

DOI: 10.11779/CJGE20240966

# 考虑同震位移的隧道地震动力响应分析

冯俊<sup>1,2</sup>, 赵伯明<sup>\*1,2</sup>, 王子珺<sup>1,2</sup>

(1. 北京交通大学城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 断层错动是一种动态冲击荷载, 并在断层附近引起地层的永久变形。首先, 根据有限断层震源和地壳模型, 基于分层位错理论计算地层的同震位移。然后, 基于考虑脉冲周期、峰值位移和永久位移的滑冲效应地震动表示式, 将同震位移转化为动态过程, 提出一种考虑同震位移的隧道地震动力分析方法。以 2022 年门源 6.9 级地震为例, 分析了大梁隧道的错动变形和破坏特征, 验证了计算模型的合理性。研究了地震动的脉冲周期和峰值位移对隧道结构地震响应分析的影响规律: 脉冲周期越小, 单向速度脉冲幅值越大, 断层错动的冲击效应越明显, 隧道破坏越严重; 当脉冲周期不变时, 峰值位移越大隧道破坏越严重, 并且位移回弹对结构损伤的影响不可忽视; 相较于脉冲周期, 位移峰值对隧道的破坏效应更加显著。

**关键词:** 隧道工程; 断层错动; 地震动模拟; 数值模拟; 同震位移

中图分类号: TU435; P315.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)11-2355-11

作者简介: 冯俊(1996—), 男, 博士研究生, 主要从事近场地震动特征分析和地下工程抗震方面的研究工作。E-mail: Junfeng@bjtu.edu.cn。

## Seismic dynamic response analysis for tunnels considering coseismic displacement

FENG Jun<sup>1,2</sup>, ZHAO Boming<sup>1,2</sup>, WANG Zijun<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Fault dislocation is a form of dynamic impact load that induces permanent deformation of the stratum in the vicinity of the fault. Based on the finite-fault source and crustal velocity model, coseismic displacement is computed according to the layered dislocation theory. Then, this paper presents a fling-step effect ground motion expression considering the pulse period, peak displacement and permanent displacement. According to the fling-step effect ground motion expression, the coseismic displacement field is transformed into a dynamic displacement process, and the seismic response of tunnels considering permanent displacement is analyzed. Taking the 2022 Menyuan earthquake as an example, the deformation and damage characteristics of the Daliang tunnel are analyzed, validating the rationality of the proposed method. Additionally, the impacts of pulse period and peak displacement of near-fault ground motions on seismic response analysis of crossing fault tunnel are investigated: shorter pulse periods correspond to larger unidirectional velocity pulse amplitudes, resulting in more pronounced impact effects of fault slip and more severe tunnel damage; at constant pulse period, higher peak displacements result in more severe tunnel damage, and the impact of displacement rebound on structural damage is not negligible; the destructive effect of peak displacements on tunnels is more pronounced compared to pulse periods of ground motions.

**Key words:** tunnel engineering; fault dislocation; ground motion simulation; numerical simulation; coseismic displacement

## 0 引言

在同震阶段, 断层错动引起地震波动, 并在近断层区域形成永久性的地层变形。穿越断层的隧道结构

承受的地震荷载是地震动惯性力和地层错动的耦合效应<sup>[1]</sup>。隧道结构受到地下围岩的约束作用, 因而相较于地面建筑具有良好的抵抗地震动惯性力的性能<sup>[2]</sup>。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52272341, U1434210); 国家重点研发计划项目(2022YFB2302101) This work was supported by National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52272341, U1434210), and National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2022YFB2302101).

收稿日期(Received): 2024-01-24 修回日期(Revised): 2024-12-12 接受日期(Accepted): 2025-01-08 网络出版日期(Online): 2025-01-09

\*通信作者 (E-mail: bmzhao@bjtu.edu.cn)

根据多次地震后的现场调查,断层上、下盘的错动引起地层相对错动可能才是隧道结构破坏的关键因素<sup>[3-5]</sup>。例如,2022年中国青海门源6.8级地震引起大梁隧道的水平偏移量为1.78 m,垂直抬升量为0.68 m<sup>[6]</sup>。然而,大量研究<sup>[7-8]</sup>仅关注地震动惯性力下隧道结构的地震响应,忽略了断层位错引起的永久地层变形对隧道的破坏效应。因此,研究考虑同震位移的隧道地震响应具有重要的理论意义和工程价值。

穿越断层的隧道抗震分析方法主要包括现场调研<sup>[3-5]</sup>、模型试验<sup>[9-11]</sup>和数值模拟<sup>[12-15]</sup>等。现场调研通过监测断层附近的地震动和地层错动数据,分析隧道损坏程度与震级、断层距、地层参数等指标之间的关系。Kontogianni等<sup>[3]</sup>研究了3次地震中的隧道损伤与断层错动量的关系。孙风伯<sup>[5]</sup>根据2008年汶川7.8级地震后多条隧道的破坏情况,研究了断层错动对隧道结构的影响范围。然而,由于近断层的地下工程案例较少并且地下观测点的数量不足,目前针对震后的现场调研主要集中于地表的地震动数据和同震位移。部分学者<sup>[9-11]</sup>基于模型试验分析穿越断层的隧道的地震响应。但是模型试验受到试验装置和场地空间的限制,断层的错动往往被简化为模型箱底板的抬升或下降,难以反映地层变形的分布情况。

数值模拟是分析穿越断层的隧道地震响应的主要方法。例如:Anastasopoulos等<sup>[12]</sup>基于有限元模型分析正断层错动作用下深埋隧道的变形分布;Lin等<sup>[14]</sup>通过数值模拟和模型试验,研究了断层错动对隧道结构的破坏效应。但上述研究<sup>[5, 12-14]</sup>将断层错动简化为断层上盘或下盘的底面的整体抬升或下降,并将断层错动过程简化为准静态位移,与实际的地震位移场分布存在较大的差别。

随着计算理论和测量技术的进步,人们对地震发生后断层附近的同震位移分布的认识逐渐加深。Okada<sup>[16-17]</sup>提出了均匀半无限空间中断层错动引起的地层变形的解析解,随后Wang等<sup>[18]</sup>在Okada<sup>[16-17]</sup>的基础上提出分层半无限空间中地震位移场的解析表达式。赵天次等<sup>[19]</sup>通过分层位错理论计算地震位移场,并基于三维有限元模型分析断层错动作用下隧道的损伤分布,但该研究依旧将断层错动简化为准静态位移。Chen等<sup>[20]</sup>基于Okada位错理论和有限元模型,根据单侧速度脉冲模拟断层错动的动态过程,研究了动态位错对隧道的影响。但Chen等<sup>[20]</sup>将地震动的峰值位移等价为永久位移,无法分析地震动强度对地下结构地震响应的影响。

因此,目前关于地震动的位移峰值和永久位移对

穿越断层隧道的地震动力响应的影响特征与机理研究较少。为此,本文提出一种考虑永久位移的滑冲效应脉冲型地震动表示式,将静态同震位移转化为动态冲击荷载,并考虑了地震动峰值位移与永久位移之间的关系。基于有限断层模型和分层位错理论分析2022年门源6.9级地震的同震位移特征,并计算了大梁隧道的错动变形。本文进一步讨论了近断层地震动的位移峰值与脉冲周期对隧道地震响应分析的影响规律。

## 1 计算方法和原理

### 1.1 考虑永久位移的地震动表达式

滑冲效应是指由于断层错动引起地震动位移时程中突然的升高或降低,从而形成永久性位移偏量,在地震动速度时程中表现为单侧脉冲波形<sup>[21]</sup>。断层错动主要对跨越或者穿越断层的结构造成影响<sup>[22]</sup>,因此关于滑冲效应地震动的研究往往集中于速度时程中的脉冲特性分析。滑冲效应地震动的数学表达式往往基于速度脉冲的参数<sup>[23]</sup>,例如脉冲峰值、脉冲相位、脉冲周期等等。本文将基于Mavroeidis速度脉冲函数<sup>[23]</sup>,提出考虑位移峰值(PGD)和永久位移的滑冲效应地震动位移时程表达式。Mavroeidis速度脉冲的数学表达式如下:

$$v(t) = \begin{cases} \frac{A_p}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{t'}{\gamma}\right) \right] \cos(t' + \varphi) & (-\pi\gamma \leq t' \leq \pi\gamma), \\ 0 & (\text{其它}) \end{cases} \quad (1)$$

$$t' = \frac{2\pi}{T_p}(t - t_0) \quad . \quad (2)$$

式中: $v$ 为速度; $t$ 为时间; $A_p$ 为速度脉冲的幅值; $T_p$ 为速度脉冲的周期; $\gamma$ 为振荡参数( $\gamma > 1$ ); $t_0$ 为包络函数峰值对应的时间; $\varphi$ 为速度脉冲的相位( $0^\circ < \varphi < 90^\circ$ ),用于表示速度脉冲的对称性。

对式(1)进行时间积分,并考虑初始位移为零,即可获得地震动位移时程表达式:

$$u(t) = \begin{cases} 0 & (t' < -\pi\gamma), \\ \frac{A_p T_p}{4\pi} \left[ \frac{\gamma}{2(\gamma-1)} \sin\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}t' + \varphi\right) + \sin(t' + \varphi) - \frac{\sin(\varphi - \pi\gamma) + \frac{\gamma}{2(\gamma+1)} \sin\left(\frac{\gamma+1}{\gamma}t' + \varphi\right)}{1-\gamma^2} \right] & (-\pi\gamma \leq t' \leq \pi\gamma), \\ \frac{A_p T_p [\sin(\varphi + \pi\gamma) - \sin(\varphi - \pi\gamma)]}{4\pi(1-\gamma^2)} & (t' > \pi\gamma). \end{cases} \quad (3)$$

根据式(3), $t' > \pi\gamma$ 时的位移量可视为永久位移,

若考虑永久位移的归一化 ( $\bar{u}(t)$ )，地震动位移时程表达式如下：

$$\bar{u}(t) = \begin{cases} 0 & (t' < -\pi\gamma) , \\ (1-\gamma^2) \left[ \frac{\gamma \sin\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}t' + \varphi\right)}{2(\gamma-1)} + \sin(t' + \varphi) - \frac{\sin(\varphi - \pi\gamma)}{1-\gamma^2} + \frac{\gamma \sin\left(\frac{\gamma+1}{\gamma}t' + \varphi\right)}{2(\gamma+1)} \right] & (-\pi\gamma \leq t' \leq \pi\gamma) , \\ 1 & (t' > \pi\gamma) . \end{cases} \quad (4)$$

对于存在永久位移的滑冲效应地震动，振荡参数  $\gamma$  的取值接近1<sup>[23]</sup>。考虑  $\gamma \rightarrow 1$  的极限情况下，归一化永久位移的地震动位移时程  $\bar{u}(t)$  可以改写为

$$\bar{u}(t) = \begin{cases} 0 & (t' < -\pi) , \\ \frac{\left[ \sin(t' + \varphi) + \frac{1}{4} \sin(2t' + \varphi) + \frac{\pi + t'}{2} \cos(\varphi) + \frac{3}{4} \sin(\varphi) \right]}{\pi \cos(\varphi)} & (-\pi \leq t' \leq \pi) , \\ 1 & (t' > \pi) . \end{cases} \quad (5)$$

此时， $\bar{u}(t)$  的最大值就是位移峰值和永久位移的比值 ( $R_{\text{PGD}}$ )：

$$R_{\text{PGD}} = \frac{D_{\max}}{D_{\text{site}}} = \frac{\left[ 1 + \sin(\varphi) + \frac{3\pi - 2\varphi}{4} \cos(\varphi) \right]}{\pi \cos(\varphi)} . \quad (6)$$

由式(6)可知，在确定振荡参数  $\gamma \rightarrow 1$  以后，位移峰值和永久位移的比值  $R_{\text{PGD}}$  仅取决于速度脉冲的相位  $\varphi$ ，图1展示了  $R_{\text{PGD}}$  与  $\varphi$  之间的关系，脉冲相位  $\varphi$  取值  $0^\circ \sim 90^\circ$  时  $R_{\text{PGD}}$  属于  $1.06 \sim +\infty$ ，因此脉冲相位  $\varphi$  可以充分描述位移峰值和永久位移的比值范围。

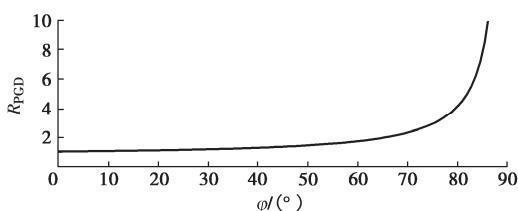


图1  $R_{\text{PGD}}$  与速度脉冲相位的关系

Fig. 1 Relationship between  $R_{\text{PGD}}$  and velocity pulse phase

## 1.2 分层位错理论

本节主要介绍在分层半无限空间介质中，由断层错动引发的地层永久位移的计算方法<sup>[18]</sup>。图2展示了分层半无限空间弹性介质模型， $\rho$ 、 $\lambda$  和  $\mu$  分别为介质的密度、拉梅常数1和拉梅常数2， $z_n$  表示第  $n$  层地层底部的埋深。

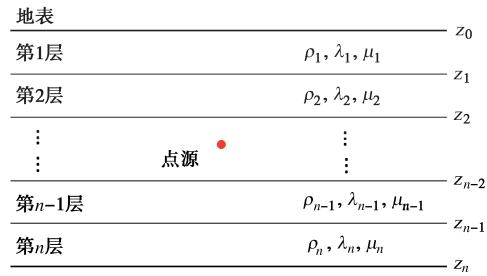


图2 分层半无限空间模型

Fig. 2 Layered semi-infinite space model

弹性介质中变形的控制偏微分方程为

$$\nabla \cdot \Gamma = f . \quad (7)$$

式中： $\nabla$  为 Hamilton 算子； $\Gamma$  为应力张量； $f$  为体力。将胡克定律代入式(7)，可得到基于介质位移的控制方程：

$$(\lambda + 2\mu)\nabla(\nabla \cdot u_{\text{site}}) - \mu\nabla \times (\nabla \times u_{\text{site}}) = f . \quad (8)$$

式中： $u_{\text{site}}$  为位移矢量。考虑地层交界面处位移连续和应力连续，交界面处的边界条件如下：

$$u_{\text{site}}|_{-}^{+} = 0 \text{ 且 } e_n \Gamma|_{-}^{+} = 0 . \quad (9)$$

式中： $e_n$  为介质分层处的法向应力分量；符号  $( )|_{-}^{+}$  表示介质分层处的参数增量。此外，在自由表面处（地表），还应符合下列条件：

$$e_n \Gamma|_{-}^{+} = 0 . \quad (10)$$

在点源深度处的平面可以视为一个分界面，基于该分界面处位移和应力的突变来模拟点源：

$$e_n \Gamma|_{-}^{+} = f_s . \quad (11)$$

基于 Hankel 变换将偏微分方程（式(8)）转换为波数域中可解的常微分方程。然后，使用 Thomson-Haskell 传递矩阵求解满足源条件和边界条件（式(9)～(11)) 的特征解。最后，地层的同震位移可以基于 Hankel 逆变换求解。

有限断层震源基于一系列点源描述断层产状、尺寸和位错不均匀性<sup>[24]</sup>，断层的震源机制通过走向角  $\phi_s$ 、倾角  $\delta_d$  和滑移角  $\lambda_r$  描述，震级由断层滑动量和断层面积表示，图3展示了有限断层震源的相关参数。然后，有限断层震源引发的同震位移可以视为一系列点源引发的变形场的线性叠加。

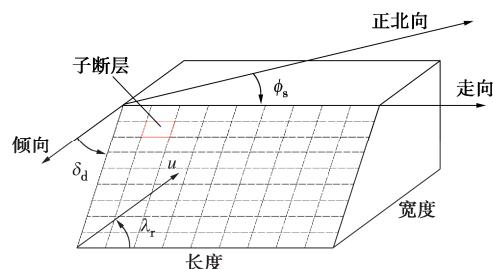


图3 有限断层震源示意图

Fig. 3 Schematic diagram of finite fault source

### 1.3 黏弹性边界

黏弹性边界是一种局部应力型边界条件，具备时空解耦特性和数值稳定性，因而在土-结动力分析中得到了广泛的应用<sup>[25]</sup>。黏弹性边界的原理是在模型的边界节点上施加弹簧-阻尼器系统，将地震波转换为等效节点力，见图4。等效节点力  $F(t)$  的计算公式为

$$F(t) = Ku(t) + Cv(t) + A\sigma(t) \quad (12)$$

式中： $u(t)$ ， $v(t)$  和  $\sigma(t)$  分别为对应节点的位移、速度和应力，在确定节点的速度  $v(t)$  后，可以根据模型边界处的本构关系计算节点应力<sup>[26]</sup>； $K$  和  $C$  分别为节点的弹簧刚度和阻尼系数，计算公式如下：

$$\left. \begin{aligned} K_n &= A \frac{1}{1+0.8} \frac{\lambda + 2G}{R}, \quad C_n = 1.1A\rho c_p, \\ K_t &= A \frac{1}{1+0.8} \frac{G}{R}, \quad C_t = 1.1A\rho c_s. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中： $A$  为节点的控制面积（见图4）；下标  $n$  和  $t$  分别为法向和切向分量； $G$  为剪切模量； $R$  为模型中心到边界面的距离； $\rho$  为密度； $c_p$  和  $c_s$  分别为纵波和横波的波速。

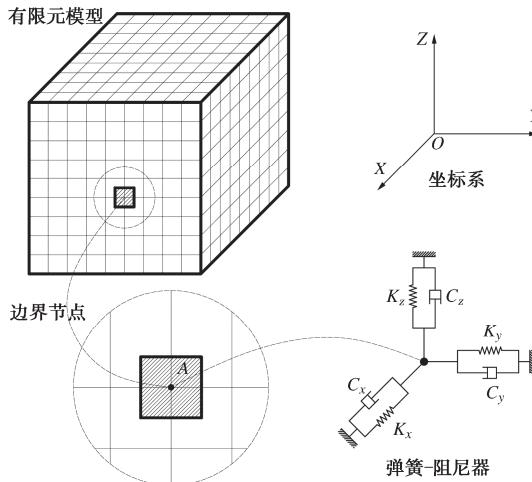


图4 黏弹性边界示意图

Fig. 4 Schematic diagram of viscoelastic boundary

## 2 穿越断层隧道的模型算例

### 2.1 计算流程

图5展示了考虑同震位移的隧道地震动力响应分析流程，关键步骤如下：第一步，确定有限断层震源参数、地壳速度模型参数和隧道结构参数；第二步，建立隧道-围岩相互作用的有限元模型，围岩参数取决于地壳速度模型参数，并提取有限元模型所有边界节点的坐标；第三步，根据震源参数和地壳速度模型参数，基于分层位错理论计算静态地震位移场；第四步，根据本文提出的考虑永久位移的地震动表达式，将静态的地震位移场转化为动态位移过程；第五步，基于黏弹性人工边界模拟有限元模型的地震波动。

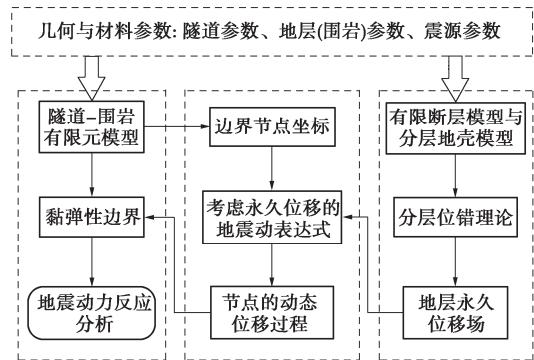


图5 计算流程示意图

Fig. 5 Procedure of proposed method

### 2.2 模型参数

2022年中国门源6.9级地震发生在冷龙岭断层和托莱山断层的交界处，震源深度约10 km<sup>[27]</sup>。冷龙岭断层为主要发震断层，该断层走向呈西北—东南，具有高倾角和左旋走滑等特征。托莱山断层的东段与冷龙岭断层相连，托莱山断层为高倾角左旋走滑断层，走向呈东西向。本文将基于Zhang等<sup>[28]</sup>反演的有限断层震源模型计算地层永久变形，见图6。有限断层震源模型的断层面被离散为一系列点震源，断层凹凸体的埋深位于10 km以内，点震源间距为2 km，倾角设置为82°，点震源最大深度为20 km。读者可以在Zhang等<sup>[28]</sup>的研究中获得该有限断层震源模型的其余详细信息。

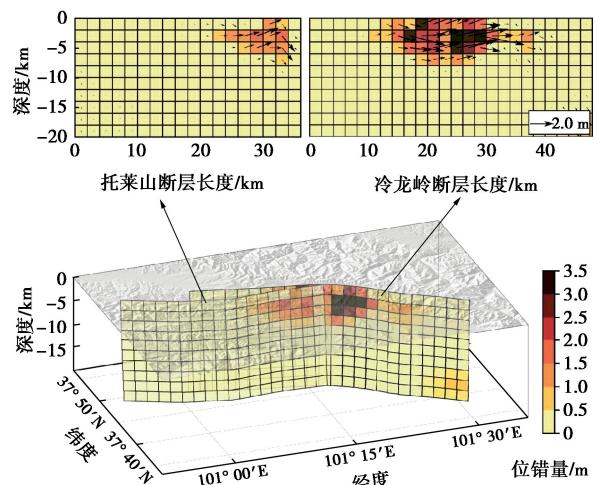


图6 2022年门源地震的有限断层震源模型

Fig. 6 Finite fault source model of 2022 Menyuan earthquake

2022年门源6.9级地震的震中距离兰新高铁大梁隧道不足4.0 km，导致隧道的水平位移和逆冲位移分别为1.8, 0.7 m<sup>[6]</sup>。基于Zhang等<sup>[28]</sup>提出的有限断层模型的几何参数，大梁隧道在大约37.60°N和100.95°E处穿越冷龙岭断层，隧道的破坏范围主要位于断层破裂面两侧200 m以内，衬砌因挤压而显著变形。隧道的水平左旋走滑变形显著大于垂直逆冲变形，并且隧道

位于断层上盘的位移比下盘区域更大。

本文基于ABAQUS建立有限元模型,为了分析断层错对隧道的破坏作用,有限元模型的长度(y向)设置为1500 m,位于冷龙岭断层上盘和下盘区域的长度分别为750, 750 m,见图7。考虑围岩对隧道结构的影响范围为3~5倍洞径,模型宽和高分别定义为100, 100 m。有限元模型的几何中心对应的经纬度坐标为37.60°N和100.95°E。本文的地壳速度模型参考了中国门源地区的地质资料<sup>[29]</sup>,见表1。大梁隧道穿越冷龙岭断层处的埋深约200 m,因此有限元模型的埋深为150~250 m,围岩参数对应地壳速度模型参数的第一层材料参数。

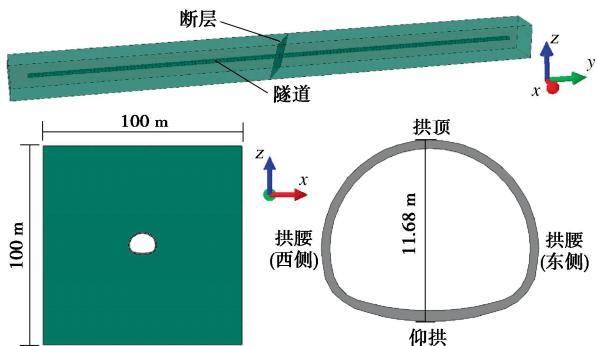


图7 有限元模型的几何参数示意图

Fig. 7 Schematic illustration of geometric parameters of finite element model

表1 门源地区的地壳速度模型参数

Table 1 Parameters of crustal velocity model in Menyuan area

深度/km	纵波波速/(km·s <sup>-1</sup> )	横波波速/(km·s <sup>-1</sup> )	密度/(t·m <sup>-3</sup> )
0~0.5	2.50	1.07	1830
0.5~2	3.80	2.20	2200
2~6	4.66	2.70	2500
6~16	6.20	3.60	3000
>16	6.56	3.80	3100

隧道模型的几何参数依据大梁隧道原型<sup>[20]</sup>,衬砌的横截面呈马蹄形,厚度为500~600 mm。隧道的长度(y向)设置为1400 m,位于冷龙岭断层上盘和下盘区域的长度分别为700 m和700 m,隧道与围岩之间设置为绑定接触。隧道衬砌在纵向上每隔10 m设置变形缝,变形缝的法向接触被设置为硬接触,切向接触被定义为摩擦系数0.4的滑动接触<sup>[20]</sup>。在有限元模型中,冷龙岭断层的倾角为80°,断层与隧道的水平夹角约为67°,见图7,断层法向被设置为硬接触,断层切向为摩擦系数0.2的滑动接触<sup>[20]</sup>。隧道衬砌的混凝土等级为C35,对应的材料参数为:弹性模量为34.5 GPa,泊松比为0.2,密度  $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$ 。假定衬砌结构的配筋率为3%<sup>[2]</sup>,并基于沈新普等<sup>[30]</sup>提出的钢筋混凝土等效材料模拟衬砌的拉伸损伤关系,表2展示了衬砌材料的拉伸损伤关系。衬砌的压缩应力与非弹性应变和损伤

关系的取值则依据《混凝土结构设计规范: GB 50010—2010》。

表2 钢筋混凝土的等效拉伸损伤关系

Table 2 Equivalent tensile damage of reinforced concrete

应力/MPa	非弹性应变	损伤值
0	0	0
3.24	0	0
9.00	0.0015	0.1
0	0.008	0.95

### 2.3 计算验证

根据2.2节所描述的震源参数和地壳速度模型参数,基于分层位错理论计算2022年门源6.9级地震引起的位移场。水平位移向东和向北为正,垂直位移向上为正。图8展示了大梁隧道附近的地表永久位移场的计算结果:断层上盘的东西向和南北向的位移达到了1.75, -1.20 m, 垂直向逆冲位移达到0.65 m;断层下盘的东西向和南北向的位移达到了-1.43, 0.43 m, 垂直向最大位移达到-0.47 m。地表永久位移的幅值和分布符合卫星遥感分析和实地调查结果<sup>[27-28]</sup>。

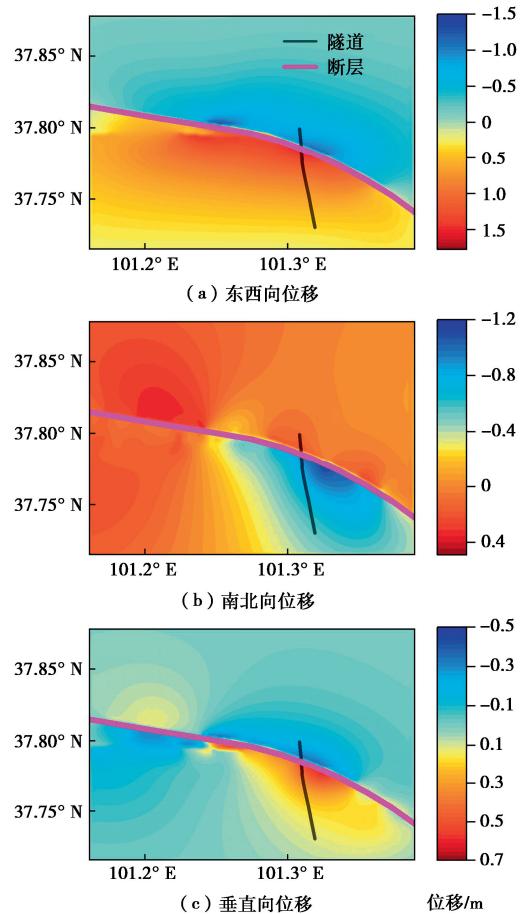


图8 大梁隧道附近的地表永久位移场

Fig. 8 Surface permanent displacement field in the vicinity of Daliang tunnel

速度脉冲周期是近断层脉冲型地震动的重要参数,其与矩震级的正相关性已在许多研究中得到证实,表3展示了相关的统计回归公式。因此,基于表3中的

公式, 2022年门源6.9级地震的脉冲型地震动的速度脉冲周期约为2.09~3.64 s。

表 3 脉冲周期与震级的关系

Table 3 Relationship between pulse period and magnitude

公式来源	统计模型
Somerville <sup>[31]</sup>	$\lg T_p = 0.50M_w - 3.0$
Bray <sup>[32]</sup>	$\ln T_p = 1.03M_w - 6.37$
Baker <sup>[33]</sup>	$\ln T_p = 1.02M_w - 5.78$
Tang <sup>[34]</sup>	$\lg_{10} T_p = 0.38M_w - 2.18$
Cork <sup>[35]</sup>	岩石: $\lg T_p = 0.47M_w - 2.73$ 土壤: $\lg T_p = 0.39M_w - 2.13$

位移峰值和永久位移的比值 ( $R_{PGD}$ ) 的计算取决于永久位移  $D_{site}$ , 而  $D_{site}$  受基线校正方法的影响较大, 因此不同研究者分析同一条地震动得到的  $R_{PGD}$  也可能有显著的差异。曾聰等<sup>[36]</sup>分析了 96 条包含永久位移的滑冲效应地震动记录, 认为  $R_{PGD}$  与永久位移  $D_{site}$  和震级大小相关, 并建议震级 6.9 级时速度脉冲的相位  $\varphi$  取值范围为  $10^\circ \sim 50^\circ$ , 对应  $R_{PGD}$  为  $1.1 \sim 1.5$ 。本节以取值范围的中间值作为计算案例, 假设位移峰值和永久位移的比值为 1.3, 速度脉冲周期为 3.0 s。图 9 展示了归一化的地震动位移时程, 位移波形的开始时间为 0.1 s, 脉冲周期为 3.0 s, 结束时间为 3.1 s, 速度脉冲的包络函数峰值时间  $t_0$  近似为  $0.1 + T_p / 2$ 。

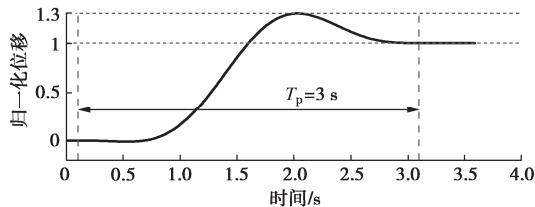


图 9 归一化的地震动位移时程

Fig. 9 Normalised ground motion displacement time history

根据2.2节所描述的震源参数和地壳速度模型参数, 基于分层位错理论计算有限元模型所有边界节点的永久位移值, 并乘以相同的归一化永久位移的地震动位移时程获得边界节点的动态位移过程, 最后基于黏弹性人工边界模拟有限元模型的地震波动。图10展示了不同时刻的隧道整体位移分布, 位移场在0.1~2.0 s逐渐增大, 在2.0 s达到位移峰值; 在2.0~3.1 s又逐渐减小; 在3.1 s后的位移场可以认为是断层位错产生的地层永久变形。受到断层产状的影响, 隧道呈现出显著的水平左旋走滑变形和逆冲变形。显然, 位于断层面附近的隧道段永久变形分布更不均匀, 远离断层面的隧道段的永久位移值虽然较大, 但永久变形分布均匀, 隧道段相当于发生了平移。因此, 针对跨越甚至穿越断层的隧道结构的抗震分析中, 在断层面附近沿隧道纵向的相对错动是不可忽视的因素。

基于本文的方法, 隧道的位错量会随着时间 and 空间

变化。图 11 展示了隧道拱顶沿纵向不同位置的位移时程, 其中距离为负值表示隧道位于断层上盘(南侧), 距离为正值表示隧道位于断层下盘(北侧)。隧道的整体位移场从 0.1 s 至 2.0 s 逐渐增大, 在 2.0 s 时隧道的位移和变形达到了最大值, 随后位移出现回弹, 在 3.1 s 时回落至永久位移段。根据计算结果(见图 11), 沿隧道纵向不同位置的位移时程的位移峰值与永久位移的比值大约为 1.3, 符合模型定义的归一化地震动波形。受断层主动盘影响, 隧道位于断层上盘处的整体位移相较于下盘位置更大。在断层上、下盘两侧, 隧道发生了显著的相对错动, 并且隧道在断层错动过程中的最大相对错动值也大约为永久相对错动值的 1.3 倍。因此, 位移峰值和永久位移的比值  $R_{PGD}$  是穿越断层隧道的抗震分析中的关键参数。

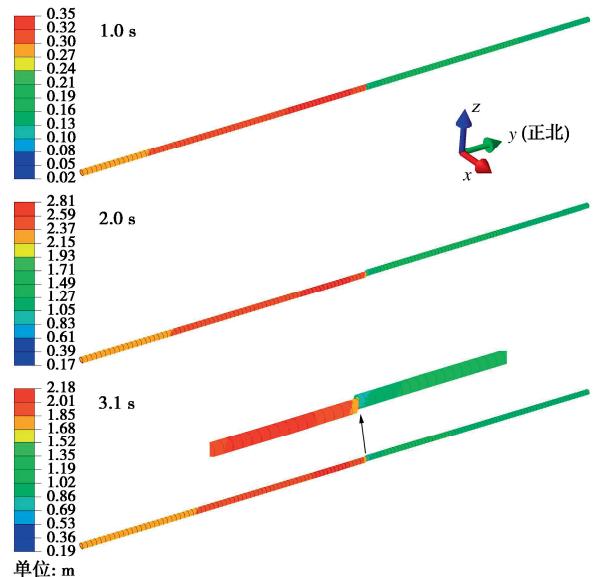


图 10 不同时刻的隧道整体位移分布

Fig. 10 Overall displacement distribution of tunnel at different moments

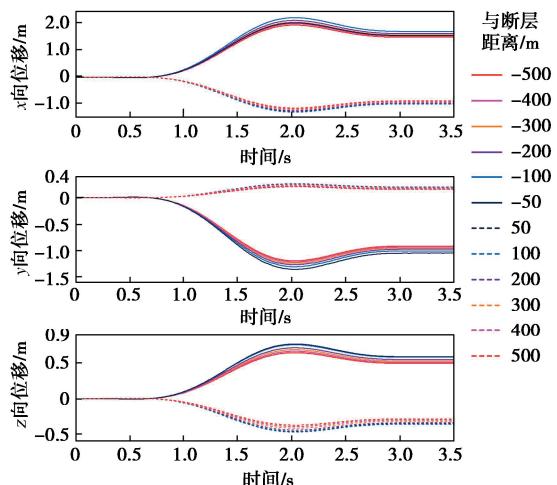


图 11 隧道拱顶沿纵向不同位置的位移时程

Fig. 11 Displacement time history of tunnel vaults at different locations along longitudinal direction

图12展示了隧道拱顶、仰拱和拱腰沿纵向的永久位移分布。根据模拟结果：在上盘区域，隧道的横向( $x$ 向)和纵向( $y$ 向)的永久位移达到了 $1.73, -1.05\text{ m}$ ，垂直向逆冲位移( $z$ 向)达到 $0.61\text{ m}$ ；在下盘区域，隧道的横向和纵向的永久位移达到了 $-1.03, 0.24\text{ m}$ ，垂直向最大位移为 $-0.38\text{ m}$ 。因此，隧道的横向相对错动量达到了 $2.76\text{ m}$ ；纵向相对错动量达到了 $1.29\text{ m}$ ；垂直向相对错动量达到了 $0.99\text{ m}$ 。根据门源地震现场震害调查发现，大梁隧道洞内的水平相对错动量约为 $2.8\sim 3.0\text{ m}$ ，垂直向相对错动量为 $0.91\text{ m}$ 。因此，数值模拟结果与现场调查结果相似<sup>[6]</sup>，验证了本文方法的合理性。在上下盘距离断层 $100\text{ m}$ 范围内，隧道的拱顶、仰拱和拱腰的纵向位移分布存在明显的差异，说明在跨断层附近隧道不仅承受着沿着纵向的相对错动，在横截面上还发生了显著的扭曲变形。在远离断层的位置，虽然隧道还存在较大的位移量，但是截面上不同部位的位移量相近，并且沿着纵向的位移变化不大，隧道近似于发生了整体平移。

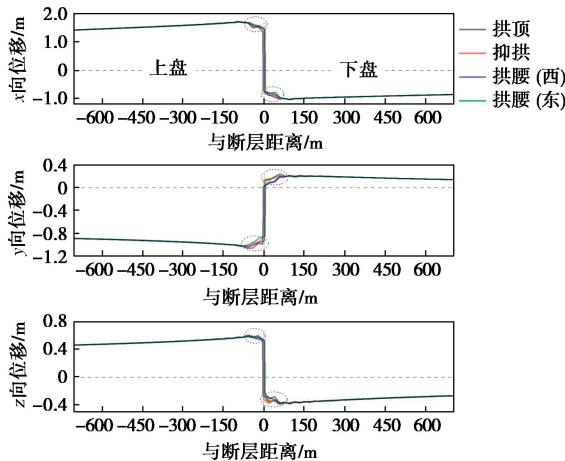


图 12 隧道拱顶、仰拱和拱腰沿纵向的永久位移分布

Fig. 12 Permanent displacement distribution along longitudinal direction of tunnel vault, invert and waist

图 13 (a), (b) 分别展示了隧道结构在不同时刻的拉伸损伤和压缩损伤的分布情况。根据震后现场调查，大梁隧道的变形破坏模式以剪切挤压为主。如图 13 (a) 所示，隧道结构的压缩损伤主要分布于拱顶和仰拱，隧道位于上、下盘两侧距离断层 $80\text{ m}$ 处还有明显的压缩损伤。如图 13 (b) 所示，隧道结构的拉伸损伤主要位于拱腰，隧道位于下盘位置（北侧）的拉伸损伤相较于上盘位置更加显著，表明隧道位于断层下盘侧的受拉破坏更严重，该结论与现场调查结果一致<sup>[6]</sup>。在初期( $1.0\text{ s}$ )，隧道的压缩损伤和拉伸损伤主要分布在错动面附近，并且损伤的分布形状与断层的产状相关。在距断层 $40\text{ m}$ 之外，隧道在峰值位移时刻( $2.0\text{ s}$ )与永久位移时刻( $3.6\text{ s}$ )的损伤分布基本一致。在位移的回弹阶段( $2.0\sim 3.1\text{ s}$ )

$\text{s}$ )，隧道在下盘区域距断层 $40\text{ m}$ 之内的压缩损伤和拉伸损伤都显著增加，意味着位移回弹也会对隧道造成一定程度的破坏。因此，隧道的结构破坏不仅受到永久位移值的影响，还取决于位移峰值和 $R_{\text{PGD}}$ 。

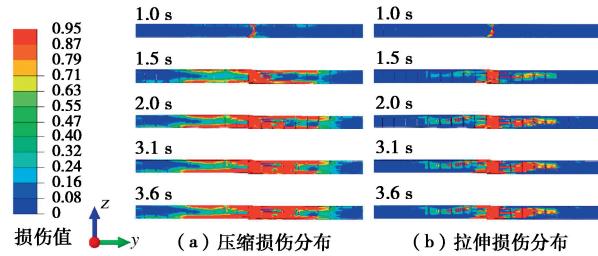


图 13 隧道结构在不同时刻的拉伸损伤和压缩损伤的分布

Fig. 13 Distribution of tensile and compressive damage of tunnel at different moments

### 3 相关参数对地震响应分析的影响

#### 3.1 脉冲周期

速度脉冲周期的对数与震级线性相关，基于表 3 中脉冲周期与震级的统计公式，2022 年门源 6.9 级地震的速度脉冲周期约为 $2.09\sim 3.64\text{ s}$ 。假设位移峰值和永久位移的比值均为 1.3 (对应 $\varphi=38.2^\circ$ )，本文基于脉冲周期分别为 $2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0\text{ s}$ 共 5 组滑冲效应地震动，研究脉冲周期对跨断层隧道的地震动力响应的影响。图 14 展示了不同速度脉冲周期对应的归一化地震动位移波形和速度波形，波形的开始时间为 $0.1\text{ s}$ 。在 $R_{\text{PGD}}$ 不变的情况下，脉冲周期越小，位移随着时间变化越剧烈，速度时程的幅值也越大。

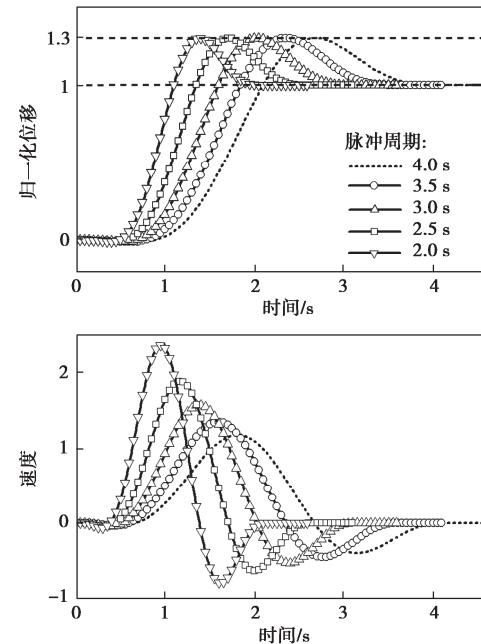


图 14 不同脉冲周期对应的归一化地震动波形

Fig. 14 Normalised ground motions with different  $T_p$

隧道的塑性损伤直接关系到结构的破坏程度，并且塑性损伤具有累积性，可以用于分析在位移峰值和永久位移不变的前提下，不同脉冲周期的工况下的隧道地震动力响应。图 15 展示了不同速度脉冲周期条件下的隧道压缩损伤和拉伸损伤的分布情况。在不同脉冲周期的情况下，隧道结构的压缩损伤依然主要分布于拱顶和仰拱，拉伸损伤也主要位于隧道的拱腰。随着脉冲周期的减小，隧道的压缩损伤和拉伸损伤的分布面积都显著增加。此外，在断层下盘的范围内，随着脉冲周期的减小，隧道的损伤分布面积增加得更加显著。显然，在位移峰值和永久位移不变的条件下，脉冲周期越小，位移随着时间变化越剧烈，速度时程的幅值也越大，隧道破坏的可能性越高。

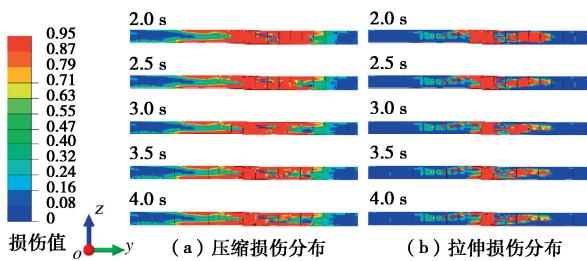


图 15 不同脉冲周期时隧道的损伤分布图

Fig. 15 Damage distribution of tunnel with different  $T_p$

### 3.2 位移峰值

目前关于地震动的位移峰值和永久位移对穿越断层的地震动力响应的影响特征与机理研究较少。位移峰值和永久位移的比值 ( $R_{PGD}$ ) 的计算取决于永久位移，而永久位移受基线校正方法的影响较大。曾聪等<sup>[36]</sup>基于 96 条包含永久位移的滑冲效应地震动记录，认为  $R_{PGD}$  和震级大小相关，并建议震级 6.9 级时速度脉冲的相位 ( $\varphi$ ) 取值范围为  $10^\circ \sim 50^\circ$ ，对应  $R_{PGD}$  为 1.1~1.5。假设速度脉冲周期为 3.0 s，本文基于  $R_{PGD}$  分别为 1.0 (正弦波)、1.1 (对应  $\varphi=9.6^\circ$ )、1.2 (对应  $\varphi=27.7^\circ$ )、1.3 (对应  $\varphi=38.2^\circ$ )、1.4 (对应  $\varphi=45.4^\circ$ ) 和 1.5 (对应  $\varphi=50.7^\circ$ ) 共 6 组滑冲效应地震动，研究位移峰值对跨断层隧道的地震动力响应的影响。图 16 展示了不同  $R_{PGD}$  对应的归一化地震动位移波形和速度波形，在脉冲周期不变的条件下， $R_{PGD}$  越大，位移随着时间变化越剧烈，速度时程的幅值也越大。

图 17 展示了不同位移峰值情况下隧道压缩损伤和拉伸损伤的分布情况。在不同位移峰值的情况下，隧道结构的压缩损伤依然主要分布于拱顶和仰拱，拉伸损伤也主要位于隧道的拱腰。在脉冲峰值和永久位移不变的条件下，随着位移峰值的增加，隧道的压缩损伤和拉伸损伤的分布面积都显著增加。在断层下盘的范围内，随着位移峰值的增加，隧道的损伤分布面

积增加得更加剧烈。显然，在脉冲周期和永久位移不变的条件下，位移峰值越大，隧道破坏的可能性越高。

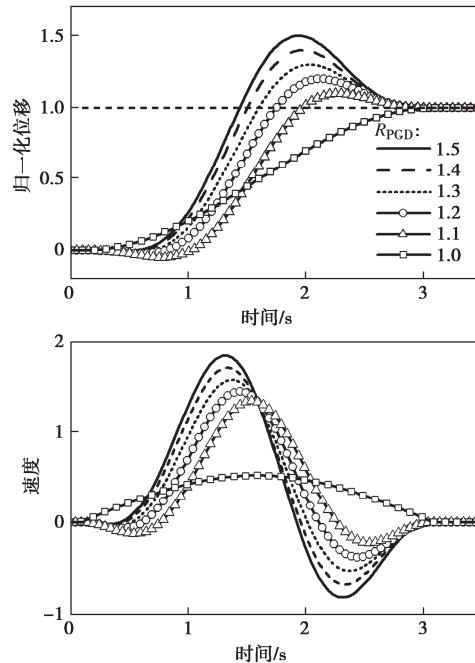


图 16 不同  $R_{PGD}$  对应的归一化地震动波形

Fig. 16 Normalised ground motions with different  $R_{PGD}$

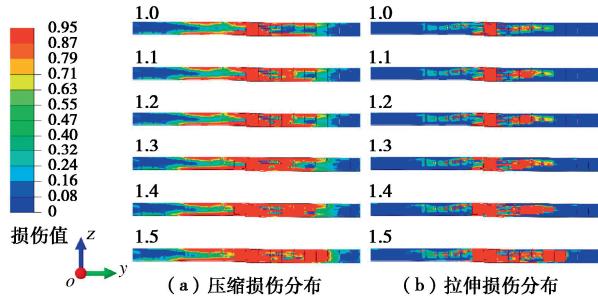


图 17 不同  $R_{PGD}$  时隧道的损伤分布图

Fig. 17 Damage distribution of tunnel with different  $R_{PGD}$

由图 15、17 可知，隧道结构的压缩损伤和拉伸损伤的分布位置主要受到断层产状的影响，但是随着脉冲周期的减小和位移峰值的增加，压缩损伤和拉伸损伤的分布面积都将逐渐增加。为了进一步分析脉冲周期和位移峰值对隧道损伤的影响程度，图 18 对比了  $R_{PGD}$  为 1.3 且脉冲周期为 2.0 s 与  $R_{PGD}$  为 1.5 且脉冲周期为 3.0 s 两组工况条件下隧道的损伤分布情况。如图 18 (b) 所示， $R_{PGD}$  为 1.3 且脉冲周期为 2.0 s 的工况对应的速度时程具有更大的峰值，但是  $R_{PGD}$  为 1.5 且脉冲周期为 3.0 s 的工况下隧道的压缩损伤和拉伸损伤的分布范围更大 (见图 18 (c), (d))。因此，相较于脉冲周期的变化，位移峰值对隧道的压缩损伤和拉伸损伤的分布面积的影响更加显著。

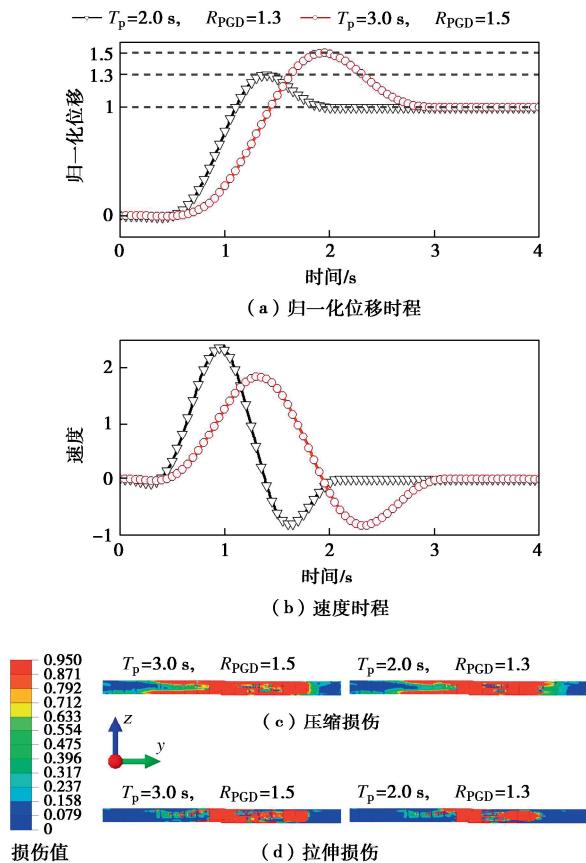


图 18 两组地震动波形条件下隧道的损伤分布

Fig. 18 Damage distribution of tunnel under two different ground motion waveform conditions

## 4 结 论

本文提出一种考虑同震位移的隧道地震动力分析方法, 该方法可以考虑永久位移、脉冲周期和峰值位移对地震响应的影响。并以2022年门源地震为例, 分析大梁隧道的变形和破坏特征。主要得到以下4点结论。

(1) 提出了一种考虑永久位移的脉冲型地震动表示式, 将静态同震位移转化为动态冲击荷载, 并考虑了震动峰值位移与永久位移之间的关系。该地震动表达式基于Mavroeidis速度脉冲函数, 考虑永久位移归一化和振荡参数逼近1的前提下, 推算了位移峰值和永久位移的比值与脉冲相位之间的关系。

(2) 考虑同震位移的地震动力响应分析流程如下: 首先, 根据有限断层震源参数和地壳速度模型参数, 基于分层位错理论计算静态地震位移场; 然后, 根据本文提出的考虑永久位移的地震动表达式, 将静态的地震位移场转化为动态位移过程; 最后, 基于黏弹性人工边界模拟有限元模型的地震波动。

(3) 以2022年门源6.9级地震为例, 分析大梁隧道的错动变形和破坏特征, 隧道错动量的模拟结果

为: 横向相对错动量达到了2.76 m; 纵向相对错动量达到了1.29 m; 垂直向相对错动量达到了0.99 m。隧道的不均匀变形和损伤集中在断层面附近, 隧道的压缩损伤主要分布于拱顶和仰拱, 隧道结构的拉伸损伤主要分布于拱腰位置。隧道位于断层下盘位置(北侧)的拉伸损伤和压缩损伤相较于上盘位置更加显著。因此, 模型计算结果与现场调查结果相似。

(4) 进一步分析了近断层地震动的脉冲周期和峰值位移对隧道结构地震响应分析的影响规律。脉冲周期越小, 单向速度脉冲幅值越大, 断层错动的冲击效应越明显, 隧道破坏越严重。当脉冲周期不变时, 峰值位移越大隧道破坏越严重, 并且位移回弹对结构损伤的影响不可忽视。此外, 相较于脉冲周期, 位移峰值对隧道的破坏效应更加显著。

**利益冲突声明/Conflict of Interests:** 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

**作者贡献/Authors' Contributions:** 冯俊参与研究方案设计、数值计算分析和论文写作, 赵伯明和王子珺参与论文的修改与指导。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。FENG Jun accomplished the research program design, numerical analysis and manuscript draft. ZHAO Bomeng and WANG Zijun participated in the revision and guidance of the manuscript. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

## 参考文献:

- [1] 陈卫忠, 宋万鹏, 赵武胜, 等. 地下工程抗震分析方法及性能评价研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(2): 310-325. (CHEN Weizhong, SONG Wanpeng, ZHAO Wusheng, et al. Research progress of seismic analysis methods and performance evaluation in underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(2): 310-325. (in Chinese))
- [2] 赵天次. 活动断层位错与地震动共同作用的隧道工程反应与损伤分析方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022. ZHAO Tianci. Research on Tunnel Engineering Response and Damage Analysis Method Based on Active Fault Dislocation and Ground Motion[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022. (in Chinese))
- [3] KONTOGIANNI V, STIROS S. Earthquakes and seismic faulting: effects on tunnels[J]. Turkish Journal of Earth Sciences, 2003, 12: 153-156.
- [4] WANG W L, WANG T T, SU J J, et al. Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi Earthquake[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(3):

- 133-150
- [5] 孙风伯. 穿越活动断裂山岭隧道抗位错机理与方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018. (SUN Fengbo. Failure Mechanism and Method of Anti-Dislocation of Mountain Tunnel Through Active Fault[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018. (in Chinese))
- [6] 张威, 李明, 姬云平, 等. 青海门源 M6.9 地震典型隧道破坏特征分析与启示[J]. 地震工程学报, 2022, 44(3): 661-669. (ZHANG Wei, LI Ming, JI Yunping, et al. Analysis and enlightenment of typical failure characteristics of tunnels caused by the Menyuan M6.9 earthquake in Qinghai Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(3): 661-669. (in Chinese))
- [7] CILINGIR U, GOPAL MADABHUSHI S P. A model study on the effects of input motion on the seismic behaviour of tunnels[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(3): 452-462.
- [8] HUANG J Q, ZHAO X, ZHAO M, et al. Effect of peak ground parameters on the nonlinear seismic response of long lined tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 95: 103175.
- [9] KIANI M, AKHLAGHI T, GHALANDARZADEH A. Experimental modeling of segmental shallow tunnels in alluvial affected by normal faults[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 51: 108-119.
- [10] LIU X Z, LI X F, SANG Y L, et al. Experimental study on normal fault rupture propagation in loose strata and its impact on mountain tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 49: 417-425.
- [11] SABAGH M, GHALANDARZADEH A. Centrifugal modeling of continuous shallow tunnels at active normal faults intersection[J]. Transportation Geotechnics, 2020, 22: 100325.
- [12] ANASTASOPOULOS I, GAZETAS G, BRANSBY M F, et al. Fault rupture propagation through sand: finite-element analysis and validation through centrifuge experiments[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(8): 943-958.
- [13] BAZIAR M H, NABIZADEH A, MEHRABI R, et al. Evaluation of underground tunnel response to reverse fault rupture using numerical approach[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 83: 1-17.
- [14] LIN M L, CHUNG C F, JENG F S, et al. The deformation of overburden soil induced by thrust faulting and its impact on underground tunnels[J]. Engineering Geology, 2007, 92(3/4): 110-132.
- [15] 汪振, 钟紫蓝, 赵密, 等. 正断型断裂模拟及其对山岭隧道影响研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(10): 1876-1884. (WANG Zhen, ZHONG Zilan, ZHAO Mi, et al. Simulation of normal fault rupture and its impact on mountain tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(10): 1876-1884. (in Chinese))
- [16] OKADA Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1985, 75(4): 1135-1154.
- [17] OKADA Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. The Bulletin of the Seismological Society of America, 1992, 82(2): 1018-1040.
- [18] WANG R J, MARTIN F L, ROTH F. Computation of deformation induced by earthquakes in a multi-layered elastic crust: FORTRAN programs EDGRN/EDCMP[J]. Computers & Geosciences, 2003, 29(2): 195-207.
- [19] 赵天次, 赵伯明, 周玉书, 等. 基于活动断层的地表同震变形及对隧道衬砌损伤的影响[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(4): 107-119. (ZHAO Tianci, ZHAO Boming, ZHOU Yushu, et al. Co-seismic deformation of ground surface based on active fault and its impact on tunnel lining damage[J]. China Railway Science, 2021, 42(4): 107-119. (in Chinese))
- [20] CHEN P L, GENG P, CHEN J B, et al. The seismic damage mechanism of Daliang tunnel by fault dislocation during the 2022 Menyuan Ms6.9 earthquake based on unidirectional velocity pulse input[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 145: 107047.
- [21] KAMAI R, ABRAHAMSON N, GRAVES R. Adding fling effects to processed ground-motion time histories[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2014, 104(4): 1914-1929.
- [22] KALKAN E, KUNNATH S K. Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings[J]. Earthquake Spectra, 2006, 22(2): 367-390.
- [23] MAVROEIDIS G P. A mathematical representation of near-fault ground motions[J]. The Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, 93(3): 1099-1131.
- [24] AKI K, RICHARDS P G. Quantitative Seismology[M]. 2nd ed. Sausalito: University Science Books, 2002.
- [25] DEEKES A J, RANDOLPH M F. Axisymmetric time-domain transmitting boundaries[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1994, 120(1): 25-42.

- [26] 杜修力, 赵密, 王进廷. 近场波动模拟的人工应力边界条件[J]. 力学学报, 2006, 38(1): 49-56. (DU Xiuli, ZHAO Mi, WANG Jinting. A stress artificial boundary in fea for near-field wave problem[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(1): 49-56. (in Chinese))
- [27] YANG H F, WANG D, GUO R M, et al. Rapid report of the 8 January 2022 M S<sub>6.9</sub> Menyuan earthquake, Qinghai, China[J]. Earthquake Research Advances, 2022, 2(1): 100113.
- [28] ZHANG Y F, CHEN J, GONG W Y, et al. Geodetic modelling of the 2022 mW 6.6 Menyuan earthquake: insight into the strain-partitioned northern Qilian Shan fault system and implications for regional tectonics and seismic hazards[J]. Geophysical Journal International, 2022, 233(3): 1987-2003.
- [29] ZUO K Z, CHEN J F. 3D body-wave velocity structure of crust and relocation of earthquakes in the Menyuan area[J]. Chinese Journal of Geophysics-Chinese Edition, 2018, 61(7): 2788-2801.
- [30] 沈新普, 王琛元, 周琳. 一个钢筋混凝土损伤塑性本构模型及工程应用[J]. 工程力学, 2007, 24(9): 122-128. (SHEN Xinpu, WANG Chenyuan, ZHOU Lin. A damage plastic constitutive model for reinforced concrete and its engineering application[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(9): 122-128. (in Chinese))
- [31] SOMERVILLE P G. Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2003, 137(1/2/3/4): 201-212.
- [32] BRAY J D, RODRIGUEZ-MAREK A. Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, 24(11): 815-828.
- [33] BAKER J W. Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis[J]. The Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(5): 1486-1501.
- [34] TANG Y C, ZHANG J. Response spectrum-oriented pulse identification and magnitude scaling of forward directivity pulses in near-fault ground motions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(1): 59-76.
- [35] CORK T G, KIM J H, MAVROEIDIS G P, et al. Effects of tectonic regime and soil conditions on the pulse period of near-fault ground motions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 80: 102-118.
- [36] 曾聰, 江辉, 黄磊, 等. 跨断层独塔斜拉桥的非线性地震响应特性研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 230-245. (ZENG Cong, JIANG Hui, HUANG Lei, et al. Nonlinear seismic response characteristics of fault-crossing single-tower cable-stayed bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(2): 230-245. (in Chinese))