

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.01.006

溶洞规模对深埋隧道爆破围岩稳定性的影响*

李新平^{1a,2}, 郑青青^{1b}, 罗 忆^{1a,2}, 夏新兵^{1b,2}, 徐 坤^{1b}, 瞿登星^{1b}, 骆正坤^{1b}

(1. 武汉理工大学 a. 道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室; b. 土木建筑与工程学院, 武汉 430070;
2. 中国建筑第二工程局有限公司, 北京 100160)

摘 要: 为了研究埋岩溶隧道爆破开挖时围岩损伤机制, 通过动静组合(爆炸荷载、地应力共同作用)作用下岩体损伤演化方程建立应力场与损伤场之间的耦合关系, 并根据渗透系数随损伤的变化方程建立动静组合作用下岩体渗流-应力-损伤耦合模型。利用 COMSOL Multiphysics 软件建立计算模型并进行二次开发, 研究在不同溶洞空间位置及尺寸条件下爆破开挖对围岩稳定性的影响。研究表明: 当溶洞位于隧道上侧时围岩中孔隙水压力最大; 溶洞半径越大围岩中孔隙水压力越大。在孔隙水压力的作用下, 隧道与溶洞间岩体中的有效应力先衰减后增强。随着有效应力的衰减, 隧道围岩损伤范围与溶洞围岩损伤范围的变化规律相反。
关键词: 深埋岩溶; 渗流场; 应力场; 全耦合; 损伤

中图分类号: U45 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2020)01-0043-07

Influence of Scale of Karst Cave on Stability of Surrounding Rock in Deep Tunnel Blasting

LI Xin-pin^{1a,2}, ZHENG Qing-qing^{1b}, LUO Yi^{1a,2}, XIA Xin-bing^{1b,2}, XU Kun^{1b},
QU Deng-xin^{1b}, LUO Zheng-kun^{1b}

(1. a. Hubei Key Laboratory of Road-bridge and Structure Engineering; b. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
2. China Construction Second Engineering Bureau Co Ltd, Beijing 100160, China)

Abstract: In order to study the damage mechanism of surrounding rock during blasting excavation of buried karst tunnel, the coupling relationship between stress field and damage field was established by the equation of rock mass damage evolution under static-dynamic combination effects (explosive load and ground stress). According to the variation equation of permeability coefficient with damage, a seepage-stress-damage coupling model of rock mass under dynamic and static combination effect was established. And the COMSOL Multiphysics software was used to establish the calculation model and the secondary development was carried out to study the influence of blasting excavation on the damage degree of surrounding rock under different karst spatial position and size conditions. The results show that when the karst cave is located on the tunnel, the pore water pressure is the largest in the surrounding rock. Under the action of pore water pressure, the effective stress in the rock mass between the tunnel and the cavern is first attenuated and then enhanced. With the attenuation and enhancement of effective stress, the damage range of the tunnel surrounding rock is opposite to that of the surrounding rock damage range of the cave.

Key words: deep karst; seepage field; stress field; full coupled model; damage range

在高压突水地区, 岩体中的渗流水将产生体积力, 岩体将沿着裂隙劈裂破坏改变了围岩中的应力分布^[1]。各国岩土工程学者围绕工程实践中渗流-应力耦合控制方程的求解等方面开展了大量的研

究^[2-5]。Tsang 得出导水系数和应力的负指数关系方程^[6]。认为由于岩石张开度的变化, 裂隙渗流出现偏流现象。杨延毅等较早对渗流-损伤本构模型进行研究和探讨^[7]。贾善坡等在连续损伤力学理论基

基础上分析在孔隙压力和塑性损伤演化共同作用下岩体损伤演化机制^[8]。史世雍等分析了溶洞空间位置对于隧道围岩稳定性影响^[9]。

前人的大部分工作是建立静荷载作用下岩体渗流-应力-损伤耦合模型。基于此,论文建立了动静组合作用下岩体渗流-应力-损伤耦合模型。在耦合模型的基础上,分析溶洞的空间分布、溶洞的尺寸对围岩中渗流场、损伤场的影响。将所建立的数学模型导入COMSOL Multiphysics软件中分析围岩中孔隙水压力、围岩损伤的变化规律。

1 动静组合作用下围岩渗流-应力-损伤耦合模型

1.1 动静组合作用下岩体损伤变量方程

在动静组合作用下,当隧道围岩的单元瞬时应力状态或应变状态满足某个给定的损伤阈值时,单元出现损伤。其一,当单元的最大拉应变达到其动态抗拉强度时,单元开始发生拉伸损伤;其二,当单元的应力状态满足Hoek-Brown准则时,该单元发生压剪损伤。

(1) 拉伸损伤

在单元处于受拉状态下,采用单元最大主应变 $\varepsilon_{p\max}$ 求解岩体受拉损伤变化。

$$D_t = \begin{cases} 1 - \frac{\sigma_{td}}{E\varepsilon_{t,r}} (1.2 - 0.2x^3) & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\sigma_{td}}{E\varepsilon_{t,r}\alpha_t(x-1)^{1.7} + x} & x \geq 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$x = \frac{\varepsilon_{p\max}}{\varepsilon_{t,r}} \quad (2)$$

式中: α_t 为材料参数; σ_{td} 为岩体材料的动态抗拉强度代表值; $\varepsilon_{t,r}$ 为 σ_{td} 相应的峰值拉应变。

(2) 压剪损伤

在受压状态下,考虑采用等效塑性应变 $\bar{\varepsilon}_p$ 表征岩体损伤变量的演化过程。

等效塑性应变 $\bar{\varepsilon}_p$ 的计算公式为

$$\bar{\varepsilon}_p = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{p1} - \varepsilon_{p2})^2 + (\varepsilon_{p2} - \varepsilon_{p3})^2 + (\varepsilon_{p3} - \varepsilon_{p1})^2} \quad (3)$$

在应力和水压力的耦合作用下,岩石应力超过其强度时,围岩产生塑性变形。试验研究表明,随着 $\bar{\varepsilon}_p$ 的增加,损伤逐渐加剧,损伤变量 D 是 $\bar{\varepsilon}_p$ 的非线性函数,可表示成等效塑性应变的指数函数^[10]。

$$D_c = A_0 e^{-\bar{\varepsilon}_{pm}/a} + B_0 \quad (4)$$

$$\bar{\varepsilon}_{pm} = \frac{\bar{\varepsilon}_p}{\varepsilon_{p\max}} \quad (5)$$

式中: ε_{p1} 、 ε_{p2} 和 ε_{p3} 分别为3个主塑性应变; $\bar{\varepsilon}_{pm}$ 为归一化的等效塑性应变, $\bar{\varepsilon}_{p\max}$ 为极限塑性应变,为岩石完全损伤时所对应等效塑性应变值; A_0 、 B_0 为材料参数。

1.2 动静组合作用下围岩渗流-应力耦合控制方程

在岩体渗流的等效连续介质模型中,将岩体视为由骨架颗粒和孔隙(裂隙)构成的均匀介质,在完全耦合分析中应将岩石渗透系数视为一个变量。本文将渗透系数变化规律与岩体损伤进行耦合,建立耦合公式以便反映渗流场中岩体渗透系数与应力场损伤之间耦合关系。

渗透系数-损伤方程是渗流应力耦合分析不可缺少的控制方程。在进行耦合分析时,岩体介质固相由未损伤部分和损伤部分组成。当材料承受荷载时,受损固相部分不能承受剪切荷载,而未损伤部分依然能够承担剪切荷载与静水压力,因此材料总体的承载能力只是相比于损伤前降低了,相当于出现了一定的折减。按照渗流的立方定理,考虑岩体损伤后的渗透系数演化方程可以表达为^[11]

$$k = (1 - D)k_M + Dk_D(1 + \varepsilon_v^{pf})^3 \quad (6)$$

式中: k_M 为未损伤区岩体的渗透系数; k_D 为损伤岩体的渗透系数; ε_v^{pf} 为缺陷相的塑性体积应变, $\varepsilon_v^{pf} = D\varepsilon_v^p$, ε_v^p 为塑性体积应变。

基于Kozeny-Carman公式,可以得到损伤岩体的渗透系数与未损伤岩体渗透系数的关系^[11]。

$$k_D = k_M \frac{[1 + \varepsilon_v/n_0]^3}{1 + \varepsilon_v} \quad (7)$$

2 动静组合作用下围岩多场耦合的数值模型

2.1 工程概况

新疆天山某隧道线路走廊带在区域地貌位置上隶属于新疆天山山脉西段北支脉—北天山。走

收稿日期:2019-01-20

作者简介:李新平(1963-),男,1990年于中国科学院武汉岩土力学研究所获博士学位,现任教授,主要从事裂隙岩体力学特性、爆破控制技术与爆破效应方面的教学与研究工作,(E-mail)xinpingli@whut.edu.cn。

通讯作者:罗亿(1984-),男,2012年与武汉大学获博士学位,现任副教授,主要从事岩土动力学的教学与研究工作,(E-mail)1903416046@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 51774222);国家自然科学基金青年项目(No. 51609183)

廊带主要以沉积地层为主,岩浆岩分布零星。岩溶裂隙非常发育,加之断层和构造节理裂隙的发育,使得围岩内部具有非常良好的储水空间。

2.2 建立模型

(1) 建立计算模型

建立长×宽×高为 70 m×70 m×70 m 的三维模型,隧道掌子面尺寸为 12 m×9 m,溶洞为 3 m×3 m×14 m 的椭球。隧道掌子面中心与溶洞截面中心的水平距离 17.5 m。见图 1、图 2。

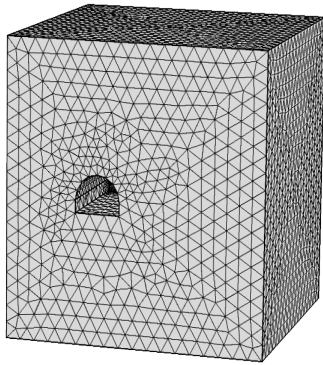


图 1 三维几何模型(单位:cm)

Fig. 1 3D geometric model(unit:cm)

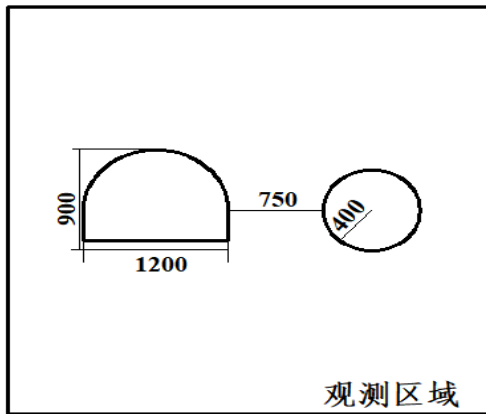


图 2 断面示意图(单位:cm)

Fig. 2 Sectional schematic diagram(unit:cm)

(2) 模型边界条件

模型边界条件分为渗流边界条件、位移边界条件和应力边界条件 3 类。

渗流边界条件:

①根据现场地质勘探报告,隧道穿越的地区降雨量丰富,并且地表存在河流。各河流均发育于天山腹地。为了方便计算,模型边界施加水头压力,施加水头压力为 500 kPa。

②溶洞内部存在承压水,隧道右侧 7.5 m 左右范围内有水压力为 10 MPa 的溶洞。因此在建模时,将溶洞内水压力设置为 10 MPa。

③出渗边界包括隧道的四周边界和掌子面。

位移边界条件为:底面全约束,其他边界设置成无反射边界。

应力边界条件为:新疆北天山深埋隧道的最大埋深为 1500 m。根据李新平、汪斌关于我国大陆实测深部地应力分布规律研究^[12],将 1500 m 的山体作为 40 MPa 静压力加载在模型的边界。

(3) 爆炸荷载

参考实际的爆破过程,将爆破应力施加在隧道开挖面上。作用在开挖面上的力为^[13]

$$\left. \begin{aligned} F &= P_0 \cdot e^{-a \cdot (t+t_1)^{1/a_0}} \cdot \sin [4\pi (1+t_0)(t+t_1)] \\ P_0 &= 1.4Q \times 10^8 \\ t_0 &= Q^{\frac{1}{3}} \times 10^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: P_0 为炸药单位作用力,N; t_1 为爆炸开始时间; t_0 为爆炸终止时间; Q 为炸药量,kg; a 为参数。

(4) 计算材料参数

在 COMSOL Multiphysics 软件中建立岩石材料模型,在软件中将材料定义为弹塑性材料且引用 Hoek-Brown 的岩石准则。针对新疆天山北某隧道的地质条件,将岩层定义为钙质英砂岩,具体的材料参数见表 1。

(5) 研究工况

①溶洞位置

主要的研究工况是溶洞的空间分布,分析溶洞在隧道的右侧、上侧、下侧时围岩有效应力的分布及围岩损伤范围。见图 3。

②溶洞尺寸

表 1 岩石、炸药物理参数

Table 1 Physical parameters of rocks and explosives

岩石密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	岩石弹性模 量/GPa	岩石泊松比	岩石单轴抗拉 强度/MPa	岩石单轴抗压 强度/MPa	炸药量 Q/kg	渗透系数 $k_0/(10^{-5} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
2600	30	0.25	5	85	30	1

主要的研究工况为不同溶洞截面半径对于围岩中有效应力分布及围岩损伤范围的影响。溶洞

半径的变化范围是 $a=2, 4, 6, 8 \text{ m}$ 。见图 4。

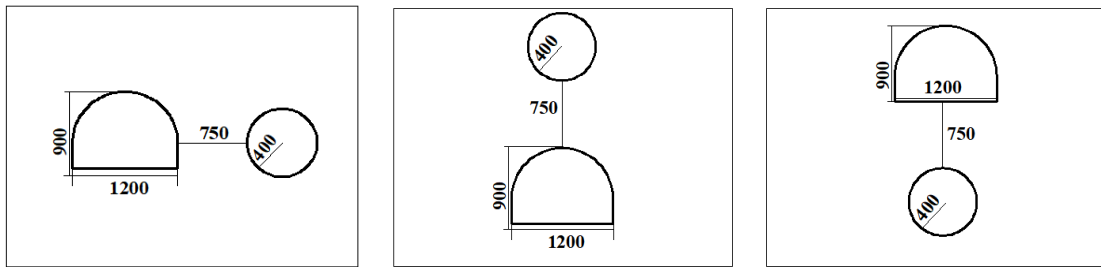


图3 溶洞空间位置分布示意图(单位:cm)

Fig. 3 Schematic diagram of the location of the cavern space(unit:cm)

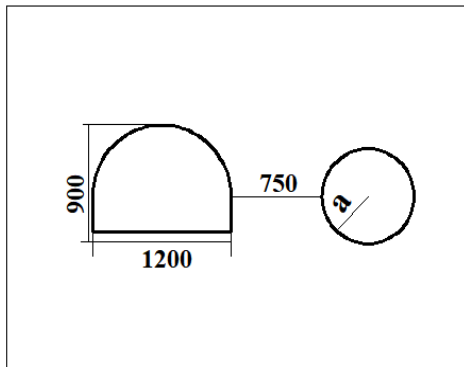


图4 溶洞尺寸大小示意图(单位:cm)

Fig. 4 Schematic diagram of the size of the cave(unit:cm)

(6) 计算过程

将建立的岩体在动静组合作用下渗流-应力-损伤耦合模型通过二次开发嵌入到 COMSOL Multiphysics 软件中实现了数值仿真计算,具体步骤为:

①在初始地应力条件下,将围岩中渗流场作为水力荷载施加到模型中,实现地应力与水荷载的初始耦合。

②对 COMSOL Multiphysics 软件进行二次开发,继承地应力、水荷载的应力状态,在此基础上进行爆破开挖,将围岩的损伤本构关系导入 COMSOL Multiphysics 软件中,实现应力-渗流-损伤的初次耦合。

③根据围岩的损伤分布,建立围岩渗透系数与围岩损伤的关系,实现应力、渗流、损伤的交叉耦合。

④利用 COMSOL Multiphysics 软件后处理功能,计算出围岩中的孔隙水压力、有效应力、损伤因子数值。

3 动静组合作用下围岩渗流场-应力场-损伤场特征分析

3.1 渗流场的特征分析

3.1.1 溶洞位置对渗流场的影响

溶洞的存在导致了岩体中应力场分布不均匀。当溶洞在隧道上侧时,在高地应力的作用下,溶洞的岩层发生了较大变形导致了溶洞内水头压力的增加。另外,地应力与爆炸荷载共同作用导致了围岩的损伤变量增大,较大的损伤变量使得岩体渗透系数增大。在渗透系数较大的围岩中,岩溶水更容易渗透,孔隙水压力更大。当溶洞在隧道下侧时,高地应力导致了隧道岩层发生大变形,已开挖的隧道对溶洞变形起到了削弱作用,因此溶洞围岩的变形减弱,溶洞内水头压力较少。

从图5中可以看出孔隙水压力在隧道与溶洞间围岩中的分布状态是:越靠近溶洞,围岩中的孔隙水压力越大。当溶洞位于隧道上侧时围岩中的孔隙水压力最大;溶洞位于隧道右侧时孔隙水压力次之;溶洞位于隧道下侧时孔隙水压力最小。当溶洞位于隧道上侧时,溶洞边界围岩中孔隙水压力为 39 MPa,是溶洞在隧道下侧时的 1.21 倍。

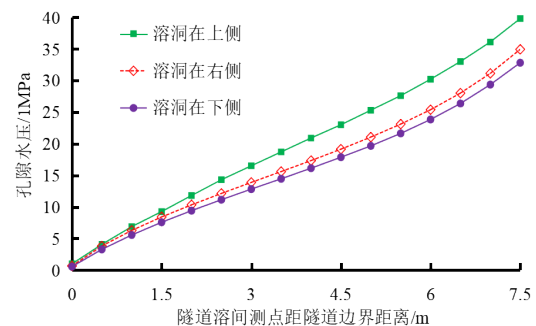


图5 不同溶洞位置条件下孔隙水压力分布图

Fig. 5 Pore water pressure distribution map under different karst locations

3.1.2 溶洞尺寸对渗流场的影响

在高地应力作用下,溶洞尺寸影响着溶洞围岩中应力场的分布。当溶洞尺寸越大时,在高地应力的作用下,溶洞的岩层更容易发生了大变形导致溶洞内水头压力的增加。围岩中的大变形引起了损伤变量增大,从而导致岩体的渗透系数增加。在渗透系数较大的围岩中,岩溶水更容易渗透,孔隙水压力更大。

从图6中可以看出孔隙水压力在隧道与溶洞间围岩中的分布状态是:越靠近溶洞,围岩中的孔隙水压力越大。当溶洞半径为8 m时围岩中的孔隙水压力最大;溶洞半径为6 m时孔隙水压力次之;溶洞半径为2 m时孔隙水压力最小。当溶洞半径为8 m时,溶洞边界的孔隙水压力为37.8 MPa,是溶洞半径为2 m时的1.34倍。

3.2 有效应力的特征分析

3.2.1 溶洞位置对有效应力的影响

溶洞的空间位置变化会引起围岩中孔隙水压力的不同分布。孔隙水能够抵消动静组合作用下(爆炸荷载与地应力共同作用)的有效应力。当溶洞在隧道上侧时,围岩中孔隙水压力最大。隧道附近围岩中爆炸荷载和地应力共同作用下的有效应力在孔隙水压力的抵消下,有效应力会快速衰减。溶洞附近围岩中孔隙水压力增大,孔隙水压力与地应力共同作用导致了围岩中的有效应力增加。

从图7中可以看出应力场从隧道边界向溶洞边界传播的过程中,应力出现了快速衰减然后又再次上升的现象。当溶洞在隧道上侧时,隧道附近围岩中有效应力衰减速度最快,溶洞附近围岩中有效应力上升速度最快;溶洞在隧道下侧时,隧道附近围岩中有效应力衰减速度最慢,溶洞附近围岩中有效应力上升速度最慢。当溶洞在隧道上侧时,溶洞边界围岩中的应力为80.9 MPa,是溶洞在隧道下侧时的1.12倍。

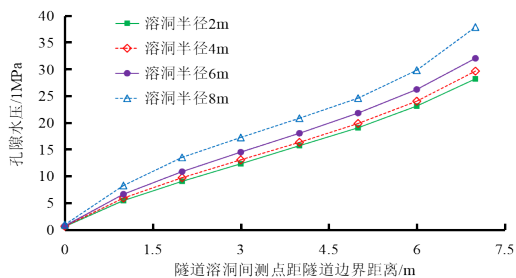


图 6 不同溶洞尺寸条件下孔隙水压力分布图

Fig. 6 Pore water pressure distribution map under different Cave size

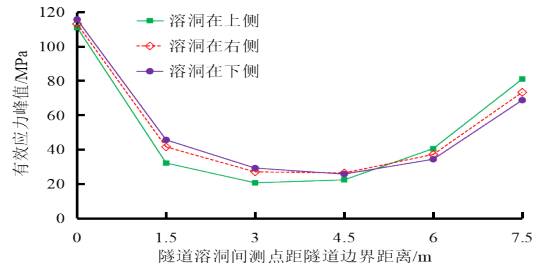


图 7 不同溶洞位置条件下应力场分布图

Fig. 7 Stress field distribution diagram under different cave locations

3.2.2 溶洞尺寸对应力场的影响

溶洞的尺寸变化会引起围岩中孔隙水压力的不同分布。当溶洞半径为8 m时,围岩中孔隙水压力最大。隧道附近围岩中爆炸荷载和地应力共同作用下的有效应力在孔隙水压力的抵消下,有效应力会快速衰减。溶洞附近围岩中孔隙水压力增大,孔隙水压力与地应力共同作用导致了围岩中的有效应力增加。

从图8中可以看出应力场从隧道边界向溶洞边界传播的过程中,应力出现了快速衰减然后又再次上升的现象。当溶洞半径为8 m时,隧道附近围岩中有效应力衰减速度最快,溶洞附近围岩中有效应力上升速度最快;溶洞半径为2 m时,隧道附近围岩中有效应力衰减速度最慢,溶洞附近围岩中有效应力上升速度最慢。当溶洞半径为8 m时,溶洞边界的应力为91 MPa,是溶洞半径为2 m时的1.5倍。

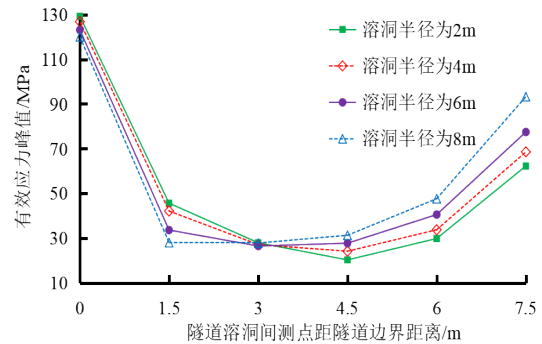


图 8 不同溶洞尺寸条件下应力场分布图

Fig. 8 Stress field distribution diagram under different cave locations

3.3 损伤场的特征分析

3.3.1 损伤场随溶洞位置的变化规律

前文中讨论了不同溶洞位置条件下有效应力的变化规律,有效应力的分布导致了围岩损伤范围变化。本节进一步的研究围岩损伤场在不同溶洞位置条件下的变化规律。文中提出的等效塑性应

变来衡量围岩出现损伤的情况。对于岩石材料而言,当围岩出现塑性应变的同时伴随着损伤的出现^[14]。根据损伤变量 D 确定围岩的损伤范围,这里需要指出当损伤变量 $D > 0$ 时则认为围岩出现了损伤。

从图9中可以看出随着溶洞空间位置的变化,隧道围岩损伤范围与溶洞围岩损伤范围的变化规

律相反。当溶洞在隧道上侧时,溶洞围岩的损伤范围最大,损伤边界与溶洞边界的距离为1.7 m;隧道围岩的损伤范围最小,损伤边界与隧道边界的距离为1 m。当溶洞位于隧道的下侧时,溶洞围岩的损伤范围最小,损伤边界与溶洞边界的距离为0.9 m;隧道围岩的损伤范围最大,损伤边界与隧道边界距离为1.5 m。

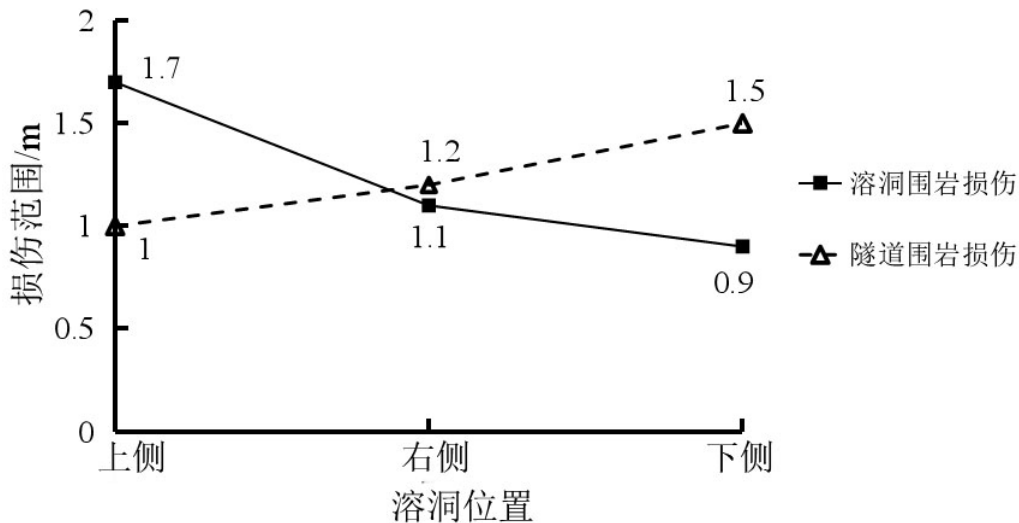


图9 不同溶洞位置的损伤范围

Fig. 9 Damage range of different ground stresses

3.3.2 损伤场随溶洞尺寸的变化规律

溶洞的尺寸变化导致了围岩中有效应力的重新分布。有效应力的分布导致了围岩损伤范围的变化。溶洞半径为8 m时,隧道附近围岩中有效应力快速衰减,因此隧道附近围岩中损伤范围最小;溶洞附近围岩中有效应力快速增加,溶洞围岩的损伤范围最大。当溶洞半径为2 m时,隧道附近围岩中有效应力衰减较慢,因此隧道附近围岩中损伤范围最大;溶洞附近围岩中有效应力缓慢增加,溶洞围岩的损伤范围最小。

从图10中可以看出随着溶洞半径增加,隧道围岩损伤范围与溶洞围岩损伤范围的变化规律相反。当溶洞半径增大时,隧道附近围岩损伤范围减小,溶洞附近围岩的损伤范围增大。当溶洞半径为8 m时,隧道附近围岩损伤边界与隧道边界的距离为1 m;溶洞附近围岩的损伤边界与溶洞边界的距离为1.7 m。当溶洞半径为2 m时,隧道附近围岩的损伤边界与隧道边界的距离为1.6 m;溶洞附近围岩的损伤边界与溶洞边界的距离为0.5 m。

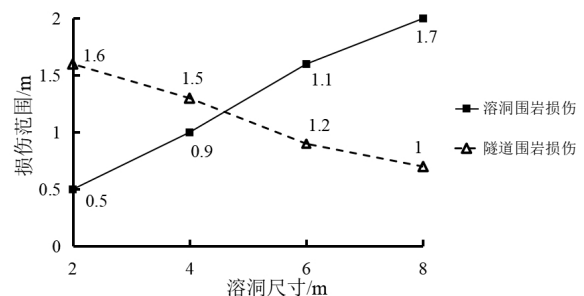


图10 不同溶洞尺寸的损伤范围

Fig. 10 Damage range of different cave sizes

4 结论

通过建立爆破荷载及地应力组合作用下(动静荷载作用下)应力场、损伤场、渗流场多物理场的耦合模型,研究在不同溶洞尺寸及位置条件下爆破开挖对围岩渗流场、应力场、损伤场的影响,主要得出以下结论:

(1)高地应力作用下,溶洞的位置及尺寸变化导致了溶洞围岩的变形发生改变,进而影响溶洞内水压力导致围岩内孔隙水压力分布发生改变。

(2)在孔隙水压力的作用下,隧道与溶洞间围岩中由动静组合共同作用产生的有效应力先衰减

后增强。围岩中孔隙水压力越大,有效应力的衰减、增强规律越明显。

(3)隧道围岩损伤范围与溶洞围岩损伤范围的变化规律相反,当溶洞位于隧道上侧时,溶洞围岩的损伤范围最大,隧道围岩的损伤范围最小;当溶洞半径增大时,隧道损伤范围减小,溶洞损伤范围增大。

参考文献(Reference)

- [1] 赵延林,曹 平,马文豪,等. 岩体裂隙渗流-劈裂-损伤耦合模型及应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017,48(3):794-803.
- [1] ZHAO Yan-lin, CAO Ping, MA Wen-hao, et al. Coupling model of seepage-splitting-damage of rock mass fractures and its application[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2017,48(3):794-803. (in Chinese)
- [2] 任青文,张林飞,沈 雷,等. 考虑非饱和渗流过程的岩体变形规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018,37(S2):4100-4107.
- [2] REN Qing-wen, ZHANG Lin-fei, SHEN Lei, et al. Analysis of deformation law of rock mass considering unsaturated seepage process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018,37(S2):4100-4107. (in Chinese)
- [3] 高海鹰,夏颂佑. 三维裂隙岩体渗流场与应力场耦合模型研究[J]. 岩土工程学报, 1997,19(2):102-105.
- [3] GAO Hai-ying, XIA Song-you. Study on coupled model of seepage field and stress field in three-dimensional fractured rock mass [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997,19(2):102-105. (in Chinese)
- [4] 孔 洋,朱珍德,阮怀宁. 三向应力作用下节理岩体渗流-应力耦合特性[J]. 岩土力学, 2018,39(6):2008-2016.
- [4] KONG Yang, ZHU Zhen-de, RUAN Huai-ning. Stress-seepage coupling characteristics of jointed rock mass under three principal stresses [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(6): 2008-2016. (in Chinese)
- [5] GARDNER L R. A modeling study of the dynamics of pore water seepage from inertial marsh sediment [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2005, 62(4): 691-698. (in Chinese)
- [6] TSANG Y W, WITHERSPOON P A. Hydro mechanical behavior of a deformable rock fracture subject to normal stress [J]. J Geophys Resear, 1981, 86(b10): 9187-9198. (in Chinese)
- [7] 杨延毅,周维垣. 裂隙岩体的渗流-损伤耦合分析模型及其工程应用[J]. 水利学报, 1991(5):19-27, 35.
- [7] YANG Yan-yi, ZHOU Wei-huan. Seepage-damage coupling analysis model of fractured rock mass and its engineering application [J]. SHUILI XUEBAO, 1991(5): 19-27, 35. (in Chinese)
- [8] 贾善坡,陈卫忠,于洪丹,等. 泥岩隧道施工过程中渗流场与应力场全耦合损伤模型研究[J]. 岩土力学, 2009,30(1):19-26.
- [8] JIA Shan-po, CHEN Wei-zhong, YU Hong-dan, et al. Research on fully coupled damage model of seepage field and stress field in mudstone tunnel construction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 19-26. (in Chinese)
- [9] 史世雍,梅世龙,杨志刚. 隧道顶部溶洞对围岩稳定性的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005(5):698-702, 716.
- [9] SHI Shi-yong, MEI Shi-long, YANG Zhi-gang. Analysis of influence of karst cave on the stability of surrounding rock [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2005(5):698-702, 716. (in Chinese)
- [10] 周亚峰. 水工隧洞渗流-应力-损伤/开裂耦合理论及方法研究[D]. 武汉:武汉大学, 2016.
- [10] ZHOU Ya-feng. Study on seepage-stress-damage/crack coupling theory and method for hydraulic tunnel [D]. Wuhan: Wuhan University, 2016. (in Chinese)
- [11] 王军祥,姜谔男,宋战平. 岩石弹塑性应力-渗流-损伤耦合模型研究(I):模型建立及其数值求解程序[J]. 岩土力学, 2014,35(S2):626-637, 644.
- [11] WANG Jun-xiang, JIANG An-nan, SONG Zhan-ping. Study of the coupling model of rock elastoplastic stress-seepage-damage (I): Modelling and its numerical solution procedure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S2):626-637, 644. (in Chinese)
- [13] 李新平,汪 斌,周桂龙. 我国大陆实测深部地应力分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012,31(S1):2875-2880.
- [13] LI Xin-ping, WANG Bin, ZHOU Gui-long. Research on distribution rule of geostress in deep stratum in Chinese mainland [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012,31(S1):2875-2880. (in Chinese)
- [14] 李贤忠,林柏泉,扬 威,等. 基于多参数协同的高低位爆破防治瓦斯动力灾害技术[J]. 煤矿安全, 2013,44(4):84-87.
- [14] LI Xian-zhong, LIN Bai-quan, YANG Wei, et al. High-low-blasting technology based on multi-parameters cooperative in gas dynamic disaster prevention [J]. Coal mine safety, 2013,44(4):84-87. (in Chinese)
- [15] 王海龙,李庆斌. 饱和混凝土静动力抗压强度变化的细观力学机制[J]. 水利学报, 2006,37(8):958-962.
- [15] WANG Hai-long, LI Qin-bin. Micromechanical mechanism of static and dynamic compressive strength variation of saturated concrete [J]. SHUILI XUEBAO, 2006, 37(8):958-962. (in Chinese)