文章编号:1674-2869(2024)04-0452-08

岩溶地区隧道围岩临界防突厚度数值分析

周小龙,李 澳,冯雪冬
武汉工程大学土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430074

摘要:依托某隧道工程,基于岩溶地区地质特征建立了岩溶隧道围岩结构概化数值模型,分析充水溶洞位于隧道不同位置、各工况下岩溶隧道防突层破坏过程及规律,提出了不同位置下围岩临界防突层厚度。研究结果表明:岩溶的发育规模、岩层厚度、溶洞位置和岩溶水压均为突水灾害发生的主要影响因素;溶洞位于拱腰时,塑性区最大变形发生在岩溶隧道防突岩层中心,从位移、应力和孔隙水压变化规律可知,溶洞位于隧道拱腰时,对隧道围岩稳定性影响较大;由数值模拟结果可知,各工况下未发生塑性贯通区的位置及临界防突层厚度。研究成果可为岩溶区隧道建设及工程施工中的突涌突水灾害预测提供科学依据。

关键词:岩溶隧道;隧道突水;临界防突层厚度;数值模拟
中图分类号:TD823 **文献标识码**:A **文章编号**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202310006

Numerical analysis of thickness of critical outburst prevention layer of peripheral rock in karst tunnel

ZHOU Xiaolong, *LI Ao*, *FENG Xuedong*
School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: Using a tunnel project, based on the geological characteristics of karst areas, we established a generalized numerical model of the surrounding rock structure of the karst tunnel. Analyzing the failure process and law of the outburst prevention layer of the karst tunnel under different positions and working conditions of the water-filled karst cave, we proposed the thickness of the critical outburst prevention layer of peripheral rock at different positions. The results show that the karst development scale, rock thickness, karst cave location, and karst water pressure are the main factors resulting in water inrush disasters. When the karst cave is located at the arch waist, the maximum deformation of the plastic zone occurs in the center of the outburst prevention rock layer of the karst tunnel. From the variation law of displacement, stress, and pore water pressure, it can be seen that the karst cave has a greater influence on the stability of the surrounding rock of the tunnel when it is located at the arch waist of the tunnel. The numerical simulation results show the locations of the plastic penetration zones and thickness of the critical outburst prevention layers under various working conditions. The research results above provide a scientific basis for prediction of water inrush disasters in tunnels and other engineering construction in karst areas.

Keywords: karst tunnel; tunnel water inrush; critical outburst prevention layer thickness; numerical simulation

随着我国基础交通网络的快速延伸,隧道建设在我国西南地区高速展开,西南地区喀斯特地貌遍布山脉,具有地质结构复杂多变、地下暗河汹涌、富含充水溶洞等特点[1]。难以通过现有勘查技术明确地质灾害具体位置,在隧道开挖过程中,由于防突厚度的减小极易发生隧道突水涌泥灾

收稿日期:2023-10-14
基金项目:武汉工程大学第十四届研究生教育创新基金(CX2022205)
作者简介:李 澳,硕士研究生。Email:18162744094@163.com
***通信作者**:周小龙,博士,副教授。Email:zhouxiaolong@wit.edu.cn
引文格式:周小龙,李澳,冯雪冬. 岩溶地区隧道围岩临界防突厚度数值分析[J]. 武汉工程大学学报,2024,46(4):452-459.

害，其具有爆发性强、水流速大、破坏力大等危险因素，对隧道施工人员的人身安全造成严重威胁[2]。如宜万铁路的野三关隧道和京广线大瑶山隧道，均在施工期间发生涌水突泥灾害导致大型坍塌事故，造成严重生命和财产损失[3]。大量工程实例显示，防突层厚度不足会导致结构失稳破坏，因此，防突层安全厚度是突水涌泥灾害防治的关键，直接影响到隧道工程的安全和经济效益。

为解决突水涌泥灾害预测难题，国内外学者针对围岩防突层安全厚度理论开展深入研究，并获得一系列研究成果。李利平等[4]对详细地讨论了在岩溶裂隙水突涌时的最小岩体防突厚度，并提出了10余种常用隧道突水灾害防突厚度的计算方法。郭佳奇等[5]在单裂隙三区及两带理论上，提出在外界水压力、地应力等条件下，岩层最小安全厚度的表达式。孙谋等[6]将隧道简化为圆，基于突变理论，归纳了影响最小安全厚度的主要因素，包括外部压力、岩盘自重等。在上述研究中，科研人员已提出防突层安全厚度的理论指导。在数值模拟方面，金圣杰[7]运用Visual Modflow对隧道不同开挖段进行有限元仿真模拟，对不同区段的涌水量进行了预测，为突水涌泥灾害的预防措施提供理论依据。王廷伯等[8]采用PFC 2D软件分析了岩溶位于不同位置对周边围岩稳定性的影响及规律。Lai等[9-10]基于强度折减法模拟研究了隧道间岩盘的安全厚度及安全系数的问题，并通过工程实例得以验证。周毅、周宗春等[11-12]分别通过FLAC 3D、PFC软件研究了充填介质在岩溶管道中的渗流透水规律，揭示充填介质渗透失稳时的突水涌泥灾变演化规律。通过理论分析和数值模拟结合的方法来开展研究对突水涌泥灾害预测及施工方案的调整具有实际意义。

本文针对某隧道沿线存在岩溶不良地质发育的特点，以此工程为研究对象，采用ABAQUS数值模拟有限元软件进行开挖模拟和受力分析。建立充水溶洞位于隧道拱顶、拱腰两种数值计算模型，分析溶洞空间分布和距离对岩溶隧道围岩防突层临界厚度及围岩稳定性的影响，并总结其变化规律。为岩溶隧道施工提供理论支持和技术参考，从而有效规避隧道施工中的突涌水灾害事故。

1　工程概况

隧道工程选址总体地貌为喀斯特侵蚀地形，地表受强烈侵蚀作用，起伏剧烈。隧道穿越的岩体以白云岩、灰岩为主，洞身围岩为中微风化灰岩，质地坚硬，多为块状。场区地下水类型为第四系松散裂隙水、基岩中风化裂隙水及岩溶裂隙水，在施工过程中可能导致淋雨状或涌流状出水。两组节理产状主要为230°∠85°、0°∠81°，主发育张节理，密度介于200~300 mm（结构面向距法）。根据工程地质勘探情况选择溶洞较为发育的ZK47+960~ZK48+420区域段，该段长460.0 m，顶板埋深93.9~156.2 m，隧道穿越地层岩性为吴家坪组（P_2W）灰岩，节理产状265°∠20°（19.9°）。工程地质纵断面图见图1。

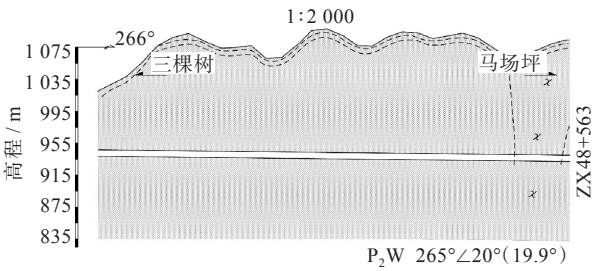


图1　工程地质纵断面图

Fig. 1　Engineering geological profile

2　岩溶隧道有限元模型的建立

2.1　模型简化及边界条件

根据隧道的地质构造及岩溶洞穴发育状况，建立隧道有限元模型，将隧道断面简化为直墙半圆拱形，假定隧道左右两边应力、位移、孔隙水压值对称，隧道直墙段高为6 m，上部半圆拱形直径为8 m，隧道跨度为8 m。在不考虑溶洞形状影响的前提下，将其等效为直径5 m的球体。为降低边界效应对隧道的影响，模型尺寸不宜小于开挖直径的3~5倍[5]，基于此，几何模型水平长度乘以竖向高度为40 m×45 m，满足要求。以隧道底板中心点为模型坐标原点，模型顶端距隧道顶板为15.5 m，底部距隧道底板为19.5 m。隧道模型如图2所示。

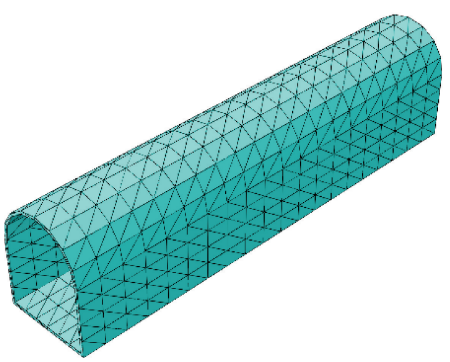


图2　隧道模型

Fig. 2　Tunnel model

在模型左右、前后及下边界分别施加水平、轴

向和竖向位移约束，底部则施以水平和竖向位移约束。鉴于溶洞在岩溶发育过程中会对隧道围岩造成的影响，需先分析地层模型初始应力场，采用基于摩尔-库伦屈服法则建立的弹塑性模型，考虑到溶洞内部水压的影响，模型采用渗流模式[7]。针对实际施工中的干扰影响，将每步尺寸开挖深度设为2 m，共设置20个开挖步，并采取全断面法。溶洞中心位于隧道纵向中点的拱顶或拱腰上，即22 m处（第11开挖步），隧道的具体施工示意图见图3。

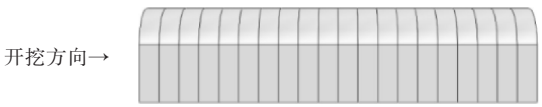


图3 隧道开挖示意图

Fig. 3 Schematic diagram of tunnel excavation

2.2 模型参数选定

隧道选址段长460 m，穿越岩体为Ⅳ级围岩，R_C = 35 MPa，K_V = 0.5，K_1 = 0.4。考虑到围岩节理对岩体强度的削弱，将其等效为各向同性均质体，具体参数见表1。

表1 围岩参数

Tab. 1 Peripheral rock parameters

容重 / (kN/m³)	弹性模量 / GPa	泊松比	内摩擦角 / (°)	黏聚力 / MPa
18	1.4	0.38	42	0.5

2.3 计算工况设置

隧道在穿越复杂岩溶地质的过程中可能出现的情况众多，其中对隧道影响最大的是充水溶洞的位置和距离，考虑溶洞为富水有压溶洞，将充水溶洞水压设为0.5 MPa[13]。计算总工况见表2。

表2 计算总工况

Tab. 2 Total working condition

工况	溶洞相应位置	与溶洞相应位置距离 / m
一	拱顶	距拱顶2
二		距拱顶4
三		距拱顶6
四		距拱顶8
五		距拱顶10
六	拱腰	距拱腰2
七		距拱腰4
八		距拱腰6
九		距拱腰8
十		距拱腰10

由于工况较多，计算量大，在开挖初期对围岩进行了支护和二次衬砌，将隧道衬砌轮廓设为不透水边界[14]。围岩渗透系数为2.12×10^{-12}，孔隙率为0.30。假设隧道两侧的应力、位移和孔隙水压力均按结构对称分布，有限元分析基于厚板理论[15]，选取围岩监测点为节点A、B、C、D，如图4所示。

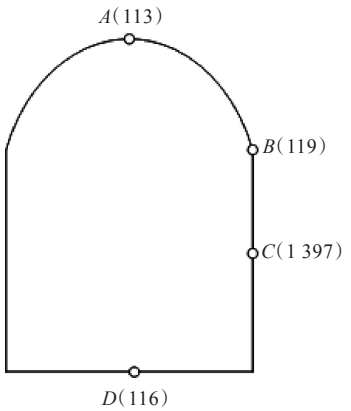


图4 隧道围岩监测点

Fig. 4 Tunnel peripheral rock monitoring points

3 模拟计算结果及分析

通过对隧道不同监控点的监测分析，研究其对围岩稳定性的影响，总结隧道围岩应力、位移和孔隙水压的变化规律，从而确定在不同工况下隧道围岩临界防突层厚度。

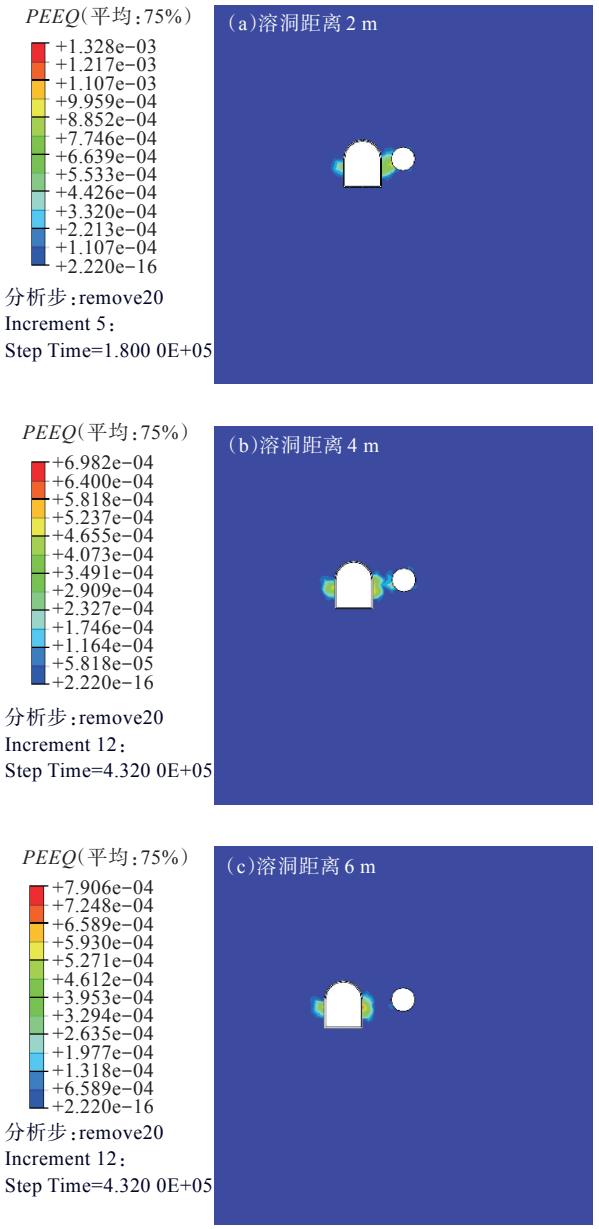
3.1 溶洞距离对隧道防突层的影响

溶洞初始位置为2 m，逐次增加2 m，直至不会出现贯通的塑性区。当溶洞距隧道拱顶2 m时，未出现贯通的塑性区，此时的临界防突层厚度为2 m。下面对溶洞位于隧道拱腰处时，塑性区随距离改变的规律进行研究，等效塑性应变（equivalent plastic strain，*PEEQ*）分布规律如图5所示。

溶洞距隧道10 m处，隧道围岩塑性区发生微弱变化，溶洞周围无明显变化；溶洞距隧道6~8 m时，隧道围岩塑性区随距离减小而逐渐增加，溶洞周围塑性区开始发生变化；溶洞距隧道2~4 m时，两者塑性区逐渐靠拢，在4 m处贯通，在2 m处形成完整突水贯通通道，由此可知该模型最小防突厚度为6 m。为进一步分析防突层破坏过程，下面分析隧道开挖步对防突层的影响。

3.2 开挖步对隧道防突层的影响

在距隧道拱腰2 m处，采用水力分析模型对开挖步增加对塑性区的影响进行数值模拟，提取监测点位移数据，见图6和图7。



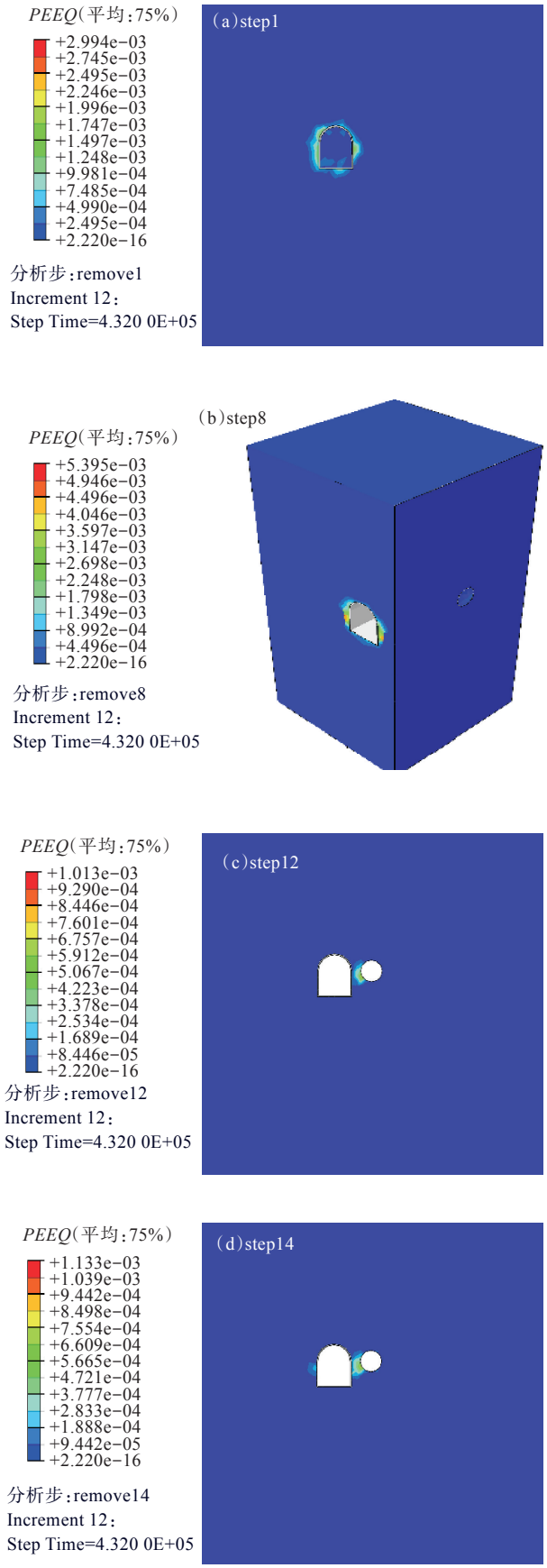
注：*PEEQ*为应变分量。

图5　随溶洞距离变化的塑性区云图

Fig. 5　Cloud map of plastic area changing with karst cave distance

隧道开挖破坏围岩应力状态，隧道周围在step1~7产生微弱塑性变化，溶洞无明显变化；随着进一步开挖，隧道围岩塑性区区域在step8~11逐渐增加，溶洞周围塑性区开始发生变化；随着开挖逐渐接近溶洞，隧道和溶洞周围的塑性区在step12~20互相逐渐靠拢，在step14时，塑性区发生贯通，最终形成完整的突水贯通通道。

溶洞位于拱腰距隧道2 m时，拱腰处位移最大，拱肩、拱顶和拱底次之。位移整体随溶洞与隧道间距离增大而增加；拱肩位移随距离增大呈直线上升；拱顶和拱底位移先无明显变化后微弱增



注：*PEEQ*为应变分量。

图6　随隧道开挖步变化的塑性区云图

Fig. 6　Cloud map of plastic area changing with tunnel excavation steps

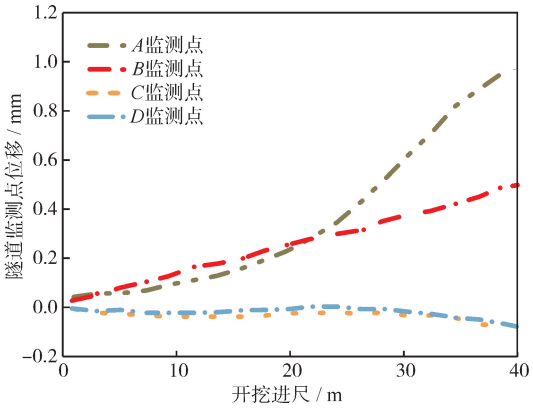


图7 隧道监测点随开挖进尺位移变化规律

Fig. 7 Displacement of tunnel monitoring points changing with excavation footage

加，在开挖至40 m处时，最大位移值0.99 m出现在拱腰处。从图6和图7可看出，在step12阶段，岩层位移值呈线性增长，表明step12是岩层破坏的临界状态，岩层在此后可能已经发生破坏，从而发生突水事故。

3.3 溶洞位置对隧道围岩稳定性的影响

围岩稳定性是隧道安全施工及使用的基础，如何维护隧道围岩稳定性是重要课题。当溶洞位于拱顶时，选取已越过溶洞的隧道部分，即第11步开挖步，模拟四个监测点在拱顶和拱腰处及不同距离下的应力、位移和孔隙水压变化情况。提取监测点位于拱顶处数据情况，见表3。

由图8可得，当溶洞位于隧道拱顶上方时，围岩的受力并未直接作用于监测点B、C、D，故其最大主应力随溶洞距离的改变不明显，而监测点A的最大主应力变化值较为显著；4个监测点的最小主应力和位移随溶洞距离的改变并不明显，监测点B、C的位移数据较为相近，但相对于B、C，监测点A、D的位移较大且发生相反方向位移。

表3 溶洞位于拱顶时监测结果

Tab. 3 Monitoring data on cavern at tunnel vault

溶洞距拱顶距离 / m	监测点	最大主应力 / MPa	最小主应力 / MPa	x方向位移变化值 / mm	y方向位移变化值 / mm	孔隙水压变化值 / MPa
2	*A*	−0.8	−2.0	0.02	−4.80	0.23
	B	−0.5	−2.7	−3.90	−2.10	0.18
	C	−0.4	−2.8	−4.00	0.11	0.15
	D	−0.7	−1.8	0.05	5.15	0.02
4	*A*	−1.0	−2.0	0.02	−4.90	0.17
	B	−0.4	−2.6	−4.00	−2.20	0.18
	C	−0.5	−2.8	−4.00	0.10	0.16
	D	−0.8	−1.9	0.08	5.20	0.01
6	*A*	−1.0	−2.0	0.03	−5.00	0.21
	B	−0.5	−2.8	−4.10	−2.20	0.17
	C	−0.5	−2.8	−4.20	0.08	0.17
	D	−0.7	−1.9	0.08	5.29	0.01
8	*A*	−1.1	−2.1	0.03	−5.10	0.16
	B	−0.4	−2.7	−4.10	−2.20	0.19
	C	−0.5	−2.9	−4.20	0.08	0.16
	D	−0.7	−1.9	0.08	5.30	0.01
10	*A*	−1.1	−2.1	0.02	−7.60	0.16
	B	−0.5	−2.8	−4.20	−3.80	0.18
	C	−0.5	−2.9	−4.30	0.50	0.16
	D	−0.8	−1.9	0.04	7.94	0.03

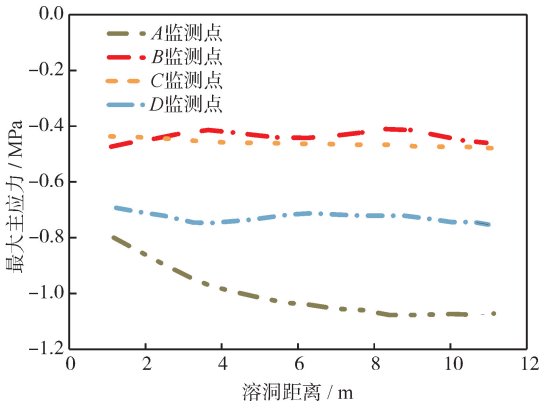


图8　最大主应力随溶洞距离增大的规律（拱顶）

Fig. 8　Changing pattern of maximum principal stress with increasing distance from the cavern (vault)

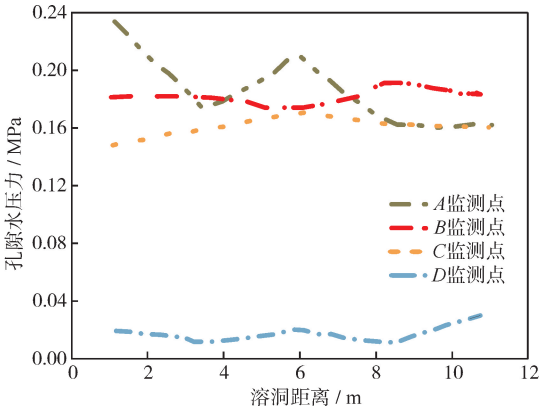


图9　孔隙水压随溶洞距离增大的规律（拱顶）

Fig. 9　Pore water pressure changing with the increase of karst cave distance (vault)

综上，当溶洞位于隧道拱顶上方时，对隧道拱顶、拱腰和拱底处的最小主应力大小的影响较小，最大主应力发生位置以拱顶和拱底为主，位移最大值在拱顶和拱底处。故隧道拱顶和拱底为围岩的最多破坏点，若岩体中有节理裂隙等构造，极有可能发生应力集中现象，造成岩体剪切破坏。

由图9可知，当充水溶洞距离拱顶2 m时，最大孔隙水压力位于拱顶处，最大应力值为0.23 MPa，拱顶的孔隙水压力总体上随距离的增大而减小，拱肩、拱腰和拱底的孔隙水压力无显著变化。因此在流固耦合模型中，研究重心应放在围岩应力和孔隙水压的变化规律。下面研究溶洞位于拱腰处，在不同距离下的应力、位移和孔隙水压变化情况。提取监测点位于拱腰处数据情况，见表4。

表4　溶洞位于拱腰时监测结果

Tab. 4　Monitoring data on cavern at tunnel vault haunch

溶洞距拱腰距离 / m	监测点	最大主应力 / MPa	最小主应力 / MPa	x方向位移变化值 / mm	y方向位移变化值 / mm	孔隙水压变化值 / MPa
2	*A*	−1.19	−1.98		−0.01	0.85
	B	−1.19	−2.66	0.27		0.85
	C	−1.03	−2.75	0.29		0.66
	D	−1.19	−1.82		−0.02	0.85
2	*A*	−1.19	−1.98		−0.01	0.85
	B	−1.19	−2.63	0.26		0.85
	C	−0.94	−2.81	−0.02		0.65
	D	−1.19	−1.89		0.02	0.84
6	*A*	−1.19	−2.04		0.09	0.84
	B	−1.20	−2.76	0.23		0.84
	C	−1.08	−2.84	−0.02		0.73
	D	−1.20	−1.89		0.06	0.84
8	*A*	−1.08	−2.06		0.15	0.84
	B	−1.20	−2.74	0.19		0.73
	C	−1.08	−2.88	−0.02		0.84
	D	−1.20	−1.92		0.01	0.61
10	*A*	−0.94	−2.07		−0.92	0.61
	B	−0.64	−2.84	−0.01		0.56
	C	−0.93	−2.92	−0.06		0.48
	D	−0.93	−1.93		−0.12	0.48

由图10可知，当溶洞位于拱腰时，最大主应力值在拱肩处最小，并且随着距离增大发生微弱波动，而拱顶、拱腰和拱底处最大主应力值相对稳定；在拱腰处的最小主应力值和围岩变形均为最大，4个监测点的最小主应力和位移随溶洞距离的增加有微弱起伏，而拱顶的位移随溶洞与隧道间距离变化有明显波动，先微弱增加后骤降。

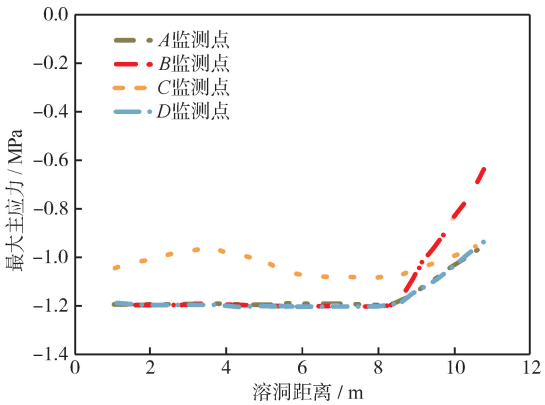


图10 最大主应力随溶洞距离增大的规律（拱腰）

Fig. 10 Maximum principal stress with increasing distance from the cavern (haunch)

分析图10中应力变化规律可得，隧道围岩的最大主应力分布不均匀，可能发生最大主应力集中情况。隧道围岩的最小主应力分布较为均匀，对隧道围岩无较大影响，但相对比较，隧道围岩拱腰处发生最小主应力集中现象可能性较大。

由图11可知，当充水溶洞距离隧道围岩拱腰2 m时，最大孔隙水压力位于拱肩、拱顶、拱底处，最大应力值为0.85 MPa；当溶洞位于拱腰时，以拱腰处的孔隙水压力最小，总体随充水溶洞与隧道间距离增大而产生不规则波动，先增加后减小；其余监测点的孔隙水压力值相近，均随充水溶洞与隧道间距离改变先无明显变化后降低到某数值。

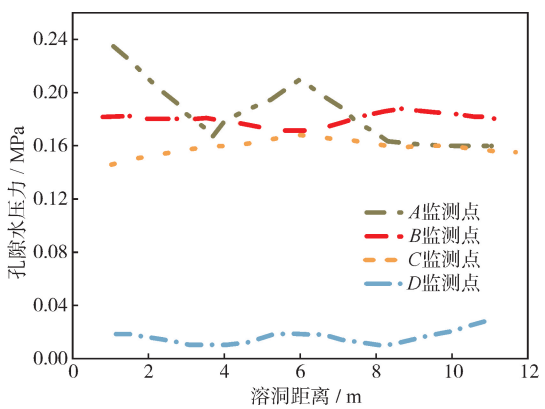


图11 孔隙水压随溶洞距离增大的规律（拱腰）

Fig. 11 Pore water pressure changing with the increase of karst cave distance (haunch)

4 结 论

本文以某岩溶隧道为研究对象，结合岩溶隧道围岩发育特点，采用ABAQUS软件建立了岩溶围岩岩体水力分析模型，模拟计算出溶洞距离、开挖步和两种不利因素对隧道围岩应力、位移和孔隙水压力随距离变化的规律，讨论其对岩溶隧道围岩防突层厚度的影响，得出如下主要结论：

（1）由溶洞位于拱顶、拱腰两种位置下的应力、位移和孔隙水压变化规律可得：隧道拱顶和拱底为围岩最多破坏点，在渗流和隧道开挖的双重影响下，由于围岩本身存在一定的节理裂隙，极有可能发生应力集中现象，造成岩体剪切破坏。并且随着溶洞与隧道间距离的减小，隧道围岩的应力、位移和孔隙水压发生骤变，此时围岩极有可能发生失稳，甚至发生突水灾害，需加以重视。

（2）考虑隧道开挖和渗流影响，隧道与溶洞间的塑性区域与隧道防突层发生突水破坏之间的关系如下：溶洞位于拱腰时，塑性区最大变形发生在岩溶隧道防突岩层中心，当溶洞距离隧道拱腰4 m时，溶洞和隧道的塑性区相交，孔隙水压、位移和应力发生变化，说明破坏机制正在发生，此时岩溶引水隧道临界防突层厚度约为或者小于4 m；当溶洞内水压相同且溶洞与隧道距离相同，溶洞位于隧道拱腰处的塑性区变化更明显。

（3）针对岩溶隧道围岩存在充水溶洞的情况，根据溶洞位于隧道拱顶和拱腰两种数值模型，由溶洞与隧道不同间距下的围岩应力、位移及孔隙水压的变化规律可得：溶洞位于拱腰对隧道围岩稳定性的影响更大；当溶洞与隧道间的距离越接近或者小于隧道临界防突层厚度，隧道围岩稳定性越差。

（4）本文采用ABAQUS软件研究岩溶隧道突水灾害过程及围岩稳定性，将隧道简化为直墙半圆拱形，假定隧道左右两边应力、位移、孔隙水压值对称，对隧道围岩防突层厚度具有一定的工程指导意义，但实际工程中隧道模型较为复杂，隧道两边应力、位移、孔隙水压力不同，因此还需建立更符合实际工程的隧道模型，分析并总结隧道围岩左右两边的监测点的应力、位移、孔隙水压的规律，根据地质超前预测成果，合理确定防突岩层的安全厚度，为预防岩溶地区隧道突水灾害奠定基础。

参考文献

[1] 冯雪冬，周小龙，胡亚晴.岩溶地区隧道突涌水机理

的研究进展[J]. 武汉工程大学学报，2022，44(3)：250-259，354.

[2] 雷霆，关欣，洪帆，等.顶部溶洞水压对隧道突涌水灾害影响的数值分析[J]. 隧道建设，2017，37(2)：167-173.

[3] 邬立，万军伟，陈刚，等.宜万铁路野三关隧道“8.5”突水事故成因分析[J]. 中国岩溶，2009，28(2)：212-218.

[4] 李利平，朱宇泽，周宗青，等.隧道突涌水灾害防突厚度计算方法及适用性评价[J]. 岩土力学，2020，41(增刊1)：41-50，170.

[5] 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.

[6] 孙谋，刘维宁.高风险岩溶隧道掌子面突水机制研究[J]. 岩土力学，2011，32(4)：1175-1180.

[7] 金圣杰.三都隧道施工涌水量的动态预测研究[D]. 成都：成都理工大学，2012.

[8] 王廷伯.宁波象山港海底隧道方案比选研究[D]. 西安：长安大学，2007.

[9] LAI Y B，WANG M S，BAI C G. Numerical simulation method of safe distance between concealed karst cave and tunnel based on energy cata strophe[J]. Applied Mechanics & Materials，2013，353/354/355/356：1470-1474.

[10] LAI Y B，WANG M S，YOU X H. Numerical simulation of safe distance between concealed karst cave and tunnel based on shear strength reduction method safety factor catastrophe [J]. Applied Mechanics & Materials，2014，501/502/503/504：1753-1756.

[11] 周毅，李术才，李利平.隧道充填型岩溶管道渗透失稳突水机制三维流－固耦合模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2015，34(9)：1739-1749.

[12] 周宗青，李利平，石少帅，等.隧道突涌水机制与渗透破坏灾变过程模拟研究[J]. 岩土力学，2020，41(11)：3621-3631.

[13] 黄明利，王飞，路威，等.隧道开挖诱发富水有压溶洞破裂突水过程数值模拟[J]. 中国工程科学，2009，11(12)：93-96.

[14] ZHONG D H，TONG D W. 3D finite element simulation of tunnel boring machine construction processes in deep water conveyance tunnel [J]. Transactions of Tianjin University，2009，15(2)：101-107.

[15] YU M L，ZUO J P，SUN Y J，et al. Investigation on fracture models and ground pressure distribution of thick hard rock strata including weak interlayer[J]. International Journal of Mining Science and Technology，2022，32(1)：137-153

本文编辑：张　瑞