

DOI: 10.11779/CJGE202010013

# 正断型断裂模拟及其对山岭隧道影响研究

汪 振<sup>1</sup>, 钟紫蓝<sup>1</sup>, 赵 密<sup>\*1</sup>, 杜修力<sup>1</sup>, 黄景琦<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124; 2. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 活动断层的运动和与其相交山岭隧道的震害密切相关, 是隧道抗震设计所面临的严峻挑战之一。为此, 以滇中引水工程香炉山隧洞为研究背景, 运用断裂力学中的黏性界面模型结合有限元方法模拟正断层破裂过程。通过震害调查和试验结果对三维自由场的响应进行验证。进一步建立跨断层隧道三维数值分析模型探讨了不同断层错动量和倾角对隧道响应的影响规律, 并引入损伤指数建立隧道安全评价的分类标准对结构的震害进行初步评估。结果表明: 正断层错动所引起的地表破裂机制主要有弯曲陡坎和断裂陡坎; 隧道衬砌的轴向拉应变和环向剪应变在其与断层滑动面相交位置处达到最大; 断层错动量和倾角的变化对隧道不同震害状态沿纵向分布有明显影响; 随断层倾角的增大, 隧道衬砌处于严重损伤和完全损毁状态的长度要明显减小, 断层倾角在  $50^{\circ} \sim 70^{\circ}$  时对结构安全更为不利。

**关键词:** 山岭隧道; 正断层; 黏性界面模型; 破碎带; 衬砌响应

中图分类号: U45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)10-1876-09

**作者简介:** 汪 振(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事隧道等地下结构性能研究。E-mail: wangzhenSKG@126.com。

## Simulation of normal fault rupture and its impact on mountain tunnels

WANG Zhen<sup>1</sup>, ZHONG Zi-lan<sup>1</sup>, ZHAO Mi<sup>1</sup>, DU Xiu-li<sup>1</sup>, HUANG Jing-qi<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing

100124, China; 2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The seismic damage of mountain tunnels is closely associated with the movement of active faults. Seismic design of tunnels crossing active faults is one of the great challenges nowadays. Based on the engineering prototype of the Xianglu mountain tunnel, the water diversion project in central Yunnan Province, a numerical method to simulate the propagation of normal fault rupture is proposed using the finite element method incorporated with the cohesive interface model in fracture mechanics. The proposed method is verified against the post-earthquake reconnaissance and experimental results using the three-dimensional free-field model. It is used to simulate a tunnel crossing a normal fault, and the effects of fault displacement and dip angle on the response of the tunnel linings are discussed. Besides, the damage indices and safety assessment criteria are introduced to preliminarily evaluate the damage of the tunnel linings subjected to fault movement. The results show that the mechanisms of surface rupture exhibit the forms of folding or fault scarps under normal faulting. The axial tensile strain and hoop shear strain of the tunnel linings reach the maximum at the position where they intersect the fault slip surface. The seismic damage state of tunnel along the longitudinal direction is significantly affected by the fault displacement and dip angle. The length of the tunnel linings in a severely damaged and completely damaged state is significantly reduced with the increase of the dip angle. Dip angles of  $50^{\circ}$  to  $70^{\circ}$  are more detrimental to structural safety.

**Key words:** mountain tunnel; normal fault; cohesive interface model; damage zone; lining response

## 0 引 言

随着中国在工程建设领域, 特别是地下工程方面的快速发展<sup>[1]</sup>, 以滇中引水、川藏铁路、滇藏铁路以及川藏高速等为代表的重大工程在西部地区建设。特长和长大山岭隧道是西部地区新建或拟建的公路铁路和调水工程的主体结构咽喉。山岭隧道在建设进程中多将跨越不同地质地层, 甚至与活动断裂带相交<sup>[2]</sup>。近几次强震后的隧道受损案例调查中发现, 断层错动

所产生的地层永久变形会导致隧道衬砌的开裂、错台甚至坍塌<sup>[3-4]</sup>。因而, 在临近活动断裂带区域建设隧道前, 需考虑断层错动对隧道结构安全性的潜在影响。

断层的运动可以分为正断层、逆断层和走滑断

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51678015); 广东省地震工程与应用技术重点实验室开放基金项目(2017B030314068)

**收稿日期:** 2020-02-03

**\*通信作者** (E-mail: zhaomi@bjut.edu.cn)

层 3 种表现形式。在对正断层错动的研究中, Kiani 等<sup>[5]</sup>和 Cai 等<sup>[6]</sup>通过离心机试验的研究表明正断层错动引起分段式隧道的破坏会导致地表沉洞的形成。王道远等<sup>[7]</sup>采用模型试验对不同的隧道抗断措施的作用效果进行了评价。孙飞等<sup>[8]</sup>通过沙箱模型试验的研究表明正断层错动下地铁隧道在上盘仰拱位置出现与围岩间的脱空现象。Sabagh 等<sup>[9]</sup>基于离心机试验的研究结果表明正断层破裂所导致的集中沉降会对连续隧道造成严重破坏。Yan 等<sup>[10]</sup>采用沙箱模型试验和有限元方法对铰接隧道的研究认为, 衬砌节段间接头的调节可以有效减小结构受拉损伤的长度。在对逆断层错动的研究中, 刘学增等<sup>[11]</sup>通过沙箱模型试验, 研究了不同倾角逆断层黏滑错动下地层变形以及隧道受力和损伤特性。Chang 等<sup>[12]</sup>基于二维离散元法对逆断层运动所引起上覆土层的变形规律进行了研究。Baziar 等<sup>[13]</sup>采用二维有限元方法的研究表明埋于上覆土层中的隧道会影响逆断层的破裂路径。焦鹏飞等<sup>[14]</sup>探讨了断层倾角的不同对正交穿越逆断层隧道受力变形的影响。在对走滑断层错动的研究中, Zhao 等<sup>[15]</sup>通过有限元方法分析了走滑断层错动下采用柔性接头隧道的内力和塑性变形。Zaheri 等<sup>[16]</sup>基于有限差分程序研究了走滑断层错动下浅埋隧道的变形特征并开展了参数化研究。

综上所述, 目前国内外学者针对跨断层隧道的研究大致分为两类: 第一类<sup>[5-6, 8-9, 11-13]</sup>是通过断层基岩处的错动引起上覆地层变形, 进而研究位于上覆地层中隧道的响应特性。第二类<sup>[7, 10, 14-16]</sup>则是通过断层滑动面的设置实现对断层错动模拟, 进而研究断层错动对与断层正交或斜交隧道响应特性的影响。山岭隧道通常会直接穿越含有断层滑动面并具有一定宽度的断层破碎带, 因而对于其穿越活动断裂带的研究常采用第二类研究中的断裂模拟方法。在对山岭隧道的研究中, 关键在于建立合理的断层—隧道间相互作用模型, 这其中, 断层滑动面的本构模型在断层的动态破裂过程中起着重要作用, 会影响与其相交隧道结构的受力及损伤特性, 而当前研究中多将其简化为上盘和下盘岩

体间的静态接触面设置。此外, 对正断层错动下山岭隧道的变形模式和内力分布特征仍有待深入探讨, 且当前研究中尚缺乏对隧道损伤后的安全评估。

本文以滇中引水工程香炉山隧洞为实例, 基于断裂力学中的双线性黏聚力模型, 并结合有限元软件 ABAQUS, 通过将黏性界面单元嵌入实体单元的方法实现对正断层动态破裂过程的模拟, 并将含断层三维自由场响应结果与震害调查和试验结果进行对比验证。建立正断层—隧道三维数值分析模型, 对不同断层错动量和倾角下隧道衬砌的变形、应变及损伤特性进行探讨, 并对隧道损伤后的安全状态进行初步评估, 以期跨断层隧道的相关研究及工程设计提供参考。

# 1 工程实例

滇中引水工程是从金沙江上游石鼓河段取水, 为解决滇中区水资源短缺问题的特大型跨流域引(调)水工程。滇中引水工程中大理 I 段线路渠首建筑物以隧洞型式穿越金沙江与澜沧江的分水岭—马耳山脉, 称为“香炉山隧洞”。香炉山隧洞属于超长隧洞, 隧洞洞线全长 63.426 km, 沿线地质条件复杂, 发育多条大断裂, 其中龙蟠—乔后断裂(F10)、丽江—剑川断裂(F11)及鹤庆—洱源断裂(F12)为全新世区域活动断裂。本文研究选取的鹤庆—洱源断裂(F12)为左旋正断层, 断层倾角 60°左右, 断层内构造岩以灰色及灰褐色角砾岩为主, 胶结较好。断层外完整岩石的岩性主要为玄武岩、灰岩、砂岩及页岩, 以硬岩为主, 岩体较完整。图 1 为香炉山隧洞引水工程地质剖面图。依据香炉山隧洞的工程地质勘察资料并结合对钻孔试样的室内试验, 表 1 给出了鹤庆—洱源断裂岩石的力学参数。

香炉山隧洞施工工法包括 TBM (tunnel boring machine) 法和钻爆法, 其中穿越鹤庆—洱源断裂洞段采用钻爆法施工。隧洞横断面为圆形, 外径为 10 m。隧洞支护结构包括外衬和内衬, 其中外衬厚度 25 cm, 内衬厚度 60 cm。隧洞衬砌所采用混凝土标号为 C30。图 2 为采用钻爆法施工隧洞的支护结构图。

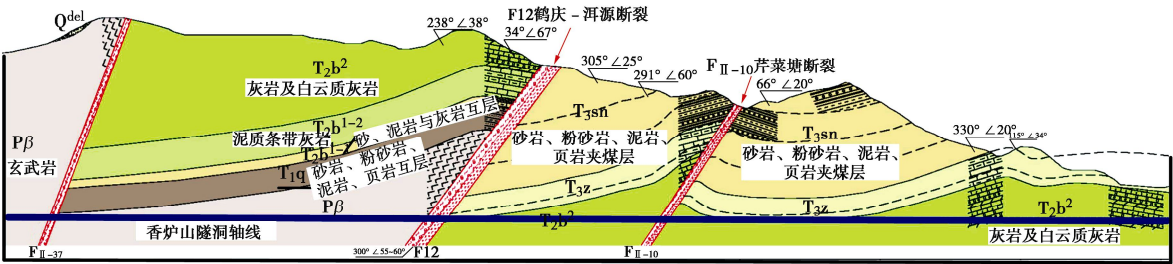


图 1 香炉山隧洞引水工程地质剖面图  
Fig. 1 Geological profile of Xianglushan tunnel

表 1 鹤庆—洱源断裂岩石的力学参数

Table 1 Geomechanical parameters of Heqing-Eryuan fault

| 类型    | 密度<br>$\rho/(10^3\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | 弹性模量<br>$E/\text{GPa}$ | 剪切模量<br>$G/\text{GPa}$ | 泊松比<br>$\nu$ | 内摩擦角<br>$\varphi/(^\circ)$ | 黏聚力<br>$c/\text{MPa}$ | 抗拉强度<br>$f_t/\text{MPa}$ | 抗剪强度<br>$\tau/\text{MPa}$ | 断裂能<br>$G/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$ |
|-------|--|------------------------|------------------------|--------------|----------------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|---|
| 完整岩石  | 2.9  | 7.5                    | —                      | 0.28         | 45                         | 1.1                   | —                        | —                         | —                                       |
| 断层破碎带 | 2.1  | 1.5                    | 0.56                   | 0.33         | 29                         | 0.15                  | 0.1                      | 0.3                       | 20                                      |

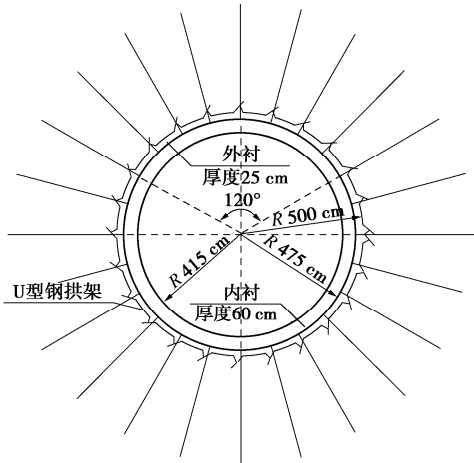


图 2 钻爆法施工隧洞支护结构图

Fig. 2 Schematic of tunnel supporting system constructed by drilling and blasting method

2 断裂本构模型

断层运动实质上是岩石发生可视化剪切位移的过程<sup>[17]</sup>，其表现出两个主要的特征：不连续性和大变形。为能够理想描述断层运动的以上特征，国内外学者多采用界面模型<sup>[18]</sup>。在本文中，将可模拟岩石断裂的黏性界面单元（cohesive interface element）嵌入断层破碎带中，用于模拟断层的破裂过程。

八节点三维黏性界面单元 COH3D8 的空间表示如图 3 中所示。单元顶面与底面沿厚度方向的相对运动表征界面的张开与闭合，而沿与厚度方向相垂直平面的相对位置变化则量化界面的横向剪切行为。

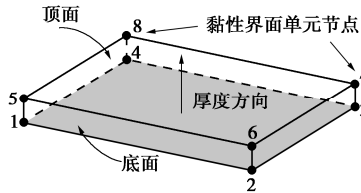


图 3 黏性界面单元 COH3D8 空间示意图

Fig. 3 Spatial representation of a three-dimensional cohesive interface element COH3D8

在本文中，黏性界面单元的本构响应服从如图 4 中所示的双线性模型，其中初始响应为线弹性，而一旦达到损伤临界条件，则材料出现损伤。材料强度随单元顶底面间位移增加呈线性递减。若材料在线性损伤演化阶段发生卸载，则曲线沿图 4 中虚线回到原点。

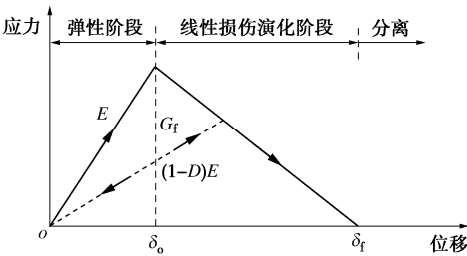


图 4 黏性界面单元双线性本构模型

Fig. 4 Bilinear constitutive model of cohesive interface element

材料在弹性阶段的线弹性行为用弹性本构矩阵表示，该矩阵将界面上的法向和切向应力与法向和切向位移相联系。界面的初始线弹性行为表示为

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_n & 0 & 0 \\ 0 & E_s & 0 \\ 0 & 0 & E_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = \mathbf{E} \boldsymbol{\delta} \quad (1)$$

式中， $\mathbf{t}$  为应力矩阵，包括 3 个分量  $t_n$ 、 $t_s$  和  $t_t$  分别表示断层滑动面中法向和两个切向的应力，所对应的位移分别为  $\delta_n$ 、 $\delta_s$  和  $\delta_t$ 。 $\mathbf{E}$  为约束刚度矩阵，其中  $E_n$  是法向刚度矩阵， $E_s$  和  $E_t$  是切向刚度矩阵。 $\boldsymbol{\delta}$  为位移矩阵。

选取最大主应力准则作为黏性界面单元损伤起始的判定准则。当最大应力比值达到 1 时界面损伤开始发生，即界面在任一方向所受应力达到其临界应力时材料开始损伤，表示为

$$\max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_t}{t_t^0} \right\} = 1 \quad (2)$$

式中， $t_n^0$  为法向的临界抗拉强度， $t_s^0$  和  $t_t^0$  为切向的临界抗剪强度。符号  $\langle \rangle$  为 Macaulay 括号，表征界面在纯压状态下不会出现损伤。

进入损伤软化阶段后，材料单元刚度减小。采用损伤指标  $D$  来描述单元刚度的退化速率。黏性界面单元的损伤演化采用图 4 中的线性软化准则，该准则定义了损伤变量  $D$  的详细演变（从初始损伤到完全破坏）过程，该演变过程所对应损伤指标  $D$  的计算公式为

$$D = \frac{\delta_f(\delta - \delta_o)}{\delta(\delta_f - \delta_o)} \quad (3)$$

式中， $\delta$  为变形过程中单元顶底面间相对位移最大值， $\delta_o$  和  $\delta_f$  分别为单元损伤初始和完全破坏时顶底面间相对位移，如图 4 中所示。

界面的完全失效行为采用断裂能来定义。断裂能

$G_f$ 为单元损伤演化过程中所耗散的能量,其对应为图 4 中双线性应力-位移曲线下的面积。黏性界面单元所需基本材料参数如表 1 中所示。

3 三维自由场数值分析

3.1 三维自由场数值分析模型

断层空间结构<sup>[19]</sup>包含有断层滑动面以及其周围由构造透镜体和断层岩所组成的断层破碎带。在三维自由场的数值分析模型中,假定断层滑动面位于断层破碎带的中间位置处,断层倾角取 60°。香炉山隧洞地勘资料显示,鹤庆—洱源断裂在不同位置地表处揭露的断层带宽度在 2~130 m 之间。本文暂取 10 m (1 倍隧道外径) 为典型工况进行分析。采用通用有限元分析软件 ABAQUS 建立三维自由场的数值分析模型,如图 5 中所示。棱柱体模型尺寸为 300 m×100 m×200 m。围岩采用八节点缩减积分实体单元 C3D8R 模拟。黏性界面单元 COH3D8 嵌入断层破碎带中间位置处模拟断层滑动面。围岩采用理想弹塑性 Mohr-Coulomb 模型描述其应力应变关系。Mohr-Coulomb 弹塑性模型的力学特性主要通过黏聚力  $c$ , 内摩擦角  $\varphi$ , 弹性模量  $E$ , 泊松比  $\nu$  以及剪胀角  $\psi$  来描述, 参数取值如表 1 中所示。剪胀角  $\psi$  的取值基于 Hoek 等<sup>[20]</sup>的建议采用恒定的剪胀参数。本文中的完整岩石取  $\psi = \varphi/8$ , 破碎带取  $\psi = 0$ 。为保证计算精度的同时提高计算效率, 数值分析模型在靠近地表及破碎带区域采用更为精细的网格划分, 而在其余部分的网格相对稀疏。

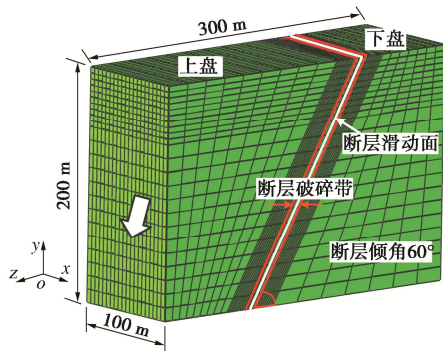


图 5 三维自由场数值分析模型

自由场工况下,正断层错动的模拟分为两个步骤。首先对围岩施加重力并进行地应力平衡,其中模型上表面为自由面,模型底面约束沿竖向位移,模型各侧面约束其法向位移。随后,在上盘采用拟静力方法施加 60° 倾角的位移实现断层错动,同时保持下盘固定。此外,为消除动力效应的影响,在每个时间增量步中所允许施加的最大断层位移量为 0.02 mm。

3.2 三维自由场数值分析结果

图 6 为正断层错动下自由场工况的等效塑性应变云图。由图 6 可知,在不同断层错动量  $\Delta f$  下,地表的变形呈两个明显不同的阶段。首先出现的是弯曲陡坎,表现为上盘与下盘在地表的连续变形,如图 6 (a) 中所示;随  $\Delta f$  的增加,地表变形由弯曲陡坎发展为断裂陡坎,表现为上盘与下盘间岩体的不连续变形并伴随有滑动面露出,如图 6 (b) 中所示。断裂陡坎在 2008 年的汶川地震中被记录到。图 7 中为表现“正断层”性质的地表破裂<sup>[21]</sup>。由图 7 中可知,断裂陡坎有明显的滑动面露出,且在接近于滑动面的上盘地表会有一定倾斜,这与自由场的数值分析结果基本一致。

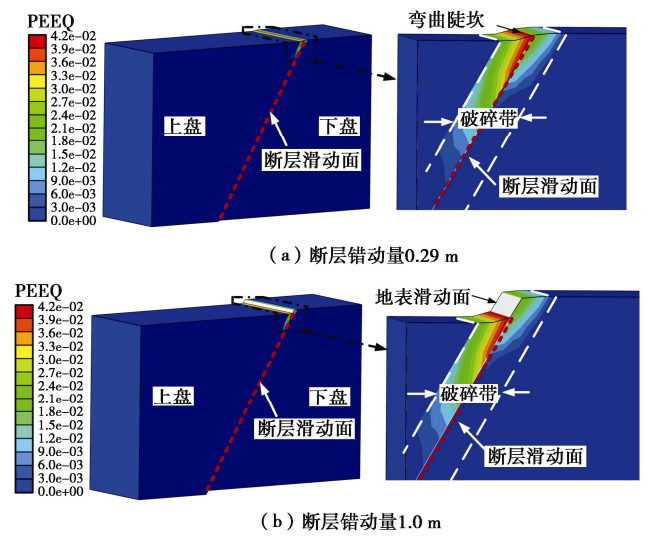
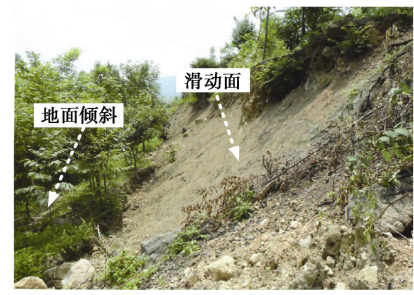
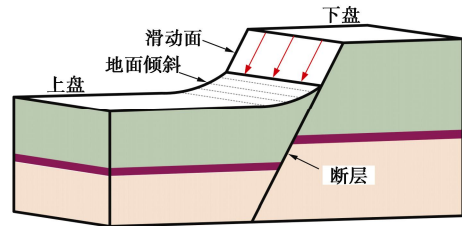


图 6 正断层错动下自由场工况的等效塑性应变云图

Fig. 6 Equivalent plastic strain contours of free-field condition under normal fault rupture



(a) 北川县城东侧山体形成的断裂陡坎



(b) 三维示意图

图 7 汶川地震中“正断层”性质的地表破裂图

Fig. 7 Surface rupture with features of “normal fault” in Wenchuan earthquake



此外, 由图 6 可知, 围岩的塑性破坏区集中于断层破碎带内部并接近地表的区域, 而在断层破碎带外的完整岩石中, 断层错动后围岩依然保持在弹性状态。围岩在上盘内的破坏范围和程度均要明显高于下盘, 且围岩的塑性剪切带呈倒三角型分布。

为进一步验证模型的准确性, 采用本文方法对文献[5]中的试验结果进行验算。采用试验中的土体参数建立有限元分析模型。在正断层错动下, 将有限元分析计算得到的地表变形与试验中所测得的地表变形进行对比, 如图 8 中所示, 其中横坐标  $X<0$  表示上盘区域;  $X=0$  表示断层滑动面;  $X>0$  表示下盘区域。由图 8 可知, 有限元分析结果与试验结果吻合程度较好, 地表土体的变形趋势一致。

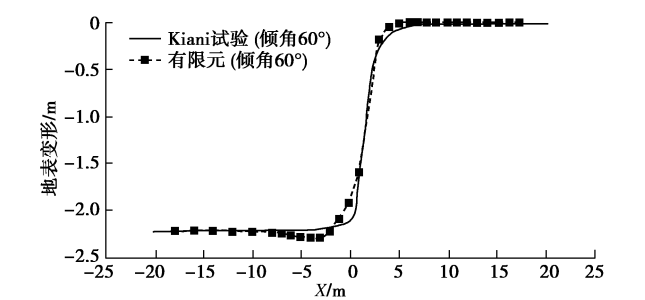


图 8 文献[5]的有限元分析与试验结果对比

Fig. 8 Comparison between finite element analysis and test results of Reference [5]

4 断层错动下跨断层隧道响应分析

4.1 断层—隧道三维数值分析模型

基于上文中所提出的正断型断裂模拟方法, 建立断层—隧道三维数值分析模型, 如图 9 中所示, 其中隧道中心处到地表距离取为 100 m。围岩所采用的材料参数、单元类型以及本构模型均与三维自由场数值分析模型中相同。隧道衬砌建模时采用八节点全积分实体单元 C3D8, 本构模型选取混凝土损伤塑性模型 (concrete damaged plasticity model, CDP 模型), 材料参数取值如表 2 中所示。在断层—隧道相互作用的分析中, 更为关注结构的响应特性。因此, 在断层—隧道三维数值分析模型中, 围岩在隧道周围和断层附近区域采用更为精细化的网格, 而在其余部分的网格相对粗糙。隧道则在其与断层滑动面相交附近 50 m 范围内采用精细化网格。

分析模型中隧道衬砌由外衬和内衬组成。外衬与围岩间采用绑定约束, 外衬与内衬间相互作用采用接触面力学模型。外衬内表面和内衬外表面间的接触设置可实现在断层错动过程中衬砌间的相对滑移 (包括法向和切向位移) 以及接触力的传递, 以更真实反映

衬砌间的相互作用关系。在界面的法向采用“硬接触”, 即界面法向仅能传递接触压力, 且不限制接触压力数值大小; 当外衬与内衬之间的接触压力变为 0 或负值时, 两者分离同时解除相应节点上的接触约束。界面的切向力学行为采用库仑摩擦定律, 并采用罚刚度算法, 允许弹性滑移变形。当切向接触剪应力超出临界值时, 外衬与内衬间将产生相对滑移, 其中摩擦系数取值为 0.4<sup>[22]</sup>。

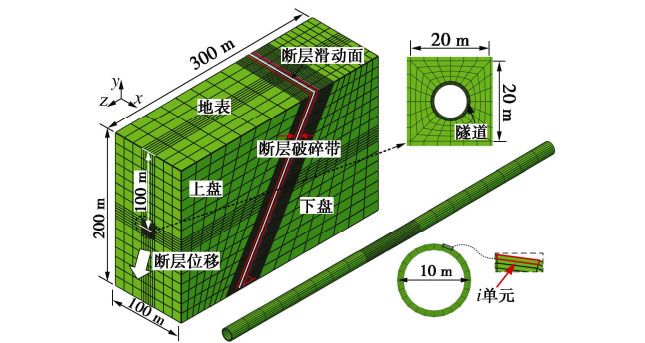


图 9 断层—隧道三维数值分析模型

Fig. 9 Three-dimensional numerical model for a tunnel crossing a fault

表 2 混凝土损伤塑性模型力学参数

Table 2 Mechanical parameters of concrete damaged plasticity model

| 参数                                      | 数值               |
|---|------------------|
| 密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | $2.5\times 10^3$ |
| 弹性模量 $E/\text{GPa}$                     | 30               |
| 泊松比 $\nu$                               | 0.2              |
| 剪胀角 $\psi/(\text{°})$                   | 36.31            |
| 压缩屈服应力 $f_c/\text{MPa}$                 | 20.1             |
| 拉伸屈服应力 $f_t/\text{MPa}$                 | 2.01             |

断层—隧道三维数值分析模型的分析过程分为以下 3 个步骤: ①地应力平衡; ②隧道开挖模拟; ③断层错动位移的施加。在第一分析步中, 移除隧道衬砌 (包括外衬和内衬), 对围岩施加重力并通过地应力平衡得到初始状态。随后, 在第二分析步中, 隧道的开挖采用收敛约束法, 并简化为一步开挖方案, 即假定开挖区域内的岩石由一侧至另一侧瞬时开挖。在开挖面通过荷载释放系数  $\alpha$  逐步释放节点力  $F_n$  以模拟施工开挖过程。当节点力  $F_n$  释放至初值  $F$  的 50% 时激活隧道衬砌单元<sup>[23]</sup>。在第三分析步中, 断层位移施加在上盘中, 同时保持下盘固定, 与三维自由场数值分析模型中相一致。

4.2 隧道衬砌响应分析

(1) 断层错动量  $\Delta f$  的影响规律

选取断层倾角  $60^\circ$ , 断层破碎带宽度 10 m (1 倍

隧道外径)为基本分析模型,探讨在不同错动量  $\Delta f$  下隧道衬砌的变形、应变和损伤分布规律。

隧道横断面变形是表征结构损伤的重要方法之一。在《地下结构抗震设计标准》<sup>[24]</sup>中对于圆形隧道建议采用直径变形率(椭圆率)作为指标来判别结构的损伤状态。对于山岭隧道而言,其横断面变形主要来源于两个方面:①开挖过程中岩体的应力释放对隧道横断面的压缩;②断层位错所引起的隧道横断面不规则变形。在正断层错动下,隧道横断面的变形主要表现为拱顶和仰拱之间的相对位移。因而,选取隧道竖轴的直径变形率  $\mu$  来分析断层错动下结构的变形规律,其中  $\mu$  定义为

$$\mu = \Delta W_v / W_t, \quad (4)$$

式中,  $\Delta W_v$  为隧道拱顶和仰拱间的相对位移,  $W_t$  为隧道直径 ( $W_t = 10 \text{ m}$ )。

图 10 为不同  $\Delta f$  下隧道直径变形率沿纵向的变化规律,其中  $\mu$  值大于 0 表示截面拉伸而小于 0 则表示截面收缩。由图 10 可以明显看出,隧道横断面随正断层错动由圆形逐步变为水平椭圆形。隧道的横断面变形主要集中于断层破碎带内洞段,并以断层滑动面附近 3 m 范围内最为严重。

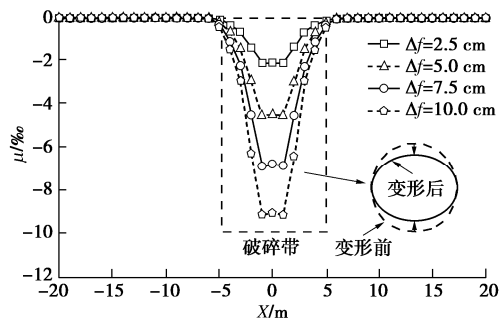


图 10 不同错动量下隧道直径变形率

Fig. 10 Deformation ratios of tunnel diameter at different fault displacements

图 11 为不同  $\Delta f$  下隧道轴向应变分布云图,图中正值表示拉应变而负值表示压应变。正断层错动下,隧道衬砌沿轴向以受拉为主。轴向拉应变沿断层滑动面两侧分布,且与倾角方向一致。此外,隧道拱顶和仰拱处的轴向拉应变要高于隧道横断面中其他部位,这是由于上盘内隧道仰拱和下盘内隧道拱顶在正断层错动后受到弯曲及轴向拉伸共同作用的结果。

图 12 为不同  $\Delta f$  下隧道衬砌环向剪应变分布云图。分析可知,环向剪应变主要分布于断层滑动面两侧隧道的拱脚至拱肩区域,而在拱顶和仰拱位置处较小。因而在正断层错动下,隧道衬砌在其侧壁区域易于发生混凝土的剪切破坏。

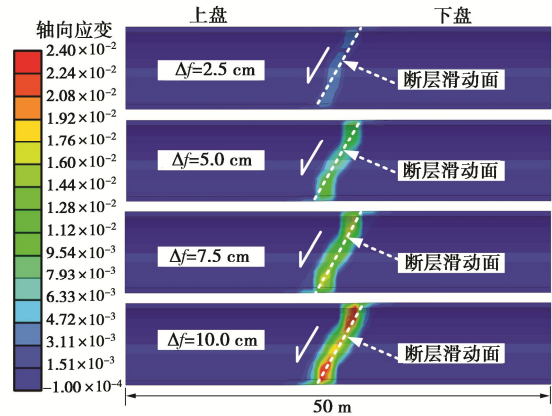


图 11 不同错动量下隧道轴向应变云图

Fig. 11 Axial strain contours of tunnel at different fault displacements

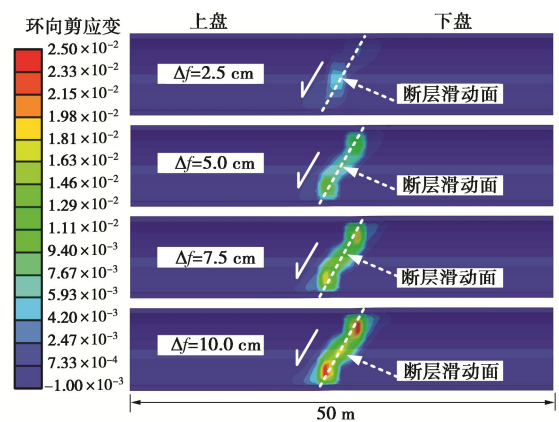


图 12 不同错动量下隧道环向剪应变云图

Fig. 12 Hoop shear strain contours of tunnel at different fault displacements

在 CDP 模型中,材料的损伤采用指标  $d$  来表征,取值在 0~1 之间,其中  $d=0$  表征材料无损伤而  $d=1$  则表征材料的完全破坏。为更加简单有效的反映隧道沿纵向的受损状态分布,采用整体衬砌受拉损伤指标 OLDI (overall lining damage indices in tension) 用于结构的损伤评价<sup>[25]</sup>。在本文中,OLDI 是基于隧道横断面单元  $d$  值采用式 5 计算得到。OLDI 损伤指标通过对隧道横断面中每个单元的局部损伤值加权平均,并以单元消散能量作为加权因子,表达式如下:

$$\text{OLDI} = \frac{\sum_i E_i^e d_i^e}{\sum_i E_i^e} \quad (5)$$

式中  $i$  为隧道横断面的单元编号;  $E_i^e$  为  $i$  单元的消散能量;  $d_i^e$  为  $i$  单元的受拉损伤量值,即  $d$  值。OLDI 定量的估计隧道横断面在断层错动下的损伤程度,反映了隧道横断面中受损最为严重区域的状态。

依据山岭隧道的震害统计<sup>[26]</sup>并结合 HAZUS<sup>[27]</sup>中对于生命线工程的损伤状态界定,在本文中,通过 OLDI 损伤指标的取值<sup>[28]</sup>将输水隧道的损伤划分为以

下4种状态: ①DS1 (轻微,  $0 \leq \text{OLDT} \leq 0.3$ ): 隧道衬砌无损伤或仅轻微开裂 (无需修复); ②DS2 (中等,  $0.3 < \text{OLDT} \leq 0.6$ ): 隧道衬砌出现可见混凝土开裂, 结构出现轻度渗漏水, 功能受损 (表面修复); ③DS3 (严重,  $0.6 < \text{OLDT} \leq 0.8$ ): 隧道衬砌混凝土有大量裂缝产生, 需中断隧道的正常使用而对衬砌进行修复; ④DS4 (完全,  $0.8 < \text{OLDT} \leq 1.0$ ): 隧道衬砌大面积开裂并导致混凝土局部剥落, 衬砌的修复耗费较高。

图13为不同 $\Delta f$ 下OLDT沿隧道轴向的变化规律。图中不同颜色表征隧道洞段的不同受损状态, 由DS1至DS4。由隧道损伤状态分布可知, 在正断层错动下, 隧道的受损伤洞段 (即  $\text{OLDT} > 0$ ) 集中于断层滑动面附近32 m范围内。当 $\Delta f$ 小于5.0 cm时, 隧道的整体损伤处于DS1至DS3之间; 当 $\Delta f$ 达到10.0 cm时, 在靠近断层滑动面附近隧道洞段约8 m范围内的损伤程度达到DS4。

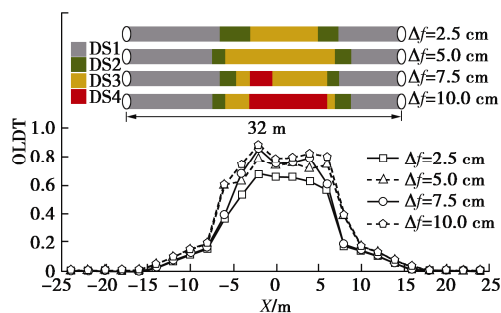


图13 不同错动量下OLDT变化规律

Fig. 13 Distribution of OLD T at different fault displacements

## (2) 断层倾角 $\beta$ 的影响规律

断层倾角是表征断层几何形态的重要参数之一,  $\beta$ 的不同会显著影响上盘地层的位移特征。断层倾角随着场地的变化而存在差异, 香炉山隧洞所穿越断裂带的倾角主要分布在  $50^\circ \sim 90^\circ$  之间。选取 $\beta$ 分别为  $50^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $80^\circ$  和  $90^\circ$  分析其对正断层错动下隧道衬砌响应的影响规律。断层错动量 $\Delta f$ 取为5.0 cm。

图14为隧道直径变形率随 $\beta$ 的变化曲线。从图14中可以明显看出, 随 $\beta$ 的增大, 隧道直径变形率 $\mu$ 呈现先增加后减小趋势。 $\mu$ 值由 $\beta=50^\circ$ 时的4.17‰先增加至 $\beta=70^\circ$ 时的4.76‰, 随后减小至 $\beta=90^\circ$ 时的1.58‰。此外, 隧道发生较为严重横断面变形的洞段长度在 $\beta=50^\circ$ 时集中于断层滑动面附近6 m范围内, 要明显大于其余工况。

图15给出了不同 $\beta$ 下隧道的轴向应变分布云图。由图15分析可知, 随 $\beta$ 的增大, 轴向拉应变的分布范围更为集中, 而量值呈递减趋势。轴向拉应变的峰值由 $\beta=50^\circ$ 时的0.0136单调递减至 $\beta=90^\circ$ 时的0.0038。

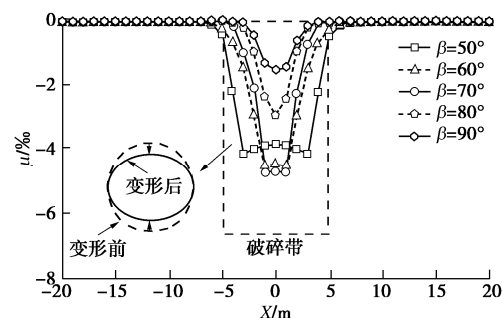


图14 不同倾角下隧道直径变形率

Fig. 14 Deformation ratios of tunnel diameter at different dip angles

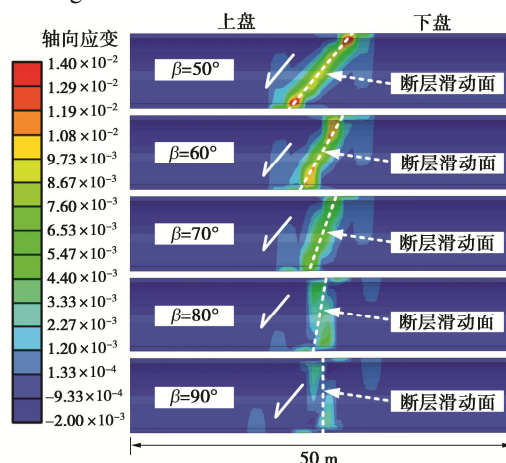


图15 不同倾角下隧道轴向应变云图

Fig. 15 Axial strain contours of tunnel at different dip angles

图16给出了不同 $\beta$ 下隧道衬砌环向剪应变分布云图。由图16分析可知, 随 $\beta$ 增大, 隧道衬砌的受剪切破坏范围更为集中, 但其受剪切破坏程度加重, 且集中于隧道拱腰附近区域。环向剪应变峰值由 $\beta=50^\circ$ 时的0.007单调递增至 $\beta=90^\circ$ 时的0.023。

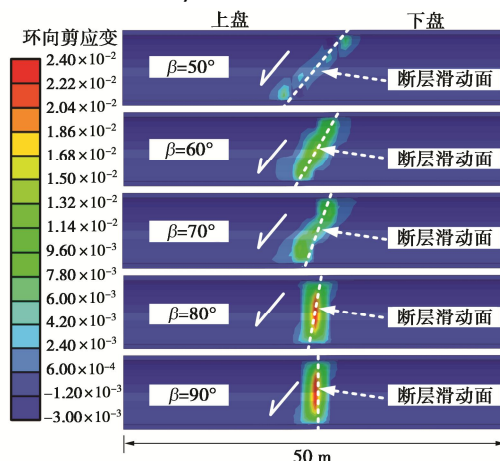


图16 不同倾角下隧道环向剪应变云图

Fig. 16 Hoop shear strain contours of tunnel at different dip angles

图17为不同 $\beta$ 下OLDT沿隧道轴向的变化规律。隧道损伤区域随 $\beta$ 的变化保持稳定, 但不同损伤状态所占比重有明显的变化。在 $\beta=50^\circ$ ,  $60^\circ$ 和 $70^\circ$ 工况时隧道损伤处于DS3—DS4状态洞段的长度要明显超出 $\beta=80^\circ$ 和 $90^\circ$ 工况。此外, 在 $\beta$ 增大至 $80^\circ$ 后,



DS1—DS2 损伤状态占据隧道损伤区域的主体。总体上看, 随 $\beta$ 增加, 隧道损伤程度表现为减弱趋势。

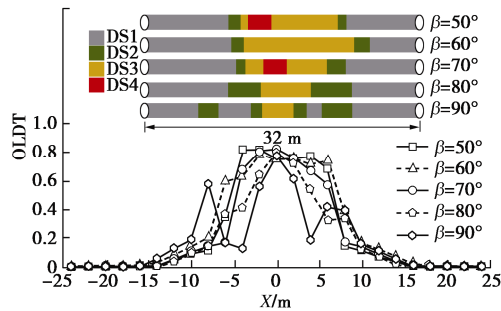


图 17 不同倾角下 OLD T 变化规律

Fig. 17 Distribution of OLD T at different dip angles

## 5 结 论

通过有限元结合断裂力学中黏性界面模型的方法模拟正断型断裂过程, 以滇中引水工程香炉山隧洞为实例, 建立断层—隧道三维数值分析模型, 探讨了断层错动量和倾角两个因素对正断层错动下隧道衬砌响应的影响规律, 并对隧道损伤状态进行初步评估, 得出以下主要结论:

(1) 正断型断裂在地表形成陡坎主要有两种机制: 弯曲陡坎和断裂陡坎。两类陡坎的形成均在近地表区域伴随有倒三角型的塑性剪切带。破碎带围岩在上盘中的破坏程度要明显高于下盘, 且由断层滑动面向两侧呈递减趋势。

(2) 隧道衬砌的轴向拉应变和环向剪应变均随断层错动量的增加而呈递增趋势, 且在衬砌与断层滑动面相交位置达到最大; 随倾角的增加, 隧道衬砌的轴向拉应变呈递减趋势且分布范围更为集中, 而环向剪应变则呈递增趋势且最大值出现在衬砌拱腰。

(3) 基于 OLD T 建立隧道结构安全评价的 4 级破坏标准, 发现不同断层错动量和倾角下隧道衬砌损伤范围不变, 但损伤程度不同, 具体表现为当断层错动量达到 10.0 cm 时, 隧道衬砌在断层滑动面周围共 8 m 长范围内损伤状态达到 DS4; 随倾角的增加, 隧道衬砌损伤处于 DS3—DS4 状态洞段的长度要明显减小, 表明较小的断层倾角对结构安全更为不利。

(4) 通过隧道竖轴的直径变形率对衬砌横断面变形评估可知, 在不同断层错动量和倾角下, 隧道横断面在正断层错动下均呈压缩变形状态, 截面由圆形逐步变为椭圆形。

## 参考文献:

[1] 洪开荣. 中国隧道及地下工程近两年的发展与展望[J]. 隧道建设, 2017, 37(2): 123 - 134. (HONG Kai-rong. Development and prospects of tunnels and underground

works in china in recent two years[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(2): 123 - 134. (in Chinese))

- [2] 钮新强, 张传健. 复杂地质条件下跨流域调水超长深埋隧洞建设需研究的关键技术问题[J]. 隧道建设, 2019, 39(4): 523 - 536. (NIU Xin-qiang, ZHANG Chuan-jian. Some key technical issues on construction of ultra-long deep-buried water conveyance tunnel under complex geological conditions[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(4): 523 - 536. (in Chinese))
- [3] 何 川, 李 林, 张 景, 等. 隧道穿越断层破碎带震害机理研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 427 - 434. (HE Chuan, LI Lin, ZHANG Jing, et al. Seismic damage mechanism of tunnels through fault zones[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3): 427 - 434. (in Chinese))
- [4] 崔光耀, 王明年, 于 丽, 等. 汶川地震断层破碎带段隧道结构震害分析及震害机理研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(11): 122 - 127. (CUI Guang-yao, WANG Ming-nian, YU Li, et al. Study on the characteristics and mechanism of seismic damage for tunnel structures on fault rupture zone in Wenchuan seismic disastrous area[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(11): 122 - 127. (in Chinese))
- [5] 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.
- [6] CAI Q P, PENG J M, NG C W W, et al. Centrifuge and numerical modelling of tunnel intersected by normal fault rupture in sand[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 111: 137 - 146.
- [7] 王道远, 崔光耀, 袁金秀, 等. 断裂黏滑错动下隧道减错措施作用效果模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(8): 1515 - 1521. (WANG Dao-yuan, CUI Guang-yao, YUAN Jin-xiu, et al. Model tests on effect of dislocation reducing measures of stick-slip fault of tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(8): 1515 - 1521. (in Chinese))
- [8] 孙 飞, 张志强, 易志伟. 正断层黏滑错动对地铁隧道结构影响的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3037 - 3044, 3053. (SUN Fei, ZHANG Zhi-qiang, YI Zhi-wei. Model experimental study on the influence of normal fault with stick-slip dislocation on the structure of subway tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(9): 3037 - 3044, 3053. (in Chinese))



- [9] SABAGH M, GHALANDARZADEH A. Centrifugal modeling of continuous shallow tunnels at active normal faults intersection[J]. *Transportation Geotechnics*, 2020, **22**: 100325.
- [10] YAN G M, SHEN Y S, GAO B, et al. Damage evolution of tunnel lining with steel reinforced rubber joints under normal faulting: an experimental and numerical investigation[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, **97**: 103223.
- [11] 刘学增, 林亮伦, 桑运龙. 逆断层粘滑错动对公路隧道的影响[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2012, **40**(7): 1008 - 1014. (LIU Xue-zeng, LIN Liang-lun, SANG Yun-long. Effect of thrust fault stick-slip rupture on road tunnel[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2012, **40**(7): 1008 - 1014. (in Chinese))
- [12] CHANG Y Y, LEE C J, HUANG W C, et al. Evolution of the surface deformation profile and subsurface distortion zone during reverse faulting through overburden sand[J]. *Engineering Geology*, 2015, **184**: 52 - 70.
- [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] 焦鹏飞, 来弘鹏. 不同倾角逆断层错动对隧道结构影响理论分析[J]. *土木工程学报*, 2019, **52**(2): 106 - 117. (JIAO Peng-fei, LAI Hong-peng. Theoretical analysis on the influence of different dip angle reverse faults' dislocation on tunnel structure[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, **52**(2): 106 - 117. (in Chinese))
- [15] ZHAO K, CHEN W Z, YANG D S, et al. Mechanical tests and engineering applicability of fibre plastic concrete used in tunnel design in active fault zones[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, **88**: 200 - 208.
- [16] ZAHERI M, RANJBARNIA M, DIAS D, et al. Performance of segmental and shotcrete linings in shallow tunnels crossing a transverse strike-slip faulting[J]. *Transportation Geotechnics*, 2020, **23**: 100333.
- [17] FOSSEN H. *Structural Geology*[M]. New York: Cambridge University Press, 2010.
- [18] ZHANG Z Q, CHEN F F, LI N, et al. Influence of fault on the surrounding rock stability of a tunnel: location and thickness[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, **61**: 1 - 11.
- [19] 宋佳佳, 孙建孟, 王敏, 等. 断层内部结构研究进展[J]. *地球物理学进展*, 2018, **33**(5): 1956 - 1966. (SONG Jia-jia, SUN Jian-meng, WANG Min, et al. Research progress in the internal structure of the fault[J]. *Progress in Geophysics*, 2018, **33**(5): 1956 - 1966. (in Chinese))
- [20] HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, **34**(8): 1165 - 1186.
- [21] 中国地震局地壳应力研究所. 2008年汶川8.0级地震科学考察图集[M]. 北京: 地震出版社, 2009. (The Institute of Crustal Dynamics, CEA. Scientific Investigation Album of the Wenchuan Ms 8.0 Earthquake of 2008[M]. Beijing: Seismological Press, 2009. (in Chinese))
- [22] Code of Practice for Temporary Works Procedures and the Permissible Stress Design of Falsework: BS5975—2008[S]. 2008.
- [23] 公路隧道设计细则: JTG/T D70—2010[S]. 2010. (Guidelines for Design of Highway Tunnel: JTG/T D70—2010[S]. 2010. (in Chinese))
- [24] 地下结构抗震设计标准: GB/T 51336—2018[S]. 2019. (Standard for Seismic Design of Underground Structures: GB/T 51336—2018[S]. 2019. (in Chinese))
- [25] CHEN Z Y, WEI J S. Correlation between ground motion parameters and lining damage indices for mountain tunnels[J]. *Natural Hazards*, 2013, **65**: 1683 - 1702.
- [26] WANG Z Z, ZHANG Z. Seismic damage classification and risk assessment of mountain tunnels with a validation for the 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2013, **45**: 45 - 55.
- [27] Federal Emergency Management Agency. Multi-Hazard Loss Estimation Methodology: Earthquake Model HAZUS-MH 2.1 User Manual[R]. Washington D C: FEMA Mitigation Division, 2010.
- [28] 刘国庆, 肖明, 陈俊涛. 基于增量动力分析的隧洞结构抗震性能评估[J]. *工程科学与技术*, 2019, **51**(3): 92 - 100. (LIU Guo-qing, XIAO Ming, CHEN Jun-tao. Seismic performance assessment of tunnel structure based on incremental dynamic analysis[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2019, **51**(3): 92 - 100. (in Chinese))