

张桥.小三峡岩溶隧道围岩防突层安全厚度有限元分析[J].中国岩溶,2020,39(4):614-621.
DOI:10.11932/karst2020y33

小三峡岩溶隧道围岩防突层安全厚度有限元分析

张桥

(渝黔铁路有限责任公司,重庆400014)

摘要:针对小三峡隧道岩溶发育的工程地质特征,采用有限元方法建立典型隧道断面数值计算模型,分析充水溶洞位于隧道不同方位、不同距离时隧道围岩位移和塑性区变化规律,并结合围岩的位移变化情况和塑性区分布情况作为评价隧道围岩突水的判据,得出防止隧道围岩突水的岩层最小安全厚度。研究表明:在岩溶水压力作用下,当洞径比一定时,随着溶洞逐渐远离隧道,溶洞对隧道的的影响在逐渐减弱;当洞径比一定时,溶洞直径越大对隧道的的影响越明显;同时根据围岩的位移和塑性区计算结果得到了隧道围岩最小防突厚度。研究成果可为小三峡隧道安全施工提供技术支持。

关键词:岩溶隧道;充水溶洞;工程地质;突水;有限元方法

中图分类号:U455.49 文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2020)04-0614-08 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

随着我国经济的发展,基础交通网络向我国西南山区展开,隧道建设成为了其中重要的一环,而在西南云贵川渝地区,岩溶地貌极其发育,其影响已成为隧道工程建设中亟待解决的关键工程地质问题之一。特别是充填高压富水溶洞,由于其可能通过岩溶管道与地下暗河连通,一旦在开挖卸荷扰动下隧道围岩产生破裂导致突水现象,对隧道工程和施工人员人身安全都会产生非常严重的威胁^[1],如宜万铁路岩溶地区野三关隧道^[2-3]和马鹿箐隧道^[4-6],均在施工过程中发生严重的突水突泥事故,造成重大的经济损失和人员伤亡。

鉴于此,国内学者针对岩溶地区隧道工程已开展了有关岩溶隧道围岩突水形成机制的理论和试验研究工作,如:山东大学李术才团队^[7-11]总结了岩溶隧道突水、突泥的构造分类和形成机理,系统地研究

了岩溶隧道突水最小安全厚度的计算方法,并针对典型岩溶隧道进行了分析预测,所得研究成果对指导岩溶隧道施工具有积极的指导意义;郭佳奇等^[12-14]基于断裂力学理论,分析了岩溶隧道围岩压剪破坏的临界水压力,得出了岩溶隧道不发生突水的最小安全厚度计算公式,研究成果对预测岩溶隧道突水层厚度确定具有重要的理论意义;黄鑫等^[15]考虑水动力条件、不良地质情况、防突厚度及围岩特征等因素,建立了岩溶隧道现场突水突泥快速判定方法;王德明等^[16]通过三维地质力学模型试验研究了断层破碎带隧道开挖过程中时效响应规律及其对隧道突水突泥的影响;黄震等^[17]以工程活动的扰动作为主要考虑因素,研究了工程活动造成围岩损伤以及损伤围岩渗透性对于隧道突水的影响,得到了岩溶隧道围岩注浆防护厚度和渗透性的最优值。在上述研究中,研究人员主要针对岩溶隧道突水突泥机理展开研究,所得研究成果对岩溶隧道工程实践有一定的

基金项目:重庆市社会民生科技创新专项项目(CSTC2015SHMSZX30005)

作者简介:张桥(1983—),男,河南信阳人,硕士,高级工程师,主要从事高速铁路岩土工程领域研究。E-mail:23590194@qq.com。

收稿日期:2019-07-13

理论指导意义,但是由于隧道围岩中溶洞分布各不相同的,因此针对隧道工程的岩溶问题应结合前期工程地质勘查具体问题具体分析。

郑万铁路重庆段属构造剥蚀、侵蚀低中山区,穿越巫山、齐岳山等山脉。由于需穿越齐岳山山脉,沿线岩溶不良地质极其发育,地表岩溶形态包括溶沟、溶蚀裂隙、石芽、落水洞、溶蚀漏斗、溶蚀洼地、岩溶槽谷、岩溶峡谷等,地下岩溶形态包括地下暗河、溶洞等^[18-20]。小三峡隧道作为郑万铁路重庆段的控制性工程,前期工程地质勘查已探明隧址区岩体破碎、岩溶发育,地下水丰富,在隧道工程建设过程中极有可能遇到大型充水溶洞,对隧道工程建设和施工人员人身安全存在重大威胁。为此,针对小三峡隧道工程,选取典型隧道断面,采用有限元方法建立数值计算模型,考虑隧道周边存在大型充水溶洞的情况,假定充水溶洞与隧道之间间隔不同距离,分析充水溶洞对隧道围岩的影响,最终确定小三峡隧道岩溶突水的防突层安全厚度,为指导小三峡隧道及类似岩溶隧道工程施工提供指导。

1 工程概况

郑万铁路重庆段正线全长 183.865 km,桥隧比达 98.1%,沿线自湖北巴东县引入,经巫山、奉节、云阳,最后至万州,其中为重庆段全线最长隧道,全长达 18.954 km,最大埋深为 890 m。隧道工程选址位于奉节县与巫山县接壤地带,其地形地貌受构造、岩性控制明显,总体地貌为岩溶侵蚀地貌,隧址区内局部上覆第四系全新统地层,基岩大多裸露。主要发育地址构造有齐耀山背斜、巴务河向斜、七里堰背斜等。隧道选址区岩溶主要沿断层带、背斜轴部一带发育,并在可溶岩与非可溶岩接触部位岩溶发育相对集中。隧道洞身段地下水主要以基岩裂隙水和岩溶水为主,基岩类型水不发育,主要以滴水—淋水为主,岩溶水发育,主要以岩溶泉、暗河、岩溶管道形式存在。

小三峡隧道穿越的岩体大部分为Ⅳ级围岩的灰岩和白云质灰岩,且围岩岩体被两组节理面切割,两组节理面的产状分别为 J1 倾角 78°、倾向 164°,节理密度 3 条/m; J2 倾角 82°、倾向 82°,节理密度 3 条/m。小三峡隧道典型断面如图 1 所示。

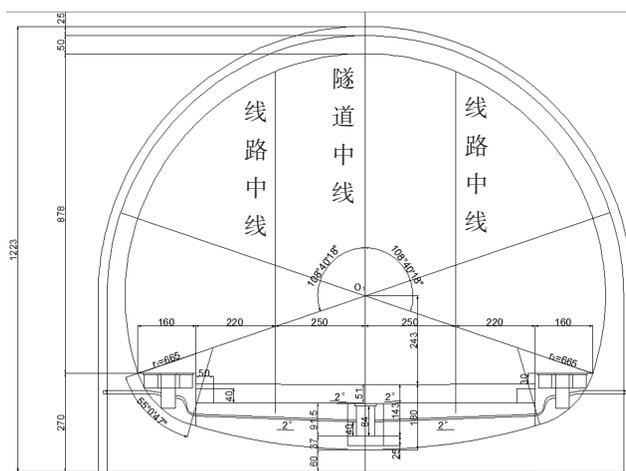


图1 隧道典型断面图

Fig. 1 Typical cross section of tunnel

2 典型隧道有限元模型的建立

2.1 模型范围及边界条件

在采用有限元软件建立隧道断面几何模型时,为了建模方便,将图 1 所示典型隧道断面按面积等效近似为直径 15.0 m 的圆形断面;隧道附近的充水溶洞同样按圆形进行等效处理,但由于溶洞大小需在开挖过程中通过超前地质预报方法进行确定,在此计算时先假定隧道开挖过程中遇到的溶洞直径,再进行力学分析。

为了尽量消除边界效应的影响,一般要求隧道模型尺寸应不小于隧道开挖直径的 3~5 倍^[21],在此建立几何模型时边界范围取值为,水平向长度×竖直向长度=200 m×200 m,满足上述要求。

模型边界条件包括位移边界和应力边界两方面。其中,模型位移边界条件设置如下:

(1)模型顶面为自由边界;

(2)模型左右两侧与底部同时施加水平方向、竖直方向位移边界约束条件;

(3)隧道洞室内边界和充水溶洞边界按位移自由边界考虑。

模型应力边界条件设置如下:

(4)隧道洞室内边界按应力自由边界考虑;

(5)充水溶洞边界、应力边界按静水压力考虑,根据前期地质勘查报告考虑充水溶洞边界上作用 2.0 MPa 的静水压力。有限元模拟时静水压力采用压力水头,将设定的压力水头施加在溶洞边界节点处。

2.2 参数设置

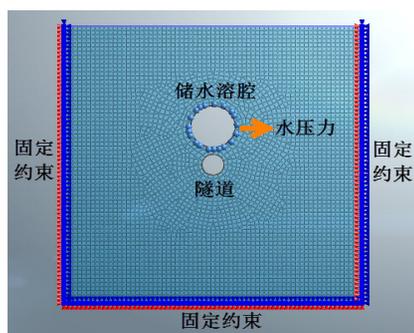
小三峡隧道进口及洞身段大部分是穿越Ⅳ级围岩岩体,根据前期地质勘察报告中提供的Ⅳ类围岩物理力学参数,同时考虑节理对岩体强度的弱化作用,将隧道围岩等效为各向同性均质体,其物理力学参数如表1所示。同时,在进行有限元计算时假定等效均质岩体服从Drucker-Prager屈服准则。

表1 岩石基本力学参数

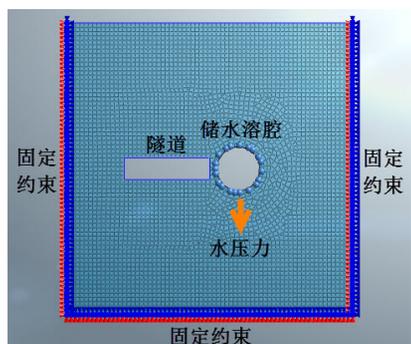
Table 1 Basic mechanical parameters of rock

弹性模量/GPa	天然容重/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	粘聚力/MPa	内摩擦角/ $^{\circ}$	泊松比
17.4	25	3.5	58	0.26

有限元模型划分网格时先采用自动划分方式,再对隧道洞室和溶洞周边进行网格细分,最终划分网格后模型共有4 401个单元,划分网格后的有限元模型如图2所示。



(a) 溶洞位于隧道正上方顶部



(d) 溶洞位于掌子面正前方

图2 岩溶隧道有限元数值计算模型

Fig. 2 Finite element model of karst tunnel

2.3 计算工况设置

为了分析隧道开挖溶洞突水现象,首先作如下假定:

(1)假定溶洞经过长期溶蚀已基本稳定,溶洞内完全被岩溶水充满,且溶洞洞壁为不透水层(若岩溶洞壁为透水层,则隧道开挖后,突水自然发生);

(2)由于小三峡隧道洞身处溶洞大小和分布情况并未精确探明,而根据隧址区地表溶洞踏勘结果发现存在多处溶洞,高度为10~20 m之间,因而在此建立数值计算模型时参考地表溶洞勘查结果设置溶洞直径分别为5 m、10 m、15 m、20 m、25 m和30 m六种情况;

(3)根据文献[22]的研究成果,当溶洞位于隧道顶部时,围岩位移要大于溶洞位于隧道底部和侧方的情况,因而在进行分析时,将溶洞位于隧道顶部正上方以及隧道掌子面正前方两种情况考虑为最不利位置情况;

(4)根据刘超群等^[23]的研究成果,围岩安全厚度上限值 L_{\max} 与隧道洞径 D 之间存在如下经验关系式:

$$L_{\max} = 1.11073D + 0.20195R = 0.932 \quad (1)$$

将 $D=15.0$ m代入式(1)可得 $L_{\max}=16.8$ m,在有限元模型计算时将隧道与溶洞之间的初始距离 L_0 设置为1 m,并按每次2 m的距离递增,而具体计算工况汇总如表2所示。其中,洞径比是指溶洞直径 R 与隧道洞径 D 的比值。按照上述工况设置,在进行有限元数值模拟计算,共进行76组计算。

表2 计算工况

Table 2 Calculation conditions of finite element analyses

洞径比	溶洞到隧道的距离 L/m							
1/3	1	3	5	7	—	—	—	—
2/3	1	3	5	7	9	—	—	—
1	1	3	5	7	9	11	—	—
4/3	1	3	5	7	9	11	13	—
5/3	1	3	5	7	9	11	13	15
2	1	3	5	7	9	11	13	15

3 计算结果及分析

根据表2所示计算工况,采用非线性静力分析方法进行计算,计算过程中监测圆形隧道拱顶和掌子面中心点处的位移情况,得到不同工况下监测点位移随距离 L 的变化规律,以及隧道围岩塑性区随距离 L 的发展规律,并由此确定在不同工况下隧道围岩防突层安全厚度。

3.1 充水溶洞对隧道围岩位移的影响

不同工况下,隧道拱顶和掌子面中心点位移计

算结果汇总于表 3 和表 4, 由此得到隧道拱顶和掌子面中心点位移随溶洞与隧道间距 L 的变化规律(图 3、图 4)。由图可知:

表 3 溶洞位于隧道正上方时的隧道拱顶位移(单位:mm)

Table 3 Tunnel vault displacement when karst cave is above tunnel

洞径比	距离 位移	溶洞到隧道的距离/m							
		1	3	5	7	9	11	13	15
1/3		2.44	1.42	0.73	0.59				
2/3		4.72	3.43	1.83	0.86	0.3			
1		6.06	4.64	3.13	2.15	1.19	0.68		
4/3		8.4	6.61	5.22	3.83	2.33	0.72	0.4	
5/3		9.56	8.56	6.09	5.15	3	1.44	1.04	0.46
2		10.8	8.05	7.24	5.15	4.09	2.91	1.32	0.72

表 4 溶洞位于掌子面正前方时掌子面中心点位移(单位:mm)

Table 4 Midpoint displacement of palm face when karst cave is at front

洞径比	距离 位移	溶洞到隧道的距离/m							
		1	3	5	7	9	11	13	15
1/3		1.65	1.27	0.77	0.64				
2/3		3.28	2.3	1.61	0.93	0.61			
1		5.31	4.04	3.29	2.37	0.81	0.56		
4/3		6.77	4.88	4.34	2.47	1.71	1.06	0.83	
5/3		7.56	7.27	6.26	5.38	2.13	1.71	0.9	0.38
2		9.02	6.87	4.77	4.22	3.81	1.81	0.96	0.39

(1) 当溶洞位于隧道正上方时, 若隧道与溶洞的距离 L 一定时, 隧道拱顶位移随洞径比 R/D 呈增大趋势, 说明溶洞大小对隧道拱顶位移影响显著;

(2) 当溶洞位于隧道正上方时, 若溶洞的洞径比 R/D 一定时, 即溶洞尺寸一定时, 随着溶洞到隧道的距离 L 增大, 隧道拱顶位移呈现显著减小趋势;

(3) 当溶洞位于隧道掌子面正前方时, 掌子面中心点位移随溶洞到隧道距离 L 的变化规律与溶洞位于隧道正上方时的变化规律类似;

(4) 当溶洞洞径比 R/D 以及溶洞到隧道距离 L 一定时, 溶洞位于隧道正上方时的隧道拱顶位移均大于溶洞位于隧道掌子面正前方时的掌子面中心点位

移, 如: 当溶洞洞径比为 2、溶洞到隧道距离 $L=1$ m 时, 充水溶洞在隧道正上方时产生的拱顶沉降为 10.8 mm, 而对应充水溶洞在隧道正前方时的掌子面中心点位移为 9.02 mm, 这主要是由于当溶洞位于隧道正上方时, 充水溶洞本身的静水压力对拱顶围岩产生显著作用, 加剧了拱顶位移的发展, 而当充水溶洞位于掌子面正前方时, 静水压力对掌子面中心点位移的影响相对较小。

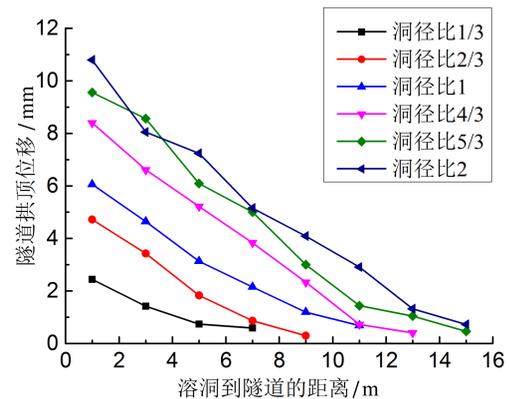


图 3 充水溶洞位于隧道正上方时隧道拱顶位移随溶洞到隧道距离 L 的变化曲线图

Fig. 3 Displacement change of tunnel vault with distance of cave to tunnel L when water-fill karst cave is above tunnel

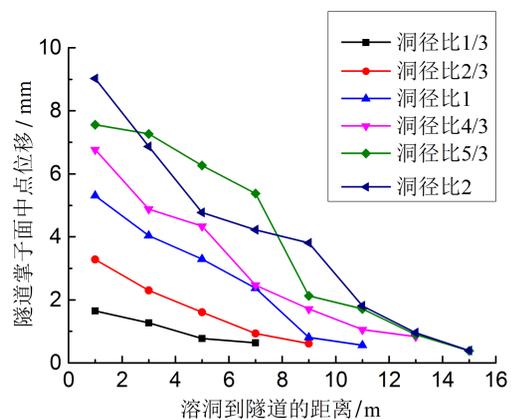


图 4 充水溶洞位于掌子面正前方时隧道掌子面中心点位移随溶洞到隧道距离 L 的变化曲线图

Fig. 4 Displacement change of tunnel face midpoint with distance of cave to tunnel when karst cave in front of tunnel face

3.2 充水溶洞对隧道围岩塑性区的影响

为了分析充水溶洞对隧道围岩塑性区的影响, 首先定义隧道塑性区相对深度为溶洞到隧道拱顶或

隧道掌子面垂直距离范围内的塑性区大小与距离 L 的比值。不同工况下隧道塑性区相对深度计算结果汇总见表5、表6。需要说明的是:由于模拟过程中对模型施加的荷载主要是充水溶洞的静水压力,因此围岩中的塑性区首先从溶洞边界处开始出现,并逐渐往隧道临空面发展,因而在上述塑性区相对深度定义中塑性区大小是指从溶洞边界处往隧道边界方向的直线距离。

表5 充水溶洞位于隧道正上方时围岩塑性区相对深度

Table 5 Relative depth of plastic zone in country rock when water-fill cave is above tunnel

R/D	溶洞到隧道的距离 L/m							
	1	3	5	7	9	11	13	15
1/3	贯通	贯通	0.38	0.12	—	—	—	—
2/3	贯通	贯通	贯通	0.36	0.19	—	—	—
1.0	贯通	贯通	贯通	0.55	0.24	0.1	—	—
4/3	贯通	贯通	贯通	贯通	0.78	0.17	—	—
5/3	贯通	贯通	贯通	贯通	贯通	贯通	0.15	0.08
2.0	贯通	贯通	贯通	贯通	贯通	贯通	贯通	0.62

表6 充水溶洞位于掌子面正前方时塑性区相对深度

Table 6 Relative depth of plastic zone in country rock when water-fill cave is in front of palm

R/D	溶洞到隧道的距离 L/m							
	1	3	5	7	9	11	13	15
1/3	贯通	贯通	0.28	0.06	—	—	—	—
2/3	贯通	贯通	贯通	0.27	0.15	—	—	—
1.0	贯通	贯通	贯通	0.28	0.16	0.09	—	—
4/3	贯通	贯通	贯通	贯通	0.18	0.12	0.07	—
5/3	贯通	贯通	贯通	贯通	贯通	0.25	0.12	0.07
2.0	贯通	贯通	贯通	贯通	贯通	贯通	贯通	0.17

由表可知:当洞径比 R/D 一定时,围岩塑性区相对深度随距离 L 的增加而呈现减小的趋势,且当洞径比较小时,塑性区相对深度在距离 L 达到一定值时将趋近于零;当溶洞与隧道之间的距离 L 一定时,塑性区相对深度随洞径比的增大而增大,并在某一洞径时出现塑性区贯通;当 $L \leq 3.0$ m时,不管洞径比如何变化,溶洞与隧道间的围岩塑性区都是贯通的。

为了进一步说明溶洞与隧道间距离 L 对围岩塑

性区的影响,以充水溶洞直径为30 m的情况为例,分析充水溶洞对隧道围岩塑性区相对深度的影响。当充水溶洞直径为30 m时,在充水溶洞位于隧道正上方和充水溶洞位于隧道掌子面正前方两种情况下,溶洞距离隧道不同距离时的塑性区云图如图5、图6。由图可知:

(1)在充水溶洞静水压力作用下,隧道围岩中的塑性区首先在溶洞周边产生,并不断向隧道临空面方向发展;

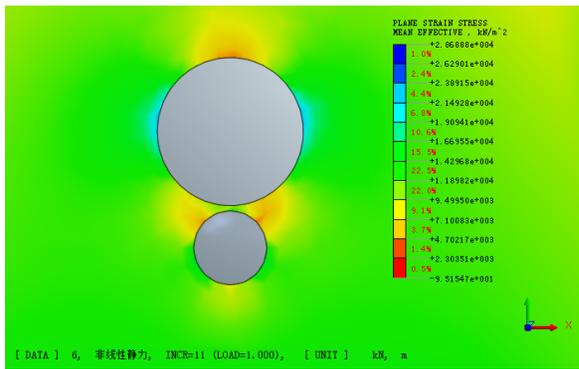
(2)当溶洞距离隧道较远时,隧道和溶洞之间围岩厚度较大,高压充水溶洞周边围岩塑性区较明显,而在隧道与溶洞连接方向上,塑性区的发展不明显,但能够发现塑性区有往该方向发展的趋势,且当溶洞位于掌子面正前方时,塑性区发展趋势更加明显(图6d);但随着溶洞与隧道之间的距离逐渐减小,两者之间围岩厚度逐渐减小,围岩塑性区有贯通的趋势;

(3)当溶洞位于隧道正上方时,随着溶洞到隧道拱顶距离的增大,溶洞和隧道之间的围岩塑性区影响相对深度呈减小趋势,即:当距离 $L=1.0$ m时,塑性区从溶洞底部朝隧道两侧拱肩位置发展,并最终形成贯通的塑性区(图5a);随着距离 L 的增加,围岩塑性区相对深度在逐渐减小,说明围岩塑性区在朝着背离隧道临空面方向逐渐缩小,不会发生贯通,因而对隧道围岩的影响在逐渐减小,围岩发生突水的可能性也随之降低。

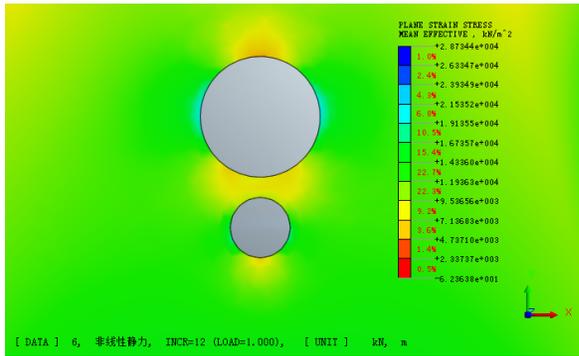
另外,当溶洞直径 $R/D < 1.0$,且离隧道距离 $L \geq D$ 时,围岩塑性区主要分布在溶洞周边,溶洞对隧道围岩塑性区不会造成很大的影响,但随着溶洞洞径比增大并逐渐靠近隧道,隧道围岩塑性区分布范围将逐渐集中分布在溶洞与隧道之间的围岩处,并最终会出现贯穿的塑性区而导致围岩破坏,隧道突水发生。

3.3 隧道围岩防突层安全厚度

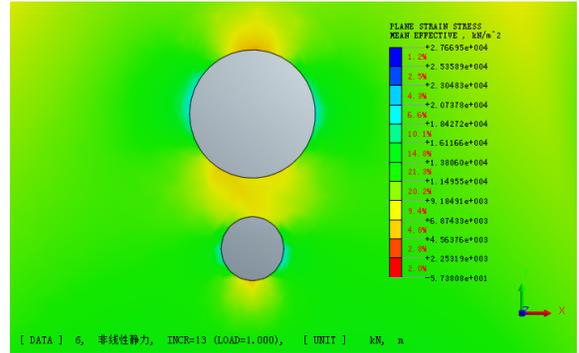
上述分析表明,充水溶洞与隧道之间存在一个临界距离 L_{min} ,即:当 $L=L_{min}$ 时,在溶洞静水压力作用下隧道与溶洞之间的围岩塑性区刚好贯通,此时围岩是稳定的,不会发生突水、突泥现象,此临界距离 L_{min} 即为隧道围岩防突层安全厚度。根据数值模拟计算结果得到不同洞径比情况下,隧道围岩防突层安全厚度汇总如表7。由表7可知:当洞径比一定时,溶洞位于隧道拱顶正上方时,防突层安全厚度要稍大于



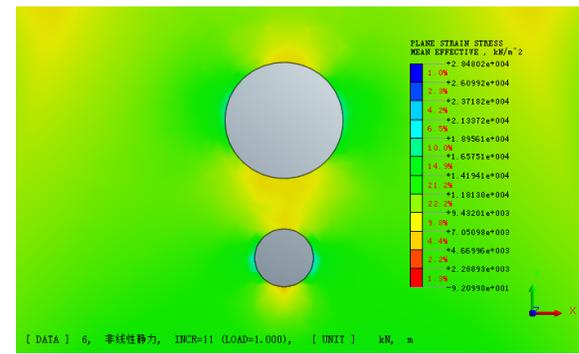
(a) $L=1$ m



(b) $L=5$ m

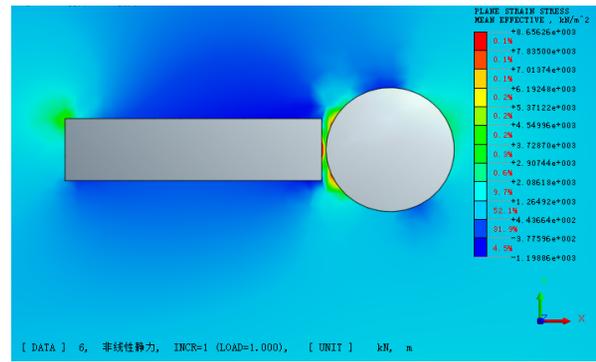


(c) $L=9$ m

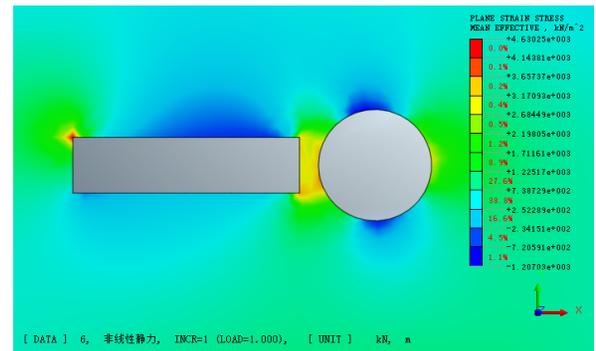


(d) $L=13$ m

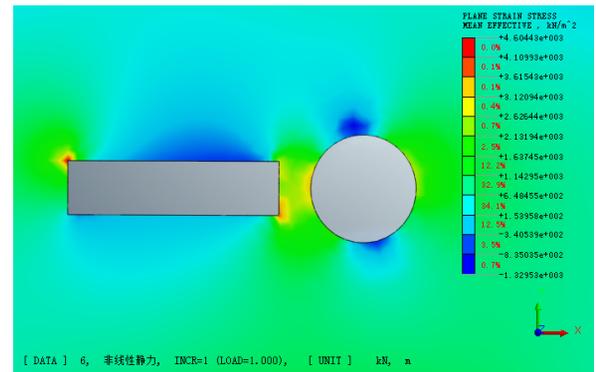
图 5 溶洞位于隧道正上方不同位置时的塑性区云图
Fig. 5 Cloud diagram of plastic zones when karst cave is at different positions above tunnel



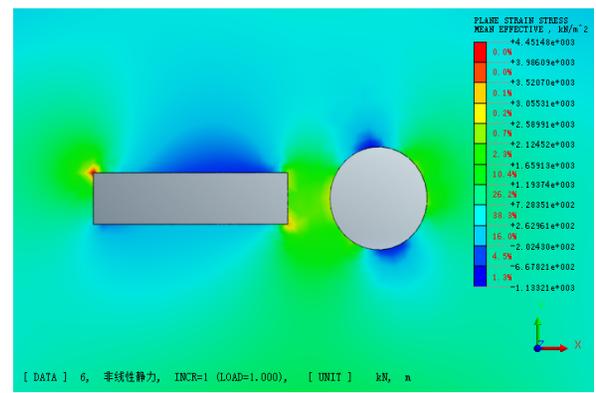
(a) $L=1$ m



(b) $L=5$ m



(c) $L=9$ m



(d) $L=13$ m

图 6 溶洞位于掌子面正上方不同位置时的塑性区云图
Fig. 6 Cloud diagram of plastic zones when karst cave is at different positions above the palm face

溶洞位于掌子面正前方时相应的防突层安全厚度,这主要是由于在相同的溶洞静水压力作用下,隧道拱顶正上方围岩在自重作用下会产生一定的位移和应变,加速围岩塑性区朝隧道临空面方向发展。

表7 隧道围岩防突层安全厚度计算结果

Table 7 Calculation results of minimum intrush prevention thickness of surrounding rocks

洞径比	溶洞位于隧道	溶洞位于掌子面
	顶部/m	正前方/m
1/3	3	3
2/3	5	5
1	7	5
4/3	9	7
5/3	13	9
2	15	13

4 结 论

本文以郑万铁路小三峡岩溶隧道为研究对象,采用数值模拟方法建立隧道典型断面有限元分析模型,研究溶洞分别位于隧道拱顶正上方和掌子面正前方两种最不利情况下,溶洞与隧道之间间隔不同距离时隧道围岩的位移和塑性区发展情况,确定岩溶隧道围岩防突层安全厚度,得出如下主要结论:

(1)当隧道与溶洞的距离 L 一定时,隧道拱顶位移和掌子面中心点位移均随洞径比 R/D 呈增大趋势;而当溶洞洞径比 R/D 一定时,随着溶洞到隧道的距离 L 增大,隧道拱顶位移和掌子面中心点位移均呈现显著减小趋势;

(2)当溶洞洞径比 R/D 一定时,隧道围岩塑性区相对深度随距离 L 的增加而呈现减小的趋势,且当洞径比较小时,塑性区相对深度在距离 L 达到一定值时将趋近于零;当溶洞与隧道之间的距离 L 一定时,隧道围岩塑性区相对深度随洞径比的增大而增大,并在某一洞径时出现塑性区贯通;

(3)根据隧道围岩塑性区发展规律数值计算结果,确定了小三峡隧道在不同溶洞洞径比情况下的防突层安全厚度,当洞径比一定时,溶洞位于隧道拱顶正上方时的防突层安全厚度要稍大于溶洞位于掌子面正前方时相应的防突层安全厚度。

(4)需要说明的是,本文研究成果是基于假定的

溶洞尺寸大小以及溶洞与隧道间的距离形成的,提出的隧道围岩防突层安全厚度对小三峡隧道施实践具有一定的指导意义,但是,实际施工现场应结合超前地质预报结果来综合设置围岩防突层安全厚度。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 郭立, 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.
- [3] 张梅, 张民庆, 孙国庆. 宜万铁路野三关隧道高压富水充填岩腔溃口处理技术[J]. 铁道工程学报, 2010, (3): 81-86.
- [4] 张民庆, 黄宏健, 张生学等. 宜万铁路马鹿箐隧道1.21突水突泥抢险治理技术[J]. 铁道工程学报, 2008, (11): 49-56.
- [5] 张梅, 肖广智. 宜万铁路马鹿箐隧道进口泄水洞贯通溶洞施工技术[J]. 现代隧道技术, 2008, 45(6): 70-75.
- [6] 杨兵. 宜万铁路马鹿箐隧道岩溶灾害的工程处治技术[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(3): 581-586.
- [7] 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剖析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1041-1069.
- [8] 李术才, 王康, 李利平, 等. 岩溶隧道突水灾害形成机理及发展趋势[J]. 力学学报, 2017, 49(1): 22-30.
- [9] 李术才, 潘东东, 许振浩, 等. 承压型隐伏溶洞突水灾变演化过程模型试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(9): 3164-3173.
- [10] 李术才, 林鹏, 许振浩, 等. 基于条分法原理的充填型岩溶蓄水构造突水突泥最小安全厚度[J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 1989-1994.
- [11] 李术才, 石少帅, 李利平, 等. 三峡库区典型岩溶隧道突涌水灾害防治与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1887-1896.
- [12] 郭佳奇, 李宏飞, 徐子龙. 岩溶区隧道突水灾害防治原则及治理对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(3): 56-61.
- [13] 郭佳奇, 陈建勋, 陈帆等. 岩溶隧道断续节理掌子面突水判据及灾变过程[J]. 中国公路学报, 2018, 31(10): 118-129.
- [14] 郭佳奇, 李宏飞, 陈帆等. 岩溶隧道掌子面防突厚度理论分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(5): 1373-1380.
- [15] 黄鑫, 林鹏, 许振浩, 等. 岩溶隧道突水突泥防突评判方法及其工程应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(10): 2533-2544.
- [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.
- [17] 黄震, 朱术云, 赵奎, 等. 工程活动诱发的围岩结构变化对隧道突涌水的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(3): 449-458.
- [18] 邓谊明. 宜万铁路大型岩溶洞穴发育特征及整治[J]. 铁道工程学报, 2011, (4): 58-66.

- [19] 骆文学. 宜万铁路齐岳山隧道 629 高压充水溶腔处理技术[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(4): 116-121.
- [20] 郭佳奇, 王光勇, 任连伟. 宜万铁路岩溶地质特征及其发育模式[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(2): 72-78.
- [21] 彭立敏, 施成华. 隧道工程(第二版)[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2017.
- [22] 赖金星, 汪珂, 邱军领. 溶洞位置对隧道结构影响的数值模拟研究[J]. 公路, 2015(8): 275-280.
- [23] 刘超群, 彭红君. 隧道掌子面与溶洞安全距离分析[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(3): 109-113.

Finite element analysis on safety thickness of the inrush prevention layer in rock beds of the small Three Gorges karst tunnel

ZHANG Qiao

(Yu-Qian Railway Co. Ltd., Chongqing 400014, China.)

Abstract In view of the geotechnical characteristics of the karst in the small Three Gorges tunnel, the finite element method is used to establish a numerical calculation model of a typical tunnel section to analyze the variation laws of tunnel surrounding rock displacement and plastic zones when the water filled karst cave is located in different directions and distances of the tunnel. Then in combination with the displacement change of surrounding rock and the distribution of plastic zones, the minimum safe thickness of the rock layer to prevent water inrush from the surrounding rock of the tunnel is determined. The research results show that under the action of karst water pressure, when the cavity diameter ratio is fixed, the influence of the karst cave on the tunnel is gradually weakened as the cave gradually moves away from the tunnel. When the interval diameter ratio is fixed, the larger the diameter of the karst cave, the more obvious the influence on the tunnel. At the same time, according to the displacement of surrounding rock and the calculation results of plastic zones, the minimum inrush prevention thickness of the tunnel surrounding rock is obtained. The research results can provide technical support for the safe construction in the small Three Gorges karst tunnel.

Key words karst tunnel, water-filled karst cave, water inrush, finite element method

(编辑 张玲)