深埋隧道穿越富水断层破碎带突水突泥灾变演化规律研究

郭延辉[1*]，李顺银[1]，严航[2]，郑磊[3]，李小强[2]，焦昊[3]

1. 昆明理工大学公共安全与应急管理学院，昆明 650093；
2. 云南交投公路建设第三工程有限公司，昆明 650103；
3. 云南建投第六建设有限公司，云南 玉溪 653199

* 通信作者，E-mail：guoyanhui0818@kust.edu.cn

2024-04-15 收稿；2024-06-16 修回；2024-06-17 接受

基金项目：云南省基础研究计划重点项目(202501AS070107)；云南省基础研究计划面上项目(202301AT070454)；云南省兴滇英才支持计划青年人才专项(KKXX202467043)；国家大学生创新创业训练计划项目(2021106740085；2021106740086)

中图分类号：U45；TU94　　文章编号：2096-8523(2026)01-0160-11　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240160

摘　要：富水断层破碎带的存在对隧道突水突泥的发生有着较大的影响。为研究深埋隧道穿越富水断层破碎带时引起的突水突泥灾变演化规律，基于筒仓模型和极限平衡理论，考虑断层破碎带的宽度、长度和倾角，建立隧道穿越富水断层破碎带的隔水岩体力学模型，推导隔水岩体最小安全厚度的力学判据；通过 MIDAS GTS NX 数值模拟仿真，建立三维流固耦合数值模型，分析隧道开挖至断层破碎带内部时的位移、应力、孔隙水压力和渗流流速演化规律。结果表明：隔水岩体的最小安全厚度主要与断层破碎带长度、宽度、倾角、隧道埋深以及隔水岩体自身的力学性质有关；隧道开挖至断层后，其内部位移显著增大，最大主应力和最小主应力都存在明显的突变；低孔隙水压力区范围显著增大，孔隙水压力表现出先缓慢减小，后急剧减小，再逐渐趋于稳定的变化趋势；在断层内部出现了流速高值区，整个模型流速出现增大趋势，开挖过程中掌子面的最大流速整体呈现先增大后减小的变化趋势。该研究可为断层破碎带突水突泥灾害的预防提供相关参考。

关键词：深埋隧道；突水突泥；断层破碎带；隔水岩体；MIDAS GTS NX

随着我国“一带一路”倡议的全面推进，西部地区逐渐成为基础工程建设的关键区域。滇中引水工程和川藏铁路等一批国家重大工程正在持续建设中，众多水利、交通等隧道工程建设也正加速推进[1-3]。尽管我国在隧道建设领域取得了显著成就，但由于西南山区复杂的工程、水文地质条件等因素，隧道建设仍面临严峻的灾害挑战。在断层破碎带等不良地质区域进行隧道施工时，时常发生突水突泥灾害，并导致严重的经济损失和人员伤亡[4-6]。因此，深入研究隧道施工过程中富水断层突水突泥灾害的灾变演化规律具有重要意义。

国内外学者运用不同方法对隧道突水突泥的灾变演化规律和机理开展了大量研究，并取得了诸多成果。在理论分析方面，众多研究表明隧道开挖临近致灾构造时，掌子面与构造之间的隔水岩体在外部扰动(如：施工、地震等)和内部高压水的持续作用下，岩体会出现裂隙渐进破坏的过程[7-8]。孟凡树等[9]根据筒仓理论和极限平衡理论，推导了富水断层破碎带突水突泥的力学判据，并分析了断层破碎带宽度对防突岩盘最小安全厚度的影响。FU 等[10]结合 Sheorey 模型，基于极限平衡法，构建了隧道轴线与断层正交的防突水模型，推导出了防突安全厚度计算公式。袁东等[11]基于断裂力学与翼裂纹模型，研究了隧道穿越富水断层时开挖扰动下隔水岩体的水力劈裂机理，提出了最小抗劈裂厚度计算方法。张延杰等[12-13]以滇中引水工程为背景，通过案例统计

著录信息：郭延辉，李顺银，严航，等. 深埋隧道穿越富水断层破碎带突水突泥灾变演化规律研究[J]. 地质科技通报，2026，45(1)：160-170.
GUO Yanhui, LI Shunyin, YAN Hang, et al. Evolution law of water and mud inrush disaster in deep-buried tunnel crossing water-rich fault fracture zone[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2026, 45(1): 160-170.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

与数值模拟揭示了砂化白云岩隧洞突水涌砂的灾变机制，确定了防突岩盘安全厚度临界判据。在模型实验方面，张庆松等[14-15]、王德明等[16]和 GUO 等[17]以断层破碎带为研究对象，研制出了大型三维实验系统，模拟了隧道围岩开挖时部分特征参数的变化规律。此外，部分学者[18-20]基于相似理论，研制出了新型流固耦合相似材料，能够真实反映断层隧道突水突泥灾变过程中各物理场响应规律。在数值模拟方面，杨建辉等[21]采用 MatDEM 模型，考虑了地下水的影响，开展了富水断层破碎带施工过程中围岩失稳塌方的内在机理研究。ZHONG 等[22]通过 Abaqus 软件模拟了穿越多条活动走滑断层的三维隧洞模型，考虑了断层交错角度、破碎带岩体力学性质等因素，研究了隧洞在断层运动下的结构完整性和适用性。ZHOU 等[23]和商成顺[24]建立了基于粗粒化理论的 DEM-CFD 流固耦合模拟方法，实现了工程尺度的断层突水突泥灾变演化过程的模拟。ZHANG 等[25]、XIE 等[26]、王美霞[27]、JIANG 等[28]等通过建立不同的耦合计算分析模型，分别对隧道突水突泥演化规律和发生机理进行了数值模拟分析。

综上所述，针对断层破碎带引起的突水突泥的机理和演化规律的研究已取得了大量成果[29-31]，但是，目前大多数研究主要以三维物理模型试验和数值模拟为主，缺乏对水力耦合作用下突水突泥灾害机理的深入研究。本研究以大瑞铁路–大柱山隧道为工程依托，基于筒仓模型和极限平衡理论，考虑断层破碎带的宽度、长度和倾角，对隧道穿越富水断层破碎带时隔水岩体的最小安全厚度进行推导，通过结合 MIDAS GTS NX 数值模拟仿真，建立隧道穿越断层破碎带的流固耦合数值模型，对深埋隧道富水断层的突水突泥灾变演化规律进行研究和分析，研究结果可为了解断层突水的机理以及制定预防措施提供重要参考。

1　隧道工程概况

大柱山隧道位于云南省保山市，穿越著名的横断山脉南段，隧道地理位置如图 1 所示。隧道起讫里程 DK110+500 ~ DK125+008，其中单洞主洞长 13 803 m，总长 14 484 m。隧道最大埋深 955 m，大跨度区域长度 680 m。隧道所在区域地质环境复杂，断裂构造发育，穿越了燕子窝、水寨、五里哨等 6 条断层以及金家山向斜、杨家山倒转背斜等 3 条皱褶构造，岩溶发育地段 5 处，隧道纵剖面图如图 2 所示。大柱山隧道工程地质和水文地质条件复杂，具有“三高四活跃”的特点，施工中常遇到突水突泥等地质灾害，特别是在有强岩溶水以及断层带，易产生较大规模的突水突泥段（3 210 m，最大涌水量为 120 000 m^3/d）。

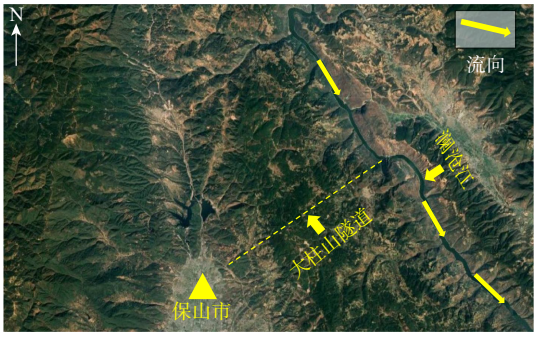


图 1　大柱山隧道地理位置示意图

Fig. 1　Geographical location map of Dazhu Mountain tunnel

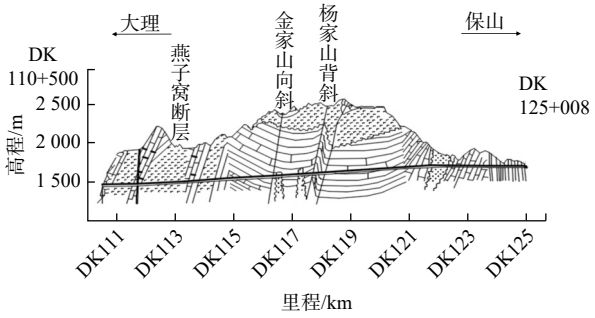


图 2　大柱山隧道纵剖面图

Fig. 2　Longitudinal profile of Dazhu Mountain tunnel

2　富水断层破碎带隔水岩体最小安全厚度分析

在穿越高压富水断层破碎带的深埋隧道建设工程中，发生突水突泥灾害的风险较高，而随着隧道开挖扰动的持续作用，隔水岩体的厚度会逐渐减小，当超过某一临界值时，便会引发突水突泥灾害[32]。因此，隔水岩体最小安全厚度的确定是极其重要的问题。

以大柱山隧道穿越的某断层为背景，结合极限平衡理论，对该富水断层破碎带和隔水岩体分别进行受力分析，得出断层破碎带对附近隧道区域产生的侧向地应力，从而进一步推导出隔水岩体的最小安全厚度计算判据。

计算设定假设条件如下[33-34]：

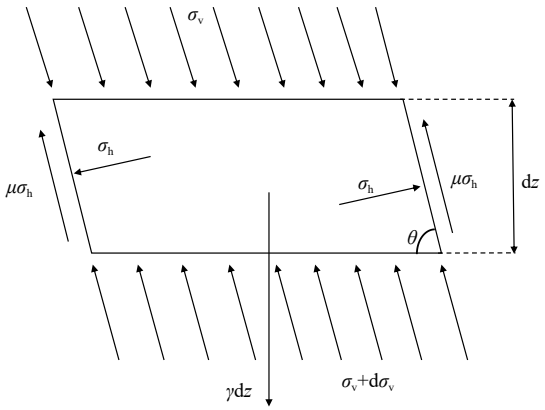
① 隧道与断层破碎带之间的隔水岩盘设为连续均匀的各同向性弹性体，且符合小变形理论；

② 富水断层破碎带对临界掌子面的作用力简化为水压力和侧向地应力的分别作用；

③ 针对断层倾角较大、规模较大的断层破碎带进行分析，并忽略水对隔水岩体的水合作用影响。

2.1　断层附近隧道区域的侧向地应力求解

基于筒仓模型的求解思路[9]，将该富水断层破碎带通过微元法进行处理，切取出厚度为 dz 的薄层微元体进行受力分析，如图 3 所示。该富水断层具有一定的长度、宽度和倾角，在对其进行受力分析后求解出断层附近隧道区域的地应力。



μ. 摩擦系数；γ. 断层破碎带内的充填介质的容重；θ. 断层倾角；σ_h. 断层附近隧道区域的侧向地应力；σ_v. 断层附近隧道区域的垂直地应力；dz. 断层薄层厚度；下同

图 3　断层破碎带薄层单元力学模型

Fig. 3　Mechanical model of thin layer element in fault fracture zone

该断层薄层单元体受到的作用力为：单元体自身的重力 γdz，作用在薄层单元体上部和下部的竖向力（σ_v 和 σ_v+dσ_v），作用在薄层单元体左右两侧的摩擦阻力（$\mu\sigma_h$），作用在薄层单元体左右两侧的侧向地应力（σ_h）。根据图 3，可得该薄层单元体的力学平衡关系式为：

$$\begin{aligned}&(\sigma_v+\mathrm{d}\sigma_v)bl-\sigma_v bl+2\mu(\sigma_h+0.5\gamma b\cos\theta)\\&(b+l)\mathrm{d}z-\gamma\sin\theta bl\mathrm{d}z=0\end{aligned},\quad(1)$$

整理后，得：

$$\begin{aligned}&\mathrm{d}\sigma_v bl+2\mu(\sigma_h+0.5\gamma b\cos\theta)(b+l)\mathrm{d}z\\&-\gamma\sin\theta bl\mathrm{d}z=0\end{aligned},\quad(2)$$

式中：b 为断层破碎带宽度；l 为断层破碎带长度；μ 为摩擦系数；γ 为断层破碎带内的充填介质的容重；θ 为断层倾角；σ_h 为断层附近隧道区域的侧向地应力；σ_v 为断层附近隧道区域的垂直地应力；z 为隧道埋深。σ_h 和 σ_v 二者满足：

$$\frac{\sigma_h}{\sigma_v}=K,\quad(3)$$

式中：K 为侧压力系数。

将式(3)代入式(2)中，得：

$$\mathrm{d}z=\frac{bl}{[\gamma\sin\theta\cdot bl-2\mu(K\sigma_v+0.5\gamma b\cos\theta)(b+l)]}\mathrm{d}\sigma_v。\quad(4)$$

对式(4)求积分，并代入初始条件：z=0，σ_v=0，计算可得：

$$\sigma_v=\frac{\gamma b(\frac{l\sin\theta}{b+l}-\mu\cos\theta)}{2\mu K}\left[1-\exp(-\frac{2(b+l)\mu Kz}{bl})\right],\quad(5)$$

根据式(3)，断层附近隧道处侧向地应力 σ_h：

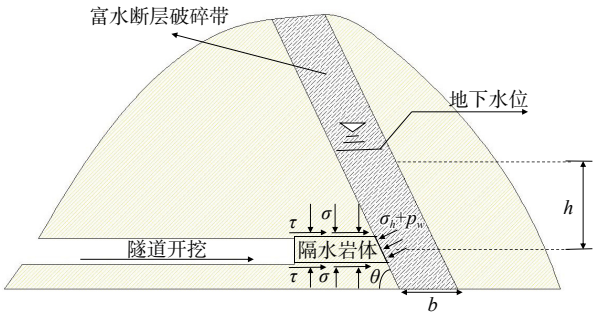
$$\sigma_h=\frac{\gamma b(\frac{l\sin\theta}{b+l}-\mu\cos\theta)}{2\mu}\left[1-\exp(-\frac{2(b+l)\mu Kz}{bl})\right]。\quad(6)$$

2.2　隔水岩体最小安全厚度的计算

隧道穿越富水断层时，可以将隔水岩体考虑为岩墙模型[35]。图 4 为隧道穿越断层破碎带的隔水岩体力学模型，将隔水岩体所受各力向隧道的水平方向进行受力分析，得到如下平衡方程：

$$(\sigma_h+p_w)A\sin\theta=\frac{\pi}{4}D^2(\sigma_h+p_w)=\pi DS\tau,\quad(7)$$

式中：D 为隧道的直径或等效直径；p_w 为垂直于断层与隔水岩体接触面的地下水压力；S 为隧道掌子面和断层破碎带之间隔水岩体的厚度；τ 为隔水岩体和围岩接触面之间产生的剪应力；A 为断层与隔水岩体接触面的面积。



S. 隧道掌子面和断层破碎带之间隔水岩体的厚度；p_w. 垂直于断层与隔水岩体接触面的地下水压力；τ. 隔水岩体和围岩接触面之间产生的剪应力；σ. 作用于隔水岩体的竖向应力；h. 地下水位到隧道轴线中心的垂直距离

图 4　隧道穿越断层破碎带的隔水岩体力学模型

Fig. 4　Mechanical model of impermeable rock mass for tunnels crossing fault fracture zone

根据《水工隧洞设计规范》[36]，垂直于断层与隔水岩体接触面的地下水压力 p_w 可按式(8)估算：

$$p_w=\beta\gamma_w h,\quad(8)$$

式中：β 为水压力折减系数，围岩越破碎，其取值越大；γ_w 为水的重度；h 为地下水位到隧道轴线中心的垂直距离。

按摩尔–库仑强度准则，隔水岩体的受力分析：

$$\sigma = \gamma' H, \tag{9}$$

$$\tau = \sigma\tan\varphi + c = \gamma' H\tan\varphi + c, \tag{10}$$

根据力学平衡方程计算得出该模型下隔水岩体最小安全厚度(S)计算公式:

$$S = \frac{\sigma_h + p_w}{4\tau}D = \frac{\gamma b(\frac{l\sin\theta}{b+l} - \mu\cos\theta)}{2\mu}\left[1-\exp(-\frac{2(b+l)\mu Kz}{bl})\right] + \beta\gamma_w h \over 4(\gamma' H\tan\varphi + c) D, \tag{11}$$

式中: γ'为隔水岩体上覆岩层的容重; H 为隔水岩体上覆岩层的厚度; φ 为隔水岩体的饱和内摩擦角; c 为隔水岩体的饱和黏聚力; u 为摩擦系数。

由式(11)可知, 在隧道穿越富水断层破碎带时, 隔水岩体的最小安全厚度主要与断层破碎带长度、宽度、倾角、隧道埋深以及隔水岩体本身的力学性质有关。

2.3 大柱山隧道−某断层工程实例分析

以大柱山隧道穿越的某断层为研究对象, 实际开挖揭露的该断层破碎带的宽度 b=156 m(包括断层核心区及断层两端的影响带), 倾角 θ=75°, 隧道埋深 z=450 m[37]。通过参考相关工程地质资料确认了计算公式中所需的参数取值, 其中, 断层破碎带的长度 l=466 m, 断层内部充填介质的容重 γ=19.5 kN/m^3, 隧道等效直径 D=12.4 m, 隔水岩体的饱和内摩擦角和饱和黏聚力分别为 φ=23.1°, c=300 kPa, 摩擦系数 μ=0.1, 水压力折减系数 β=0.95, 水的重度 γ_w=10 kN/m^3, 隔水岩体上覆岩层的容重 γ'=20.1 kN/m^3, 隔水岩体上覆岩层的厚度 H=450 m, 地下水位面到隧道轴线中心的竖向距离 h=415 m, 侧压力系数 K=1.2。

由于开挖扰动会引起掌子面前方岩体的损伤破坏, 在计算最小安全距离时应考虑开挖扰动造成的影响。以爆破开挖方式为例, 岩体受爆破开挖扰动损伤后阻水能力会大幅度下降, 可视为无阻水能力岩带, 即称为爆破开挖扰动损伤带。在施工过程中, 爆炸应力波对隧道掌子面前方岩体的扰动深度不超过 1.50 m, 因此, 本研究在计算分析时选择爆破开挖扰动损伤带的长度 S_c=1.50 m[38]。

根据式(11)计算出隧道在临近该断层时隔水岩体的最小安全厚度: S=7.71 m, 考虑开挖扰动影响后, 隔水岩体的理论最小安全距离为: S_c+S=1.50+7.71=9.21 m。

由以上分析可知, 在隧道施工过程中, 遇到高压富水断层破碎带时, 隧道掌子面前方的隔水岩体最小安全厚度一般约为 9.21 m。即当实际施工过程中的距离接近 9 m 时, 应及时采取相应的措施来防止突水突泥灾害的发生。

3 数值模型建立及参数选取

3.1 数值模拟方案的确定

根据 2.2 节推导出的隔水岩体最小安全厚度计算公式, 在隧道穿越富水断层破碎带时, 隔水岩体的最小安全厚度主要与断层破碎带长度、宽度、倾角等有关。因此, 结合隧道与断层的空间位置, 以大柱山隧道穿越的某断层为背景, 设计了隧道穿越断层开挖模拟方案, 如图 5 所示, 其中, 断层倾角为 75°。

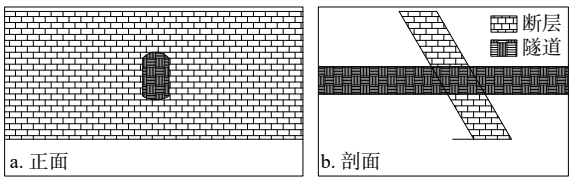


图 5 数值模拟方案示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the numerical simulation scheme

3.2 模型的建立

考虑到隧道开挖半径和渗流场的影响, 建立的整体三维模型如图 6 所示。其中, 隧道采用全断面法开挖, 开挖进尺为 5 m, 当开挖至富水断层时改为 1 m。模型中隧道开挖高度为 9 m、开挖宽度为 6 m。计算时以自重应力场为主, 模型中各单元均采用实体单元, 计算采用莫尔−库仑(Mohr-Coulomb)准则[39-40]。模型的边界条件为底部固定约束, 四周法向约束, 为模拟地下水可能产生的影响, 在模型的左边界、右边界上施加节点水头, 在隧道开挖每一循环形成的开挖面处设置渗流边界。由于建立的模型高度为 120 m,

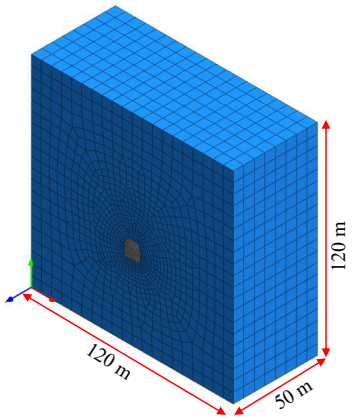


图 6 模型整体图

Fig. 6 Overall view of the model

能够模拟的埋深为 60 m，而模型需要模拟的实际隧道埋深为 500 m，因此计算时忽略了未能模拟埋深部分岩体的构造应力，只考虑该部分岩体的自重应力，其值为 8 844 kPa。将 8 844 kPa 的自重应力转换为均布压力施加于模型顶部，代替该部分岩体用于模拟计算。围岩和断层材料参数如表 1 所示。

表 1　模型计算参数

Table 1　Calculation parameters of the model

材料类型	容重/（kN·m^{-3}）	饱和容重/（kN·m^{-3}）	弹性模量/GPa	泊松比	内摩擦角/（°）	黏聚力/MPa	渗透系数/（cm·s^{-1}）
Ⅳ级围岩	20.1	21.5	4.11	0.32	23.1	0.3	4.13×10^{-4}
断层	19.5	18	0.9	0.3	19	0.05	4.02×10^{-3}

4　穿越断层数值模拟结果分析

4.1　位移场演化规律分析

图 7a，b 分别为隧道开挖至断层内部时围岩的竖向、水平位移云图。可以看出，当隧道开挖至断层破碎带内部后，断层处的位移显著增大，此阶段整个模型的最大竖向、水平位移均发生在断层内部的隧道开挖周围，分别为 48.332，45.636 mm。分析可知，隧道开挖至断层后内部位移显著增大，因此开挖时要加强对该部位的监测，防止突水突泥、塌方等灾害的发生。

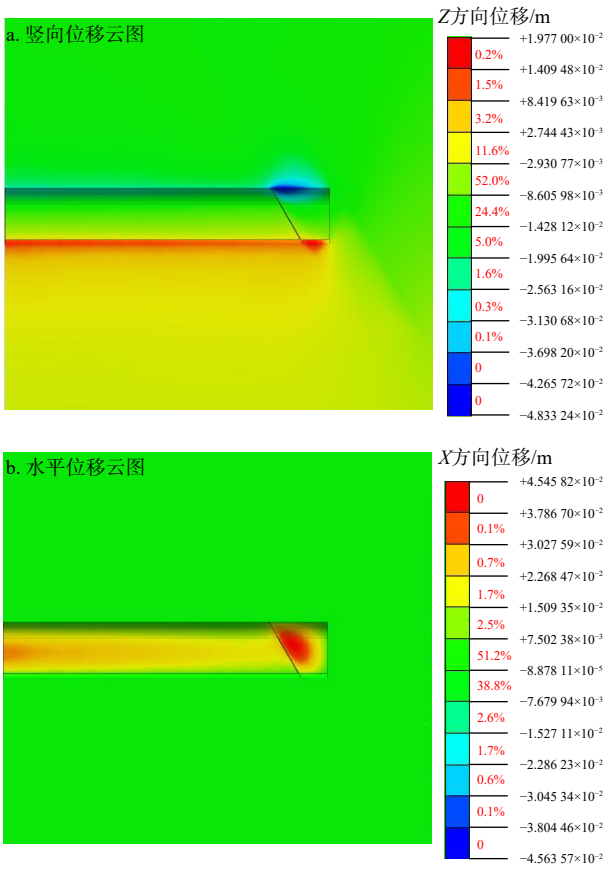


图 7　隧道开挖至断层时围岩的位移云图（图例中的百分比为该段数值的占比，下同）

Fig. 7　Displacement cloud map of surrounding rock during tunnel excavation to the fault zone

对关键点的位移进行监测能有效起到预防围岩内部位移过大而发生突水突泥灾害的作用。水平、竖向位移监测点分别位于 Y=53 m 剖面（隧道开挖至断层处）的拱顶、右拱圈、右边墙、拱底位置，各监测点位移变化规律如图 8a，b 所示。可以看出，随着开挖步数的增大，各监测断面拱顶、右拱圈、右边墙及拱底监测点处的竖向位移整体表现为逐渐增大趋势，拱顶和拱底的水平位移无明显变化，而右拱圈、右边墙水平位移逐渐增大。分析可知，监测断面揭露后周围围岩位移会出现急剧增大现象，断层已开挖部位的位移会随着开挖的进行持续大幅度增加，当开挖步为 27 时，该监测断面右边墙水平位移过大，该部位可能出现失稳，引发隧道发生突水突泥灾害。

4.2　应力场演化规律分析

图 9a，b 分别为隧道开挖至断层时围岩最大、最

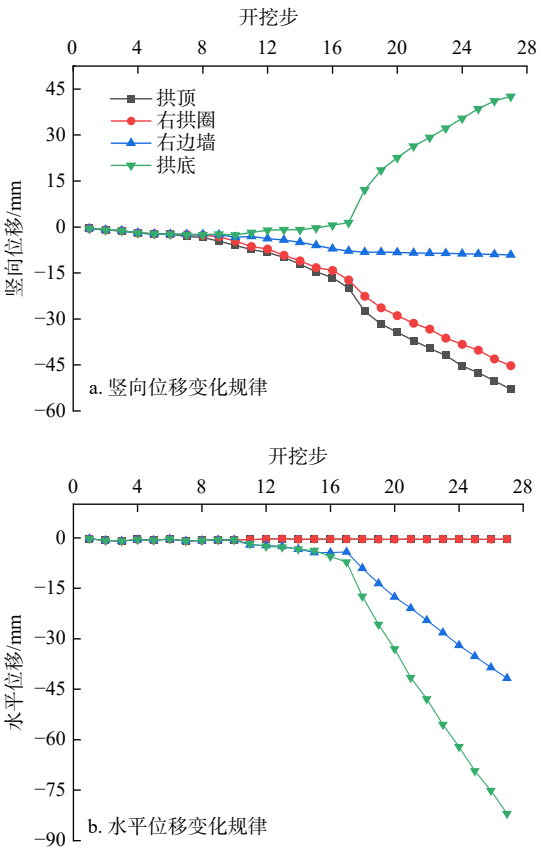


图 8　监测点位移变化规律

Fig. 8　Displacement variation patterns at monitoring points

小主应力云图。由图 9a 可知，在该开挖阶段围岩最大主应力均为压应力，最大主应力较大值集中区域位于隧道拱底和拱圈，最大值为 42.242 MPa，说明随着隧道开挖长度的增加，围岩的最大主应力极大值将增大，开挖时要加强对围岩应力值较大部位的监测以及做好必要的加固措施，防止应力过大造成围岩破坏，并诱发突水突泥灾害。由图 9b 可知，该开挖阶段围岩最小主应力以压应力为主，局部出现了拉应力，拉应力出现在隧道仰拱处，最大拉应力值为 2.668 MPa，开挖时拉应力过大可能会使围岩受拉破坏，容易引发灾害事故。

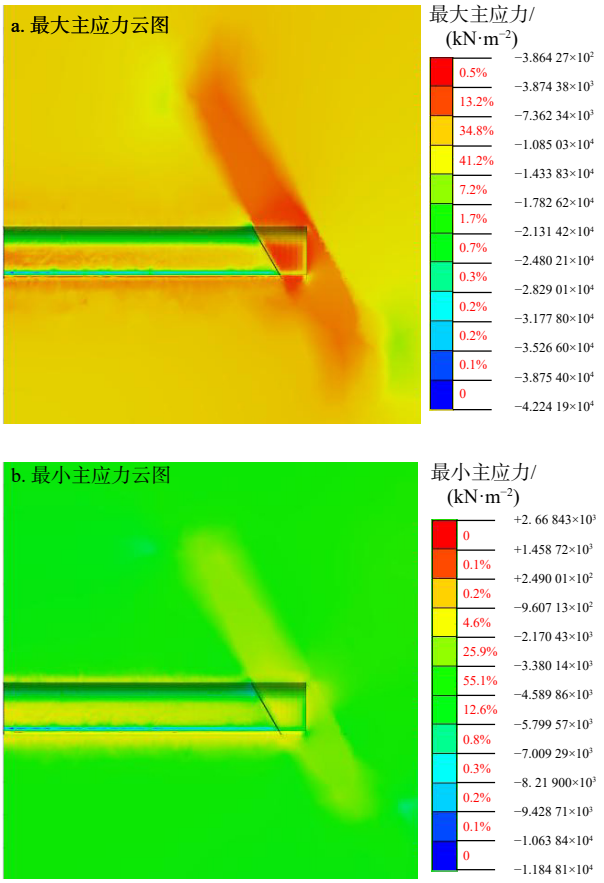


图 9　隧道开挖至断层时围岩的主应力云图

Fig. 9　Principal stress cloud map of surrounding rock when tunnel excavation to the fault zone

为详细了解隧道开挖过程中断层内部应力变化规律，选取 Y=53 m 剖面作为断层内部应力监测断面，同时选取断面上的拱顶单元、右拱圈单元、右边墙单元以及拱底单元作为监测单元，各监测单元最大、最小主应力变化规律如图 10a，b 所示。

由图可知，各监测单元最大主应力和最小主应力变化曲线都存在 2 个突变点，它们的横坐标值分别为 9，17，其对应隧道开挖至断层和开挖至监测断面这两种情况。从开挖步 1 ~ 9，各监测单元最大主

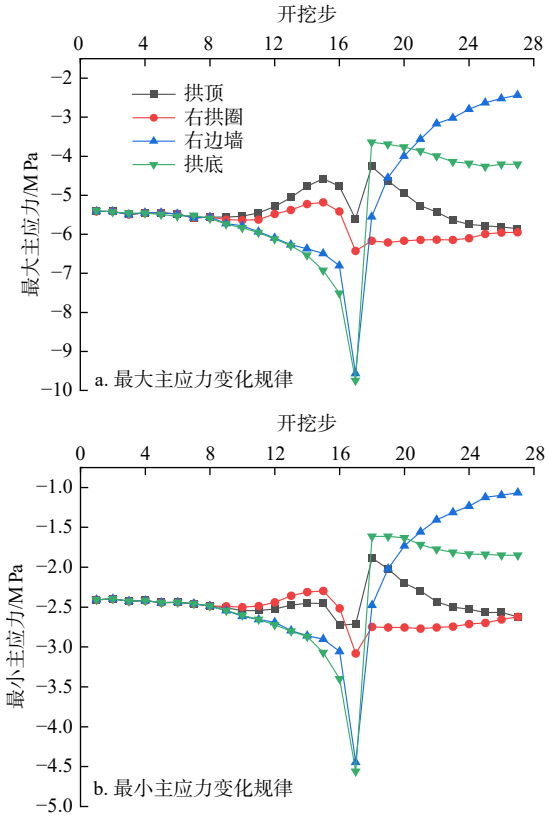


图 10　监测单元的主应力变化规律

Fig. 10　Variation law of principal stress for monitoring units

应力和最小主应力基本保持不变，说明此阶段隧道开挖对断层内部监测单元主应力的影响程度很小；从开挖步 10 ~ 17，即隧道开挖至断层内部时，拱顶、右拱圈、右边墙和拱底单元主应力出现了较大幅度变动；当开挖步为 18 时，即开挖掌子面通过监测断面，各监测单元应力急剧释放，主应力值出现陡降现象，监测单元应力降幅过大，可能演化为突水突泥、塌方等灾害；在随后的开挖过程中，各监测单元主应力值变化幅度逐渐减小，最后基本保持稳定状态。

4.3　孔隙水压力演化规律分析

选取隧道未开挖至断层、开挖至断层内部 2 个阶段来研究围岩孔隙水压力场演化规律，如图 11a，b 所示。由图可知，随着隧道的开挖，周围围岩中赋存的高压水流向开挖临空面，致使周围围岩中的孔隙水压力急剧减小，在隧道开挖周围形成“子弹头”形状的低孔隙水压力区，而距开挖区越远的围岩，孔隙水压力变化幅度也越小。当隧道开挖至断层后，断层内部形成的低孔隙水压力区范围显著增加，表明开挖使断层内部较大范围内的高压水进行了能量急剧释放，隧道可能发生突水灾害。分析表明，在隧道开挖过程中，隧道最可能发生突水突泥的阶段是隧道开挖至断层内部阶段，因此在断层段开挖前，应采

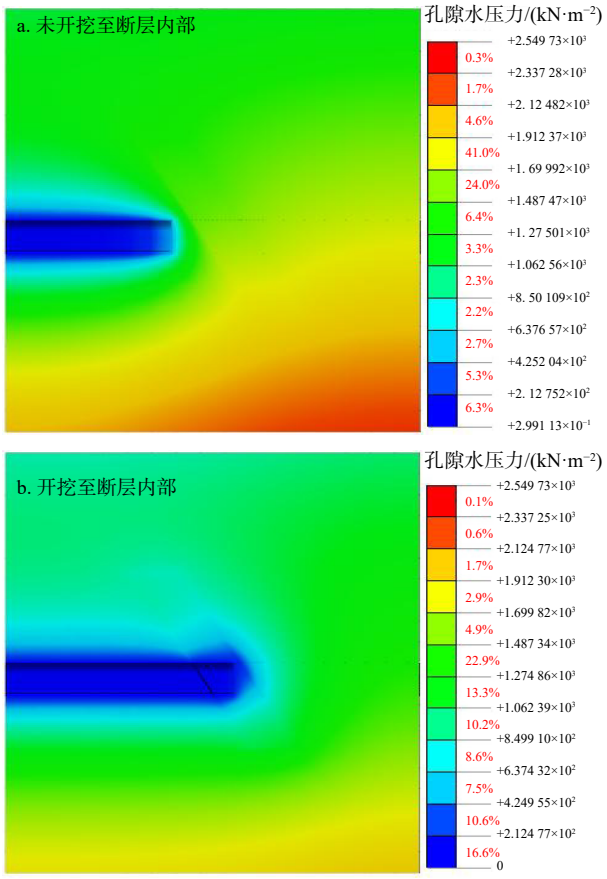


图 11　隧道未开挖至断层 (a)、开挖至断层 (b) 内部时的孔隙水压力分布云图

Fig. 11　Cloud map of pore water pressure during different excavation stages: Before (a) and after (b) reaching the fault zone

用更可靠的工程措施防止灾害的发生。

选取 Y=53 m 剖面的拱顶、右拱圈、右边墙、拱底位置点以及开挖掌子面作为孔隙水压力变化规律分析对象，其变化规律如图 12a, b 所示。

由图 12a 可知，隧道开挖过程中监测断面各监测点处整体的孔隙水压力随开挖步的增加呈现出先缓慢减小，再急剧减小，最后趋于稳定的变化趋势。由图 12b 可知，在整个开挖过程中，掌子面处的最小孔隙水压力经历了先减小−后增大−再减小−最后增大的变化。当开挖掌子面距断层较远时(开挖步 1 ~ 5)，掌子面孔隙水压由 653.780 kPa 下降至 355.350 kPa；当掌子面逐渐接近断层时(开挖步 6 ~ 9)，掌子面孔隙水压逐渐上升至 425.830 kPa；当掌子面进入断层后(开挖步 10 ~ 22)，掌子面孔隙水压力逐渐下降为 17.713 kPa；当隧道逐渐穿越断层时(开挖步 23 ~ 27)，掌子面孔隙水压力逐渐上升为 210.820 kPa。以上分析表明，隧道开挖至断层后，临近开挖面的围岩孔隙水压力会出现突变现象。

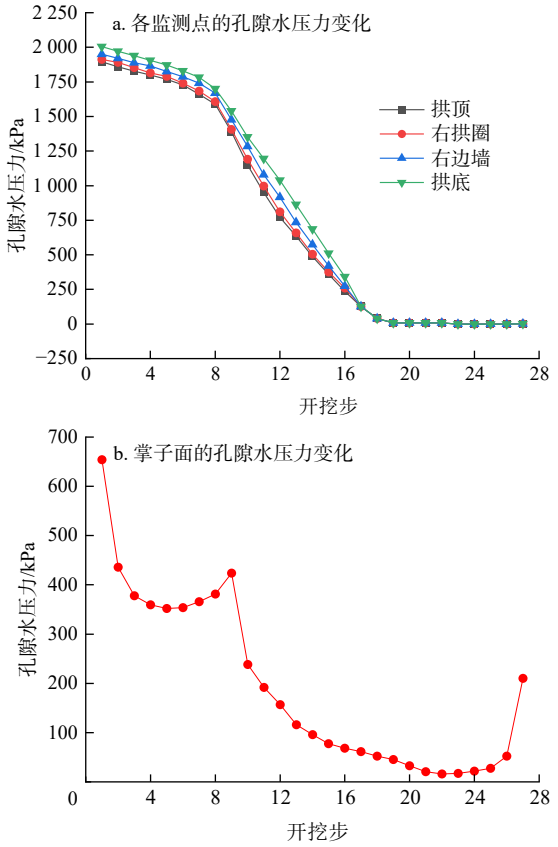


图 12　监测单元孔隙水压力变化

Fig. 12　Variation of pore water pressure in monitoring units

4.4　渗流流速对比分析

图 13a, b 分别为隧道未开挖至断层、开挖至断层内部时围岩的渗流流速分布图。由图可知，当未开挖至断层时，围岩渗流场高值区与断层内部高值区连通，最大流速位于掌子面顶部；当开挖至断层时，流速高值区出现在断层内部靠近开挖面区域，此时最大流速值急剧增大为 1.336×10^{-3} m/s，拱顶和拱圈位置极易出现突水突泥或塌方事故。

选取 Y=53 m 剖面的拱顶、右拱圈、右边墙和拱底位置处的单元以及开挖掌子面为研究对象，各监测单元的渗流流速变化规律如图 14a, b 所示。

由图 14a 可知，各监测单元流速随着开挖步的增加都表现为先增大后减小的变化趋势。从开挖步 1 ~ 8，各监测单元渗流流速呈小幅度增长；从开挖步 9 ~ 17，渗流流速出现急剧增大；从开挖步 18 ~ 27，监测单元流速逐渐减小，并逐渐趋于稳定。由图 14b 可知，隧道未开挖至断层时(开挖步 1 ~ 8)，掌子面最大流速基本保持不变；当隧道开挖至断层时(开挖步 9)，掌子面最大流速急剧增大，流速值为 2.901×10^{-3} m/s，而后随着隧道继续开挖(开挖步 10 ~ 27)，掌子面流速逐渐减小。

综上分析可知，当隧道开挖至断层时，掌子面渗

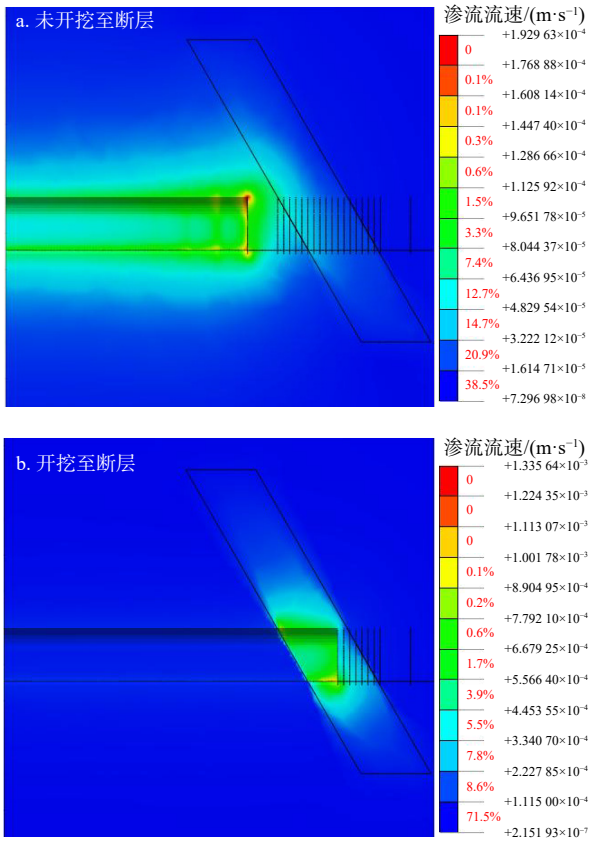


图 13　隧道未开挖至断层 (a)、开挖至断层 (b) 时的渗流流速云图

Fig. 13　Cloud map of seepage flow velocity during different excavation stages: Before (a) and after (b) reaching the fault zone

流流速达到最大值，断层内部流速也显著增大，该阶段极易形成突水突泥灾害，施工时应予以重视并做好相应防范措施。

5　结　论

（1）隧道穿越富水断层破碎带时隔水岩体的最小安全厚度主要与断层破碎带长度、宽度、倾角、隧道埋深以及隔水岩体自身的物理力学性质有关，在考虑开挖扰动的影响后，隔水岩体的最小安全距离为 9.21 m。当实际施工过程中的距离接近 9 m 时，应及时采取相应的措施来防止突水突泥灾害的发生。

（2）对于隧道开挖穿越富水断层破碎带，开挖至断层后内部位移显著增大。随着开挖步数的增大，监测断面的竖向位移逐渐增大，同时隧道右拱圈和右边墙的水平位移也显著增加，表明隧道周围围岩位移迅速扩大，可能引发围岩失稳和突水突泥灾害。从应力分布来看，开挖时隧道仰拱的局部位置会出

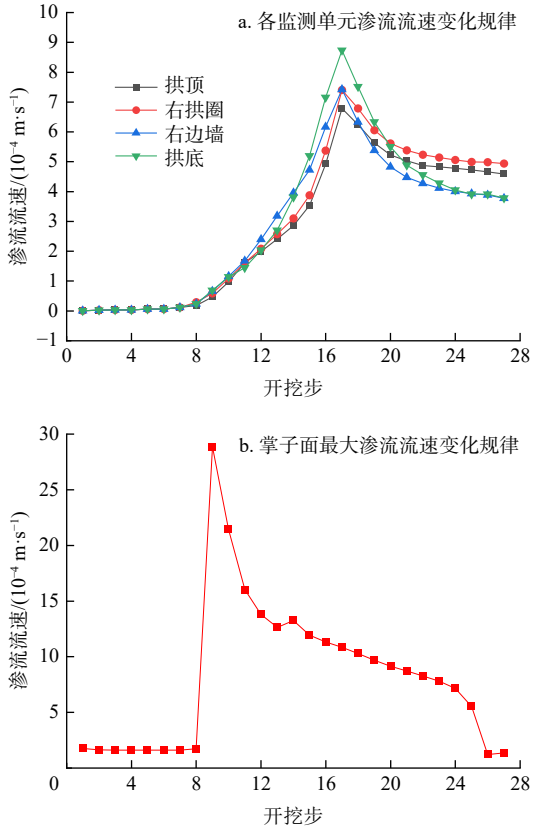


图 14　监测单元渗流流速变化规律

Fig. 14　Variation law of seepage velocity in monitoring units

现拉应力，由设置的各应力监测单元监测结果可知，各监测单元最大主应力和最小主应力变化曲线都存在 2 个明显的突变点。

（3）隧道在正常岩体段开挖形成的低孔隙水压力区形状似“子弹头”形，开挖至断层后低孔隙水压力区范围显著增大，各监测点的孔隙水压力表现出先缓慢减小–后急剧减小–再逐渐趋于稳定的变化趋势。当隧道开挖至断层后，断层内部出现流速高值区，掌子面渗流流速达到最大值，所以该阶段极易形成突水突泥灾害，施工时应做好相应防护措施。

所有作者声明无利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945-1956.
QIAN Q H. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1945-1956. (in Chinese with English abstract)

[2] 王梦恕. 中国铁路、隧道与地下空间发展概况 [J]. 隧道建设, 2010, 30(4): 351-364.
WANG M S. An overview of development of railways, tunnels and

underground works in China[J]. Tunnel Construction, 2010, 30(4): 351-364. (in Chinese with English abstract)

[3] 李利平, 成帅, 张延欢, 等. 地下工程安全建设面临的机遇与挑战 [J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2020, 39(4): 1-13.
LI L P, CHENG S, ZHANG Y H, et al. Opportunities and challenges of construction safety in underground engineering projects[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 39(4): 1-13. (in Chinese with English abstract)

[4] ZHONG Z L, SHEN Z, QIAO H Y, et al. Study on mechanism of water and mud inrush in deep-buried large-section tunnel crossing water-rich fault fracture zone[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2025, 58(1): 1147-1164.

[5] 李术才, 许振浩, 黄鑫, 等. 隧道突水突泥致灾构造分类、地质判识、孕灾模式与典型案例分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1041-1069.
LI S C, XU Z H, HUANG X, et al. Classification, geological identification, hazard mode and typical case studies of hazard-causing structures for water and mud inrush in tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1041-1069. (in Chinese with English abstract)

[6] XUE Y G, KONG F M, LI S C, et al. Water and mud inrush hazard in underground engineering: Genesis, evolution and prevention[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 114: 103987.

[7] 郭如军, 何发亮. 隧道施工突水致灾构造及其分类 [J]. 现代隧道技术, 2017, 54(1): 55-60.
GUO R J, HE F L. Geological structures inclined to hazards due to water burst in tunnel construction and their classifications[J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(1): 55-60. (in Chinese with English abstract)

[8] 罗雄文, 何发亮. 深长隧道突水致灾构造及其突水模式研究 [J]. 现代隧道技术, 2014, 51(1): 21-25.
LUO X W, HE F L. A study of geological structures inclined to disaster and models of water burst in deep-buried long tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(1): 21-25. (in Chinese with English abstract)

[9] 孟凡树, 王迎超, 焦庆磊, 等. 断层破碎带突水最小安全厚度的筒仓理论分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(2): 89-95.
MENG F S, WANG Y C, JIAO Q L, et al. Analysis of the minimum safe thickness of water inrush in fault fracture zone based on the silo theory[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(2): 89-95. (in Chinese with English abstract)

[10] FU H L, AN P T, CHENG G W, et al. Calculation of the safety thickness of water inrush with tunnel axis orthogonal to fault[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(11): 931.

[11] 袁东, 肖坤. 隧道穿越断层破碎带突水机制及岩墙最小安全厚度研究 [J]. 地质力学学报, 2025, 31(1): 80-90.
YUAN D, XIAO K. Water inrush mechanism and the minimum safety thickness of the rock wall of a tunnel crossing a fault fracture zone[J]. Journal of Geomechanics, 2025, 31(1): 80-90. (in Chinese with English abstract)

[12] 张延杰, 董家兴, 周志强, 等. 近断层砂化白云岩隧洞突水涌砂演化过程及防突岩盘安全厚度研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(3): 639-652.
ZHANG Y J, DONG J X, ZHOU Z Q, et al. Water and sand inrush evolution and minimum safe thickness of waterproof resistant slab in sandy dolomite tunnels near the faults[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(3): 639-652. (in Chinese with English abstract)

[13] 张延杰, 浦仕江, 周辉, 等. 滇中引水工程安全建设与高效运行关键技术研究若干进展: 地下工程 [J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(2): 333-357.
ZHANG Y J, PU S J, ZHOU H, et al. Research progress on key technologies for safe construction and efficient operation of the Dianzhong water diversion project: Underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(2): 333-357. (in Chinese with English abstract)

[14] 张庆松, 王德明, 李术才, 等. 断层破碎带隧道突水突泥模型试验系统研制与应用 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39(3): 417-426.
ZHANG Q S, WANG D M, LI S C, et al. Development and application of model test system for inrush of water and mud of tunnel in fault rupture zone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(3): 417-426. (in Chinese with English abstract)

[15] ZHANG Q S, JIANG Q C, ZHANG X, et al. Model test on development characteristics and displacement variation of water and mud inrush on tunnel in fault fracture zone[J]. Natural Hazards, 2019, 99(1): 467-492.

[16] 王德明, 张庆松, 张霄, 等. 断层破碎带隧道突水突泥灾变演化模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2851-2860.
WANG D M, ZHANG Q S, ZHANG X, et al. Model experiment on inrush of water and mud and catastrophic evolution in a fault fracture zone tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(10): 2851-2860. (in Chinese with English abstract)

[17] GUO Y H, KONG Z J, HE J, et al. Development and application of the 3D model test system for water and mud inrush of water-rich fault fracture zone in deep tunnels[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021(1): 8549094.

[18] 黄震, 李晓昭, 李仕杰, 等. 隧道突水模型试验流固耦合相似材料的研制及应用 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(12): 3029-3039.
HUANG Z, LI X Z, LI S J, et al. Research and development of similar material for liquid-solid coupling and its application in tunnel water-inrush model test[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(12): 3029-3039. (in Chinese with English abstract)

[19] WANG M X, YANG W M, ZHOU Z Q, et al. Experimental study on fractal characteristics of fault filling medium in the tunnel and relationship between fractal dimension and permeability coefficient[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2021, 8(1): 6.

[20] 张振杰, 张强勇, 向文, 等. 复杂环境下新型流固耦合相似材料的研制及应用 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(11): 4168-4180.
ZHANG Z J, ZHANG Q Y, XIANG W, et al. Development and application of new-style hydro-mechanical coupling similar materials

in complex environment[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(11): 4168-4180. (in Chinese with English abstract)

[21] 杨建辉, 沈恺, 周杰, 等. 穿越富水断层破碎带隧道塌方机理分析与预防 [J]. 工程地质学报, 2023, 31(1): 248-257.
YANG J H, SHEN K, ZHOU J, et al. Mechanism and prevention of tunnel collapse through water-rich fault fracture zone[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(1): 248-257. (in Chinese with English abstract)

[22] ZHONG Z L, WANG Z, ZHAO M, et al. Structural damage assessment of mountain tunnels in fault fracture zone subjected to multiple strike-slip fault movement[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 104: 103527.

[23] ZHOU Z Q, JIN G H, LIU Y H, et al. A coarse-grained CFD-DEM method for efficient simulation of fluid-solid coupling failure process in geomaterials: Methodology and verification[J]. Powder Technology, 2026, 467: 121483.

[24] 商成顺. 基于粗粒化理论的工程尺度 DEM-CFD 流固耦合模拟方法及应用 [D]. 济南: 山东大学, 2021.
SHANG C S. A coarse-grained DEM-CFD coupling method for engineering-scale simulation and its application[D]. Jinan: Shandong University, 2021. (in Chinese with English abstract)

[25] ZHANG Z Q, CHEN Y L, ZHU X Y, et al. Investigating the evolution of debris flow disaster in tunnels: Model testing and numerical simulations[J]. Computers and Geotechnics, 2025, 186: 107420.

[26] XIE Q, CAO Z L, SUN W C, et al. Numerical simulation of the fluid-solid coupling mechanism of water and mud inrush in a water-rich fault tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 131: 104796.

[27] 王美霞. 隧道断层破碎带渗透破坏演化机理与突水突泥防控决策方法及应用 [D]. 济南: 山东大学, 2022.
WANG M X. Evolution mechanism of seepage failure and prevention and control method of water and mud inrush in tunnel fault and its application[D]. Jinan: Shandong University, 2022. (in Chinese with English abstract)

[28] JIANG A N, ZHENG S, WANG S Y. Stress-seepage-damage coupling modelling method for tunnel in rich water region[J]. Engineering Computations, 2020, 37(8): 2659-2683.

[29] 柴琛, 周昌, 夏钊, 等. 新疆某千米埋深隧道断层控制地热成因及热害评价 [J]. 地质科技通报, 2025, 44(4): 304-315.
CHAI C, ZHOU C, XIA Z, et al. Geothermal genesis and hazard assessment for a fault-controlled kilometer-deep tunnel in Xinjiang[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(4): 304-315. (in Chinese with English abstract)

[30] 肖竞, 万军伟, 成建梅, 等. MODFLOW-CFPv2 模型在岩溶隧道突涌水及对地下水环境影响中的应用: 以云南鹤庆锰矿沟岩溶水系统为例 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(3): 301-310.
XIAO J, WAN J W, CHENG J M, et al. Application of MODFLOW-CFPv2 model in karst tunnel water inrush and its impact on groundwater environment: Example of the Mengkuanggou karst water system in Heqing County, Yunnan Province[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(3): 301-310.(in Chinese with English abstract)

[31] 陈迪, 闫海涛, 乔翔宇, 等. 巨厚非均质含水层中超深孔涌水量预测 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(4): 302-310.
CHEN D, YAN H T, QIAO X Y, et al. Prediction of ultradeep pore water inflow in giant thick heterogeneous aquifers[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(4): 302-310.(in Chinese with English abstract)

[32] 石少帅. 深长隧道充填型致灾构造渗透失稳突涌水机理与风险控制及工程应用 [D]. 济南: 山东大学, 2014.
SHI S S. Study on seepage failure mechanisim and risk control of water inrush induced by filled disaster structure in deep-long tunnel and engineering applications[D]. Jinan: Shandong University, 2014. (in Chinese with English abstract)

[33] 罗雄文. 深长隧道突水突泥致灾构造及其致灾模式研究 [D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2014.
LUO X W. Study on disastrous structures and models of water-burst and mud-burst in deep and long tunnel[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2014.(in Chinese with English abstract)

[34] 李鹏飞, 刘宏翔, 赵勇, 等. 隧道穿越断层破碎带防突水最小安全厚度及其影响因素 [J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2020, 2(3): 77-84.
LI P F, LIU H X, ZHAO Y, et al. The minimum safe thickness of tunnel passing through fault fracture zone and its influencing factors[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2020, 2(3): 77-84. (in Chinese with English abstract)

[35] 郭佳奇. 岩溶隧道防突厚度及突水机制研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
GUO J Q. Study on against-inrush thickness and waterburst mechanism of karst tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese with English abstract)

[36] 中华人民共和国水利部. 水工隧洞设计规范: SL279-2016[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Specification for design of hydraulic tunnel: SL279-2016[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2016. (in Chinese)

[37] 张金夫, 汶文钊. 大瑞铁路大柱山隧道高压富水断层处理技术 [J]. 现代隧道技术, 2018, 55(3): 160-166.
ZHANG J F, WEN W Z. Construction technology for the Dazhushan tunnel in a high-pressure fault with abundant water[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(3): 160-166. (in Chinese with English abstract)

[38] 李术才, 袁永才, 李利平, 等. 钻爆施工条件下岩溶隧道掌子面突水机制及最小安全厚度研究 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(2): 313-320.
LI S C, YUAN Y C, LI L P, et al. Water inrush mechanism and minimum safe thickness of rock wall of karst tunnel face under blast excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(2): 313-320. (in Chinese with English abstract)

[39] 陈志宇. 考虑动态泥膜的珠海大直径泥水盾构隧道掘进面稳定性分析 [D]. 长沙: 中南大学, 2024.
CHEN Z Y. Stability analysis of large-diameter slurry shield tunnel face in Zhuhai considering dynamic filter cake[D]. Changsha: Central South University, 2024(in Chinese with English abstract)

[40] 臧东升, 裴书锋, 魏福泽, 等. 复合地层输水竖井围岩与支护稳定性分析 [J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2025, 46(5): 60-67.
ZANG D S, PEI S F, WEI F Z, et al. Stability analysis of surrounding rock and support of water conveyance shaft in composite formation[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2025, 46(5): 60-67. (in Chinese with English abstract)

Summary for “深埋隧道穿越富水断层破碎带突水突泥灾变演化规律研究”

Evolution law of water and mud inrush disaster in deep-buried tunnel crossing water-rich fault fracture zone

GUO Yanhui[1*], LI Shunyin[1], YAN Hang[2], ZHENG Lei[3], LI Xiaoqiang[2], JIAO Hao[3]

1. Faculty of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
2. Third Engineering Company of Yunnan Jiaotong Highway Construction Co. Ltd., Kunming 650103, China;
3. Yunnan Construction Investment No.6 Construction Co. Ltd., Yuxi Yunnan 653199, China

* Corresponding author, E-mail: guoyanhui0818@kust.edu.cn

Abstract: [**Objective**] The existence of water-rich fault fracture zones significantly influences the occurrence of water and mud inrush during tunnel construction. To study the disaster evolution mechanism during deep-buried tunnel excavation through water-rich fault fracture zones, [**Methods**] this study establishes a mechanical model of the impermeable rock mass based on the silo model and limit equilibrium theory, considering the width, length, and inclination angle of the fault fracture zone. The mechanical criterion for the minimum safe thickness of the impermeable rock mass is derived. Using MIDAS GTS NX numerical simulation, a three-dimensional fluid-solid coupling numerical model is developed to analyze the evolution pattern of displacement, stress, pore water pressure, and seepage velocity when tunneling into the fault fracture zone. [**Results**] The results show that the minimum safe thickness of the impermeable rock mass is mainly influenced by the length, width, and inclination angle of the fault fracture zone, tunnel burial depth, and the mechanical properties of the impermeable rock mass. After tunnel excavation reaches the fault zone, internal displacement increases significantly, with abrupt changes in both the maximum and minimum principal stresses. The low pore water pressure zone expands considerably, showing a trend of initial slow decrease, followed by rapid decrease, and eventual stabilization. A high-velocity zone emerges within the fault, with overall model flow velocity increasing. During excavation, the maximum flow velocity at the tunnel face generally increases first and then decreases. [**Conclusion**] This study provides important references for preventing water and mud inrush disasters in fault fracture zones.

Key words: deep-buried tunnel; water and mud inrush; fault fracture zone; impermeable rock mass; MIDAS GTS NX

Received: 2024-04-15; Revised: 2024-06-16; Accepted: 2024-06-17

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240160