拱底内表面受拉,而地震波斜入射的竖向分量增大了结构的竖向变形,且隧道拱顶、拱底之间临空面较大,造成拱顶和拱底过早出现受拉损伤。由于侧部空洞的存在,在地震作用下,隧道中心区域附近结构会出现拉压变形,也会使得结构侧部应力重分布,应力得到释放,进而造成结构中心区域损伤减弱。在

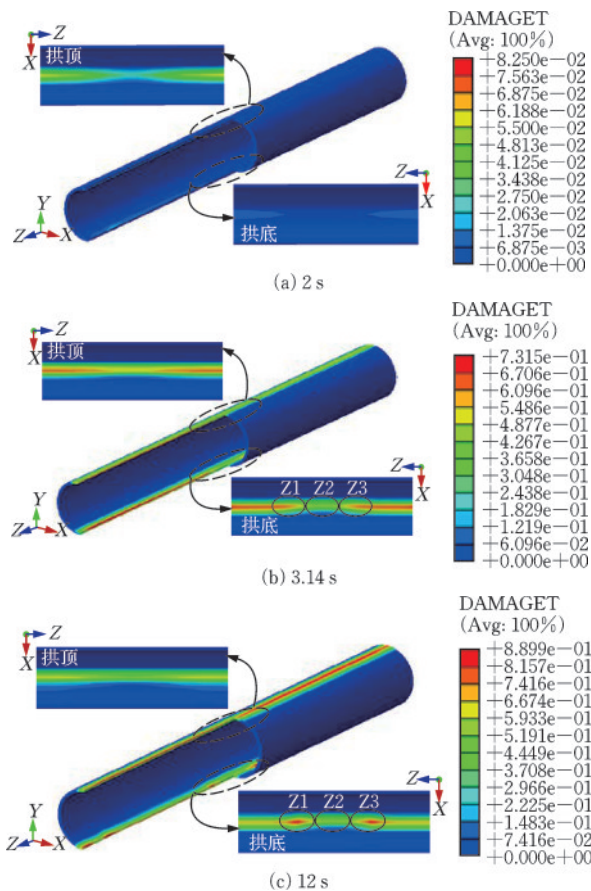


图10 隧道拱顶和底部的垂直位移

Fig.10 Vertical displacement of tunnel vault and bottom

空洞边界处,由于材料特性的突变,相邻截面变形差异过大,引起空洞边界对应的隧道结构位置处出现损伤集中。

如图 11(a)、(b)、(c)分别为 SV 波  $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$  入射时隧道的损伤状态。如图 11(a)所示,  $10^\circ$  入射时,隧道没有发生任何损伤,拉伸损伤数值均为 0。图 11(b)中,  $20^\circ$  入射时,损伤区域主要位于沿隧道轴向的拱顶和拱底,且隧道拱底中心的损伤区域向拱脚发生偏移。拱底中心区域的损伤状态与其他位置有明显差异。区域 Z1 和 Z3 出现损伤集中,且损伤程度比 Z2 更为严重,该区域的最大损伤值为 0.74。而  $30^\circ$  入射时的结构损伤,其趋势与入射角度为  $20^\circ$  时类似,但损伤程度更为严重。拱顶和拱底的损伤状态与上文中拉应力分布对应。隧道在斜波入射下更易受损可以归结为两个关键因素:斜波的竖向分量、结构截面的几何特性。

P 波入射角度小于  $40^\circ$  时结构未出现损伤,这里仅对入射角度  $40^\circ$  及以上的工况进行分析。如图 12(a)、(b)、(c)分别为 P 波  $40^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $60^\circ$  入射时隧道的损伤状态。随着入射角度的增大,结构损伤程度

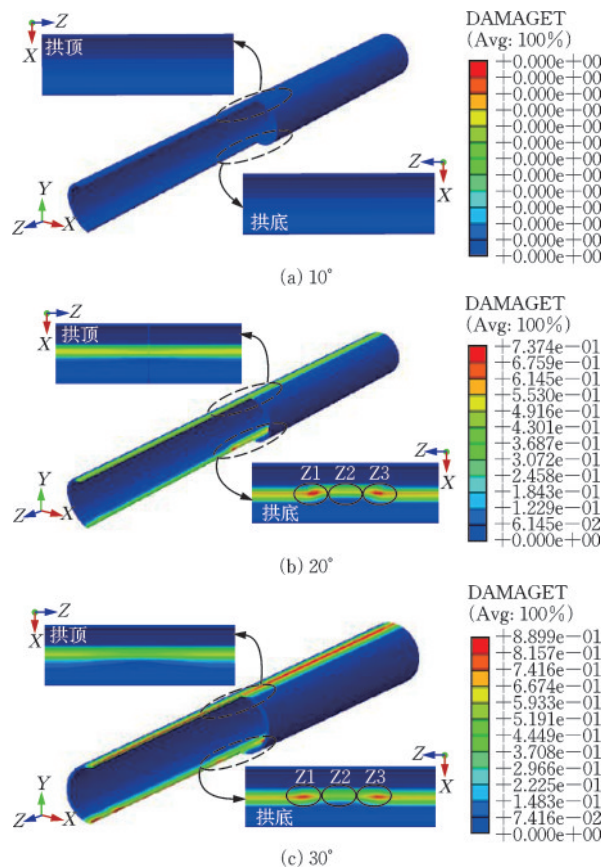


图11 SV波斜入射下的拉伸损伤

Fig.11 Tensile damage under oblique incidence of SV wave

逐步加重。 $40^\circ$  入射时,结构刚开始出现损伤,损伤程度轻微,损伤区域仅在拱顶和拱底内表面,最大损伤值仅为 0.06。 $50^\circ$  入射时,拱顶和拱底均出现轻微损伤,拱底中心区域损伤程度小于轴向其他位置,且损伤向拱脚偏移,最大损伤值为 0.58。 $60^\circ$  入射时,结构在区域 Z1、Z3 出现了损伤集中,损伤最大值为 0.85,而拱顶和拱底其他位置损伤程度较低。

比较 SV 波、P 波各入射角度下隧道位移、应力及损伤状态,在结构横向地震响应分析时,由于 SV 波的剪切效应,对结构的损伤程度影响更为严重。可以看出,SV 波的入射角度对位移、应力分布及损伤程度有明显的影响,不同入射角度对应力分布的影响存在明显的空间差异,入射波角度越大,结构应力越大且损伤程度越严重。在隧道中心区域的损伤状态反映了侧部空洞具有一定能量耗散的作用。而在相邻区域,侧部岩溶空洞的边界处材料特性的发生突变,造成了损伤的集中。这也进一步表明,在斜波作用下,侧向岩溶空洞对隧道的损伤是不可忽视的。

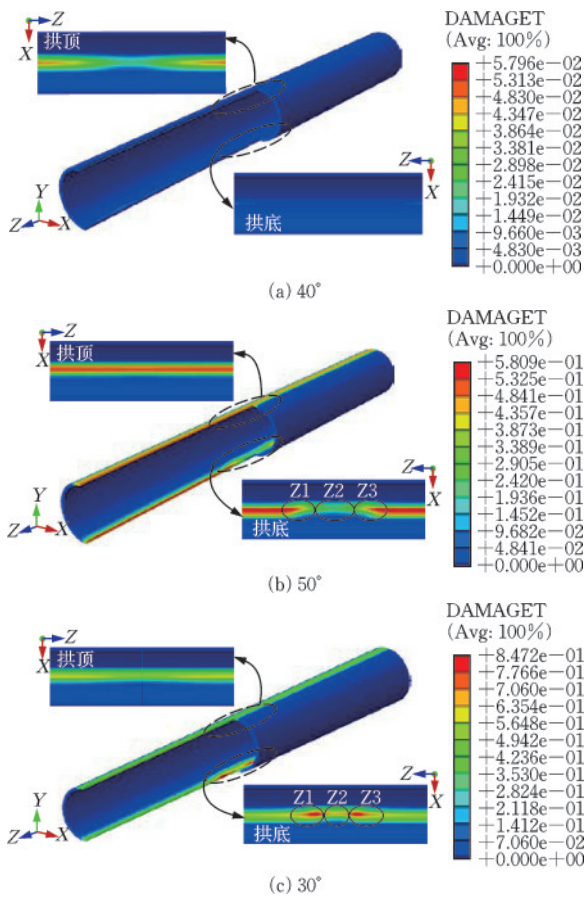


图 12 P波斜入射下的拉伸损伤

Fig.12 Tensile damage under oblique incidence of P wave

## 4 结论

本文研究了侧部岩溶空洞处于地震波传播路径隧道后方时,SV波、P波不同入射角度对隧道结构的变形、应力分布和结构损伤演化过程及损伤特征的影响。

(1)随着入射角度的增大,隧道的空间变形差异显著。侧部空洞对隧道变形的影响范围是隧道洞径的2~3倍。

(2)随着入射角度的增大,结构应力显著增大,最大应力位置从拱脚变为拱顶。当入射角度为30°时,SV波拱顶和拱底的拉应力是P波的1.96倍和3.07倍。

(3)随着入射角度增大,隧道从无损伤逐渐加重至严重损伤状态。SV波30°入射,P波60°入射时,隧道的损伤最为严重,同时,受侧部岩溶空洞的影响,拱底出现损伤集中区域且向拱脚偏移的现象。

## 参考文献:

- [1] Konagai K, Takatsu S, Kanai T, et al. Kizawa tunnel cracked on 23 October 2004 Mid-Niigata earthquake: An example of earthquake-induced damage to tunnels in active-folding zones[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 29: 394-403.
- [2] Wang Z, Gao B, Jiang Y, et al. Investigation and assessment on mountain tunnels and geotechnical damage after the Wenchuan earthquake[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52: 546-558.
- [3] Schneider A, Lavdas N. Albulu tunnel II: Concept for tunneling in karst-like cellular dolomite, underground—the Way to the Future [C]//Proceedings of the World Tunnel Congress, WTC.Geneva, Switzerland: [s.n.], 2013:1027-1034.
- [4] Song K, Cho G, Chang S. Identification, remediation, and analysis of karst sinkholes in the longest railroad tunnel in South Korea [J]. Engineering Geology, 2012, 135: 92-105.
- [5] Fan H, Zhang Y, He S, et al. Hazards and treatment of karst tunneling in Qinling-Daba mountainous area: overview and lessons learnt from Yichang-Wanzhou railway system [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(679): 1-16.
- [6] Wang X, Wang S, Peng X, et al. Equivalent numerical simulation method and application in karst-induced collapse of overlying sandy stratum [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 137: 106280.
- [7] Wang X, Lai J, He S, et al. Karst geology and mitigation measures for hazards during metro system construction in Wuhan, China [J]. Natural Hazards, 2020, 103(3): 2905-2927.
- [8] Cui Q, Wu H, Shen S, et al. Chinese karst geology and measures to prevent geohazards during shield tunnelling in karst region with caves [J]. Natural Hazards, 2015, 77(1): 129-152.
- [9] 陈之毅,郭远鹏. 断层错动和地震动共同作用下跨断层隧道的损伤分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(1): 132-137.  
Chen Z Y, Guo Y P. Analysis of cross fault tunnel damage under combined action of fault dislocation and ground motion [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(1): 132-137. (in Chinese)
- [10] 史新伟,冯新,范哲. 逆断层作用下复合衬砌输水隧洞损伤演化分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(5): 1132-1140.  
Shi X W, Feng X, Fan Z. Damage evolution analysis

- of composite lining convey tunnel under reverse fault [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43(5): 1132-1140. (in Chinese)
- [11] 臧万军, 贾晨浩, 张国军, 等. 埋深对岩溶隧道地震动力响应影响分析[J]. *大连理工大学学报*, 2020, 60(1): 36-45.  
Zang W J, Jia C H, Zhang G J, et al. Analysis of influence of buried depth on seismic dynamic response of karst tunnel [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2020, 60(1): 36-45. (in Chinese)
- [12] 何聪. 穿越岩溶区隧道地震响应特性及减震措施研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.  
He C. Study on seismic response characteristics and shock absorption measures of tunnels crossing karst area [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [13] 李明达, 张昱, 周晶. 岩溶位置及组合效应对隧道的地震响应分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(3): 472-479.  
Li M D, Zhang Y, Zhou J. Seismic response analysis of tunnel under karst cave locations and combinatorial effect [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(3): 472-479. (in Chinese)
- [14] 朱雯婷. 考虑溶洞随机分布影响的盾构隧道及周围土层地震响应研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.  
Zhu W T. Study on seismic response of shield tunnel and surrounding soil layer considering the random distribution of karst cave [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [15] Yan L, Haider A, Li P, et al. A numerical study on the transverse seismic response of lined circular tunnels under obliquely incident asynchronous P and SV waves [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 97: 1-14.
- [16] 周双喜, 叶国涛, 张季. SV波斜入射时双线并行地铁隧道横截面地震响应分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2021, 41(5): 1-12.  
Zhou S X, Ye G T, Zhang J. Transverse seismic response analysis of twin parallel metro tunnels subjected to obliquely incident SV wave [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamic*, 2021, 41(5): 1-12. (in Chinese)
- [17] Sun B, Deng M, Zhang S, et al. Inelastic dynamic analysis and damage assessment of a hydraulic arched tunnel under near-fault SV waves with arbitrary incoming angles [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 104: 1-18.
- [18] 张波, 李术才, 杨学英, 等. 三维黏弹性人工边界地震波动输入方法研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(3): 774-778.  
Zhang B, Li S C, Yang X Y, et al. Research on seismic wave input with three-dimensional viscoelastic artificial boundary [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(3): 774-778. (in Chinese)
- [19] 廖振鹏, 刘晶波. 离散网格中的弹性波动(I)[J]. *地震工程与工程振动*, 1986, 6(2): 1-16.  
Liao Z P, Liu J B. Elastic wave motion in discrete grids (I) [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 1986, 6(2): 1-16. (in Chinese)
- [20] 化建新, 郑建国. 工程地质手册(第五版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [21] 张季, 谭灿星, 叶国涛, 等. SV波超临界角斜入射时层状地基地震动输入在ABAQUS中的实现[J]. *工程力学*, 2021, 38(4): 200-210.  
Zhang J, Tan C X, Ye G T, et al. Realization of ground motion input in ABAQUS for layered foundation under SV wave of oblique incidence over critical angle [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(4): 200-210. (in Chinese)
- [22] 封坤, 何川, 夏松林. 大断面盾构隧道结构横向刚度有效率的原型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(11): 1750-1758.  
Feng K, He C, Xia S L. Prototype tests on effective bending rigidity ratios of segmental lining structure for shield tunnel with large cross-section [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(11): 1750-1758. (in Chinese)
- [23] 日本土木学会. 盾构隧道管片设计: 从容许应力设计法到极限状态设计法[M]. 官林星, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [24] 刘铁雄. 岩溶顶板与桩基作用机理分析与模拟试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2003.  
Liu T X. Mechanism analysis and simulation test of karst roof and pile foundation [D]. Changsha: Central South University, 2003.
- [25] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [26] Chen G, Teng J, Chen J. Finite-element modeling of intermediate crack debonding in FRP-plated RC beams [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2011, 15(3): 339-353.
- [27] 地铁设计规范: GB 50157—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

(本文编辑: 张艺)