

考虑压力溶腔影响的岩溶隧道围岩稳定性分析

张毅^{1,2}, 王琪³

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 河南省收费还贷高速公路管理中心, 河南 郑州 450000; 3. 河南省三门峡至浙川高速公路项目有限公司, 河南 三门峡 472200)

摘要: 岩溶地区的富水压力溶腔常常对隧道施工安全造成不利影响。为研究岩溶溶腔对隧道施工过程中围岩及支护受力的影响, 依托某岩溶隧道, 采用 Flac3D 有限元方法系统开展了不同工况的数值试验研究, 主要考虑溶腔大小、溶腔位置及溶腔压力 3 因素影响, 分析了不同工况下围岩受力变形、围岩应力及支护受力情况。结果表明: 岩溶隧道溶腔会引起隧道施工过程中围岩收敛变形和应力增大, 溶腔大小、溶腔位置及溶腔压力均会对收敛变形和应力产生影响, 溶腔越大、溶腔存在压力会造成靠近溶腔测点的收敛变形和应力值明显增加, 溶腔位于拱顶时对隧道整体受力影响最大, 溶腔位于边墙时对隧道影响次之, 溶腔位于仰拱时对隧道影响最小; 溶腔的存在会对初支受力造成不利影响, 引起溶腔近侧初支应力重分布, 建议加强溶腔施工段初支整体强度。

关键词: 岩溶隧道; 溶腔; 围岩稳定性; 支护; 数值分析

中图分类号: U455 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2018)04-0208-05

Surrounding rock stability analysis in karst tunnel considering pressure dissolving cavity

ZHANG Yi^{1,2}, WANG Qi³

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Henan Province Highway Management Center of Toll and Loan, Zhengzhou 450000, China; 3. The Sanmenxia to Xichuan Highway Projects Co., Ltd of Henan Province, Sanmenxia 472200, China)

Abstract: The pressure dissolving cavity in karst area is often disadvantageous to the safety of tunnel construction. For the study of karst cavity effect on the construction process of the tunnel surrounding rock and the supporting force, relying on a system of karst tunnel, using Flac3d finite element method to carry out numerical experiments on different conditions, we mainly considered the cavity size, cavity position and cavity pressure effects of the three factors, and analyzed the surrounding rock deformation under different conditions and the stress of surrounding rock and supporting force. The results show that the karst tunnel cavity will cause the deformation of surrounding rock convergence of tunnel construction process and stress increase. The cavity size, cavity position, and cavity pressure can affect the deformation converge and cavity pressure. The greater the cavity will cause near the convergence point and deformation value increased stress. Cavities located at the vault of the tunnel had the greatest impact, followed by the cavities located in the side wall of the tunnel effect. The cavity located in the arch of the tunnel cavity has a minimal impact. The existence of cavity affect the initial supporting force caused by cavity proximal early stress redistribution; therefore, we recommend that to strengthen the primary overall support strength of the cavity construction section.

Key words: karst tunnel; cavity; surrounding rock stability; support; numerical analysis

1 研究背景

岩溶地貌是我国西南地区分布最广泛的类型之

一, 在这些地区修建隧道时需要着重关注隧道施工安全问题。研究表明, 岩溶地貌多分布有富水溶腔, 隧道施工过程中稍有不慎就可能发生溶腔坍塌、突泥涌

收稿日期: 2018-03-18; 修回日期: 2018-04-09

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研项目(20110205110003)

作者简介: 张毅(1984-), 男, 河南郑州人, 博士研究生, 主要从事岩土与隧道工程方面的研究。

水等灾害,严重威胁施工人员的人身安全^[1]。隧道施工安全主要与围岩受力变形相关^[2],关于岩溶地区的隧道施工安全问题,学者们也已经做了大量的研究^[3-7],张玉伟等^[8]假定溶腔处于拱顶上方,考虑溶腔压力建立了简化力学模型,基于结构力学和变分原理分析了防突层最小安全厚度;莫阳春等^[9]假定隧道仰拱处存在溶洞,采用 Flac3D 分析了溶腔存在对围岩稳定性的影响;李利平等^[10]提出了岩溶隧道裂隙水突水机制,考虑岩溶隧道常见施工病害,提出了注浆治理措施^[11];郭佳奇等^[12]以常见的中小型溶腔为例,分析了隧道左侧溶腔与隧道临空面围岩的稳定性;王勇等^[13]等用支持向量机方法建立了隧道拱顶溶腔防突层的最小安全厚度分析模型;Pesendorfer^[14]等研究了岩溶地区深埋隧道的围岩裂隙水迁移规律,并分析了对隧道围岩的影响规律。

可以看出,现有文献多采用理论或数值手段研究岩溶溶腔的稳定性问题,着重关注了溶腔与隧道间防突层最小安全厚度,但是对于高压溶腔存在对隧道施工围岩整体稳定性和支护系统受力变化的影响问题关注较少,基于以上认识,本文依托某岩溶隧道实际情况,采用数值模拟手段研究溶腔大小、溶腔压力及溶腔位置对隧道施工围岩稳定性和支护受力的影响情况,系统分析各因素条件下岩溶隧道施工围岩稳定性和支护受力变形情况,研究结果可为富水岩溶地区隧道建设提供借鉴。

2 数值分析

2.1 工程概况

某隧道为贵州省道-新高速控制性工程,隧道采用上下分离的双洞型式,隧道全长为 896 m,最大埋深约 120 m,隧道穿越喀斯特岩溶地貌,隧址区揭露地层为第四系全新统残坡积(Q4el+dl)粉质黏土、碎石、块石,奥陶统湄潭组(O1 m)泥岩、泥灰岩、灰岩,勘测资料显示围岩节理较为发育,洞口段节理发育更明显。隧道上方地表水比较丰富,冲沟发育,地下水多为松散裂隙水、溶腔裂隙水、碎屑岩类孔隙裂隙水,大气降水是地下裂隙水的主要补给,钻孔勘探表明水位埋深约 1.1~45.7 m,钻孔 CSK37 发现较为发育的溶腔,内有充填物,洞径约为 1.1 m,根据工程地质调绘, YK155+700 右 67 m 发育有溶腔,常年存水, ZK156+030 右 45 m 发育无水溶洞,洞口尺寸为 5 m×2 m,深度约 5~6 m。根据隧道地质勘测资料推断,隧道穿越地层存在大小不等的溶洞,隧道地质概况见图 1 所示。

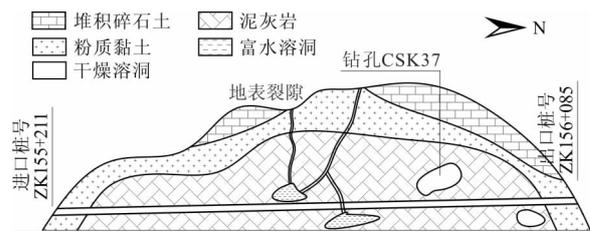


图1 隧道穿越区地质概况

2.2 模拟工况

根据依托工程条件,隧址区多发育有大小不等的溶腔,溶腔内可能存在裂隙水也可能为无水干洞。由于地层围岩中溶腔分布的随机性,隧道开挖过程可能遇到任何情况的溶腔,溶腔可能位于隧道的任何位置,因此模拟工况的制定主要考虑溶腔位置、溶腔大小和溶腔压力 3 个影响因素。溶腔位置主要考虑拱顶、边墙和仰拱处,溶腔大小分别假定断面为 4 m×4 m 和 8 m×8 m,纵向长度为 8 m,溶腔压力分别考虑无水的 0 和富水的 0.4 MPa,溶腔与隧道的相对距离取为 5 m,模拟工况见表 1 所示。为了便于数值模型建立,溶腔假定为规则形状,图 2 以拱顶处溶腔为例给出了溶腔与隧道的关系。

表1 模拟工况

工况	溶腔位置	溶腔大小/m	溶腔压力/MPa
1	拱顶	4×4	0
2	拱顶	8×8	0
3	拱顶	4×4	0.4
4	边墙	4×4	0
5	仰拱	4×4	0

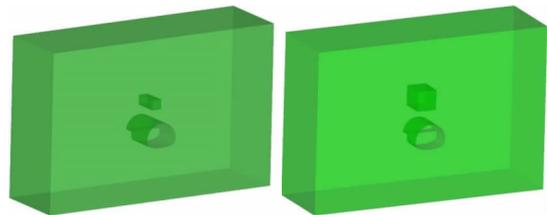


图2 拱顶处溶腔与隧道关系

2.3 数值模型与参数

根据设计资料,隧道路面为单向双车道,所建模型隧道跨度取为 12.9 m,隧道高度取为 10.1 m,隧道埋深设定为 35 m。为降低模型边界效应,模型边界设定为:左右两侧取 4 倍隧道洞径,仰拱以下取两倍隧道洞径,隧道拱顶取至地表面,模型纵向取 30 m。首先采用 ANSYS 软件建立平面模型,并进行网格划分,三维模型通过平面模型拉伸得到,然后将建

立的网格模型导入到 Flac3D 中进行计算,模型由 30 780个单元和 34 192 个节点组成,图 3 为所建模型效果图。模型约束条件为,左右两侧施加 X 水平约束,底部设置竖直 Z 方向约束,地表面为自由变形面,模型中存在的溶腔通过 NULL 模型来模拟。

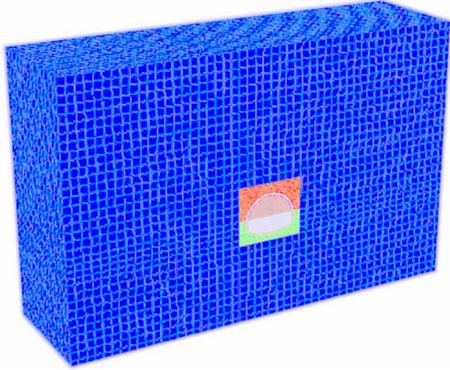


图3 数值模型

模型中的围岩材料本构关系采用自带的摩尔-库伦(M-C)理想弹塑性模型,隧道一次支护和二次衬砌都取为实体单元,本构关系取为弹性模型,隧道周边地层应力场仅考虑自重应力影响。模型中所用材料参数均通过现场试验和室内试验确定,最终模型参数见表 2 所示,Flac3D 数值计算过程一般采用体积模量 K 和剪切模量 G ,转换公式为^[15]: $K = E/3(1 - 2\mu)$, $G = E/2(1 + \mu)$ 。

表2 模型计算参数

材料	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	密度 $\rho/$ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
围岩	26	0.31	1650	25	20
锚杆	200×10^3	0.30	7800		
初期支护	25.2×10^3	0.25	2200		
二次衬砌	29.5×10^3	0.20	2300		

3 结果分析

3.1 围岩收敛变形

围岩变形能够间接反映围岩稳定性,实际施工中一般通过围岩变形监测来反馈指导现场施工。因此本文也关注溶腔存在时对隧道施工中围岩变形的影响,监测断面为溶腔中部下方断面,沿隧道周边设置 4 个监测点,分别在拱顶、两侧边墙和仰拱处,拱顶和仰拱主要监测竖向变形,两侧边墙监测水平变形,4 个监测点均以向内的收敛变形为正。监测点布置示意图见图 4。

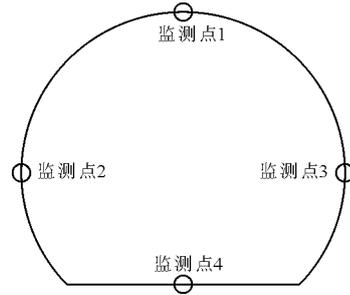


图4 隧道围岩监测点布置图

图 5 为不同工况条件下各测点围岩的收敛变形规律。对比图 5 中工况 1 至工况 3 可看出,溶腔位于隧道拱顶上方时,随着开挖进行,各测点的收敛变形趋势由增加逐渐趋于稳定,测点 1(拱顶)处收敛变形最明显,测点 2 和测点 3(两侧边墙)相对较小,测点 4(仰拱)受影响最不明显;溶腔体积越大,随开挖引起的收敛变形越大,溶腔体积为 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ 时(工况 1),拱顶沉降仅为 11.5 mm,溶腔体积为 $8 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ 时(工况 2),拱顶沉降增大到 21 mm,两侧边墙处收敛变形也随溶腔体积增大有所增加,但增加值小于拱顶处,仰拱处收敛变形受拱顶溶腔体积大小的影响不大;溶腔中存在压力时也会造成收敛变形明显增大,溶腔中压力为 0.4 MPa 时(工况 3),隧道拱顶收敛变形达到 17.5 mm,同时两侧边墙收敛变形也有所增加,仰拱处变形影响较小;对比图 5 中工况 1、工况 4 和工况 5 可看出,溶腔位置不同对隧道周边各测点收敛变形影响不同,溶腔位于左侧边墙时(工况 4),测点 2(左边墙)处收敛变形最明显,达到了 12.8 mm,测点 1(拱顶)处收敛变形次之,为 9 mm,测点 3(右边墙)和测点 4(仰拱)处收敛变形较小,说明左侧边墙处溶腔主要对隧道左边墙和拱顶的收敛变形影响明显;当溶腔位于隧道仰拱处时(工况 5),隧道拱顶处收敛变形最大达到 8 mm,仰拱处次之为 6.5 mm,两侧边墙最小,说明仰拱处溶腔对隧道影响相对较小。整体来看,溶腔位于隧道拱顶上方时对隧道的影响最大,主要影响隧道拱顶和两侧边墙的收敛变形,溶腔位于边墙时,对隧道的影响次之,主要引起溶腔一侧边墙的收敛变形增加,溶腔位于仰拱处时,对隧道的影响最小,会引起隧道拱顶和仰拱处收敛变形略微增加。因此岩溶隧道施工中,应着重关注隧道拱顶上方溶腔对隧道的影响,且溶腔体积越大、溶腔内水压力越大对隧道影响越明显,施工穿越岩溶溶腔主要是监测隧道拱顶的收敛变形,确保施工安全。

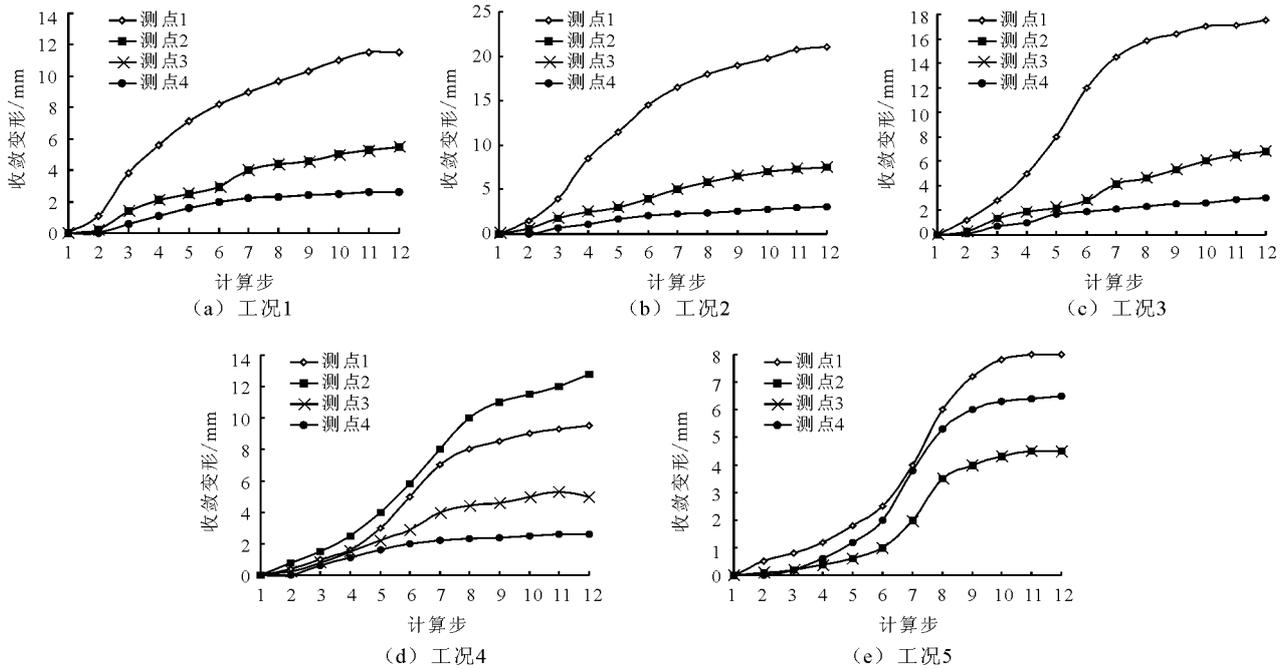


图5 不同工况围岩收敛变形

3.2 围岩应力分析

围岩应力变化主要影响支护受力情况,沿隧道围岩径向的应力作用最明显,因此本文主要关注围岩径向应力,应力测点同收敛变形测点(图4),拱顶和仰拱处主要提取竖向应力,两侧边墙主要提取水平应力。图6为不同工况下隧道开挖过程围岩应力变化情况。对比图6中工况1至工况3可看出,溶腔位于隧道拱顶上方时,随着隧道开挖过程,各测点的围岩应力值逐渐增大,然后逐渐趋于稳定,且溶腔位于隧道拱顶上方时,对隧道拱顶的围岩应力影响最明显,两侧边墙次之,对仰拱处围岩应力影响最弱;溶腔体积大小对各测点围岩应力影响也较为明显,当溶腔体积较小时(工况1),拱顶处围岩应力值最大仅为1 530 kPa,溶腔体积增大时(工况2),隧道拱顶围岩应力值达到2 250 kPa,两侧边墙处应力值也有所增加,但相比于拱顶处增加不明显,仰拱围岩应力值受影响不大;溶腔内存在水压力时,各测点的围压应力值也有所增加,溶腔内水压力为0.4 MPa时(工况3),拱顶处围岩应力值达到3 360 kPa,两侧边墙围岩应力也相应增大,达到了1 150 kPa,仰拱处围岩应力增加不明显,说明溶腔体积和溶腔压力均会对围岩应力产生影响,但溶腔位于拱顶上方时,主要影响隧道拱顶和两侧边墙,对隧道仰拱影响有限;对比图6中工况1、工况4和工况5,溶腔位置不同,对隧道周边各测点围岩应力的影响也不同,当溶腔位于隧道左边墙时(工况4),左边墙处

围岩应力变化最明显,最大达到1 480 kPa,其次为拱顶处,围岩应力值达到1 100 kPa,仰拱测点围岩应力也有所增加,但增加幅值不明显;当溶腔位于隧道仰拱处时(工况5),主要引起拱顶和仰拱处围岩应力值增加,两侧边墙围岩应力值较小,说明隧道仰拱处的溶腔对隧道整体围岩应力的影响相对较小。整体来看,溶腔位于隧道拱顶上方时对隧道影响最大,两侧边墙处的溶腔影响次之,仰拱处溶腔对隧道影响最小,且溶腔体积越大、溶腔内存在水压力时,对隧道围岩应力作用越明显。

当隧道施工遇到溶腔位于隧道拱顶上方且溶腔内存水时,建议首先进行预处理再施工;溶腔位于隧道两侧边墙时,可根据具体情况判定是否需要处理;当溶腔位于隧道仰拱处且溶腔体积大而无水时,可不采取处理措施,加强施工期围岩变形及应力监测即可。

3.3 支护接触压力

溶腔对隧道施工完成后支护受力也会产生影响,本文还关注施工完成后不同工况下隧道围岩与初支及初支与二衬之间的接触压力,评价溶腔存在对隧道支护系统受力的影响。表3分别给出不同工况下支护受力情况,其中压应力为正值。由表3可以看出,溶腔位于拱顶上方时(工况1~2),拱顶处初支受力较大,边墙次之,仰拱最小,且溶腔体积越大,各测点初支受力也越大,溶腔内存在水压力时(工况3),同样会增加各测点的初支受力;溶腔位于

左边墙时(工况4),左边墙和拱顶初支受力最大,仰拱和右边墙初支受力较小;溶腔位于仰拱时(工况5),拱顶和仰拱处初支受力较大,两侧边墙受力较小,说明溶腔存在会使得初期支护受力不均,靠近溶腔处测点初支受力一般有所增大,隧道拱顶上方存

在溶腔且溶腔较大或存在水压力时,会明显增大隧道拱顶初支接触压力,不利于初支的整体受力,溶腔位于仰拱时对隧道初支整体受力影响较小。各工况二次初期支护与二次衬砌间的接触压力相对较小,满足二衬作为安全储备的要求。

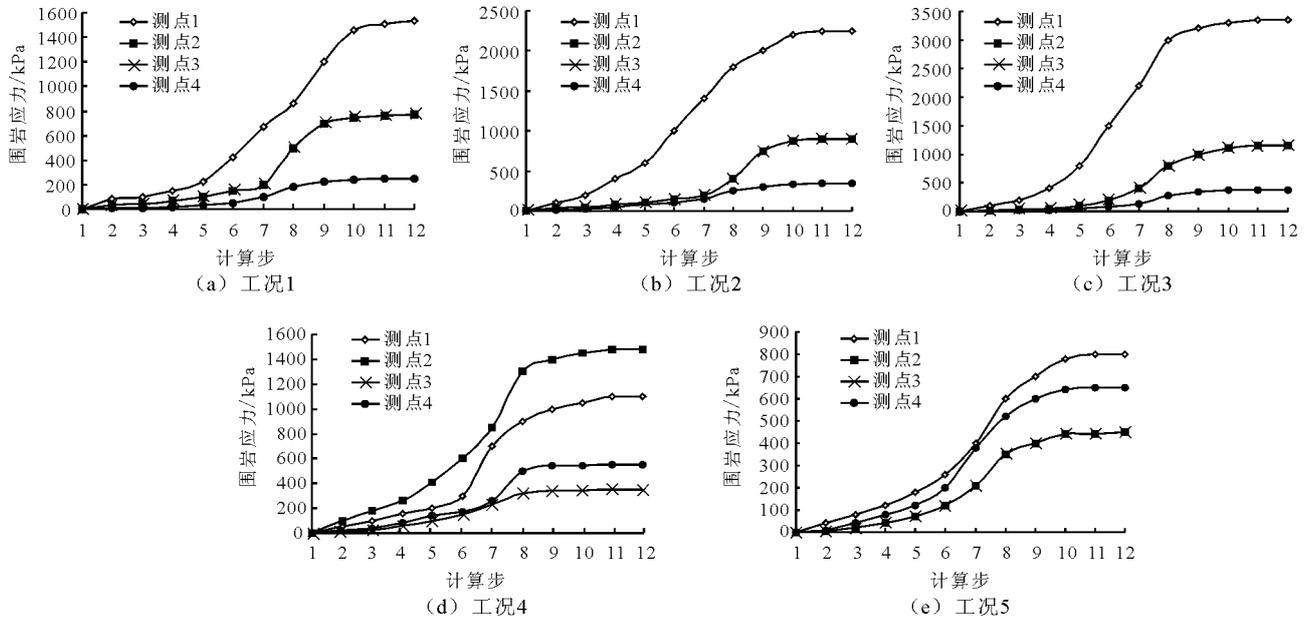


图6 不同工况围岩应力

表3 不同工况下初支和二衬压力

测点位置	工况1		工况2		工况3		工况4		工况5	
	初支	二衬	初支	二衬	初支	二衬	初支	二衬	初支	二衬
拱顶	1112.34	315.56	1835.55	370.25	2240.18	385.64	1005.34	280.37	775.64	210.35
左边墙	644.21	127.86	889.34	153.85	1005.35	250.65	1237.57	340.61	346.24	172.56
仰拱	210.78	80.35	330.24	100.24	430.18	137.78	225.18	111.55	425.18	223.83
右边墙	644.21	127.86	889.34	153.85	1005.35	250.65	346.24	157.31	346.24	172.56

4 结论

(1)岩溶隧道溶腔会引起隧道施工过程围岩收敛变形和应力增大,溶腔大小、溶腔位置及溶腔压力均会对收敛变形和应力产生影响。溶腔越大、溶腔存在压力会造成靠近溶腔测点的收敛变形和应力值明显增加,溶腔位于拱顶时对隧道整体受力影响最大,溶腔位于边墙时对隧道影响次之,溶腔位于仰拱时对隧道影响最小。

(2)隧道施工遇到溶腔位于隧道拱顶上方且溶腔内存水时,建议首先进行预处理再施工,溶腔位于隧道两侧边墙时,可根据具体实际情况判定是否需要处理,当溶腔位于隧道仰拱处且溶腔体积大而无

水时,可不采取处理措施,加强施工期围岩变形及应力监测即可。

(3)岩溶溶腔会对隧道初期支护受力产生不利影响,靠近溶腔一侧的初支受力明显增大,溶腔越大、溶腔内存水对初支受力影响越明显,施工中可考虑增加溶腔处初支的强度。

参考文献:

[1] 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.
 [2] 赖金星,樊浩博,来弘鹏,等. 软弱黄土隧道变形规律现场测试与分析[J]. 岩土力学,2015,36(7):2003-2012+2020.

(下转第217页)

- 南京:河海大学,2004.
- [8] 李霞. 内蒙古克什克腾旗蒸发塘缺陷渗漏试验研究[D]. 北京:中国地质大学,2013.
- [9] 沈振中,江沅,沈长松. 复合土工膜缺陷渗漏试验的饱和-非饱和渗流有限元模拟[J]. 水利学报,2009,40(9):1091-1095.
- [10] 吴景海,陈环. 土工膜防渗层渗漏流量的计算[J]. 岩土工程学报,1995,17(2):93-99.
- [11] 孙丹,沈振中,崔健健. 土工膜缺陷引起的土工膜防渗砂砾石坝渗漏数值模拟[J]. 水电能源科学,2013,31(4):69-73.
- [12] 李宪,张化强. 复合防渗衬垫缺陷渗漏量计算方法探讨[J]. 红水河,2011,30(1):40-43.
- [13] 岑威钧. 土石坝防渗(复合)土工膜缺陷及其渗漏问题研究进展[J]. 水利水电科技进展,2016,36(1):16-22.
- [14] 岑威钧,和浩楠,李邓军. 土工膜缺陷对土石坝渗流特性的影响及控制措施[J]. 水利水电科技进展,2017,37(3):61-65+71.
- [15] 岑威钧,和浩楠,温朗昇. 防渗土工膜的缺陷特性与缺陷渗漏研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(1):36-44.
- [16] MOO - YOUNG H, JOHNSON B, JOHNSON A, et al. Characterization of infiltration rates from landfills: supporting groundwater modeling efforts [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2004, 96(1-3):283-311.
- [17] GIROUD J P, BONAPARTE R. Leakage through liners constructed with geomembranes - part I. Geomembrane liners [J]. Geotextiles & Geomembranes, 1989, 8(1):27-67.
- [18] GIROUD J P, BADU - TWENEBOAH K, BONAPARTE R. Rate of leakage through a composite liner due to geomembrane defects [J]. Geotextiles and Geomembranes, 1992,11(1):1-28.

(上接第212页)

- [3] LI Liping, LEI Ting, LI Shucui, et al. Risk assessment of water inrush in karst tunnels and software development [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(4):1843-1854.
- [4] LI Liping, LEI Ting, LI Shucui, et al. Dynamic risk assessment of water inrush in tunnelling and software development. Geomechanics and Engineering, 2015, 9(1):57-81.
- [5] 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.
- [6] ZHAO Haijun, MA Fengshan, GUO Jie. Regularity and formation mechanism of large-scale abrupt karst collapse in southern China in the first half of 2010 [J]. Natural Hazards, 2012, 60(3):1037-1054.
- [7] 林云,娄亚南,武亚遵,等. 华蓥山隧道隧址区水文地球化学特征及涌水来源识别[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(5):43-48
- [8] 张玉伟,王琪,李又云,等. 压力溶腔对岩溶隧道施工安全影响的数值分析[J]. 南水北调与水利科技,2016,14(5):150-156.
- [9] 莫阳春,周晓军. 达成高速铁路岩溶隧道围岩稳定性研究分析[J]. 中国铁道科学,2008,29(3):52-57.
- [10] 李利平,李术才,张庆松. 岩溶地区隧道裂隙水突出力学机制研究[J]. 岩土力学,2010,31(2):523-528.
- [11] 李利平,李术才,崔金生. 岩溶突水治理浆材的试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(12):3642-3648.
- [12] 郭佳奇,乔春生,曹茜. 侧部高压富水溶腔与隧道间岩柱安全厚度的研究[J]. 现代隧道技术,2010,47(6):10-16.
- [13] 王勇,乔春生,孙彩虹,等. 基于SVM的溶洞顶板安全厚度智能预测模型[J]. 岩土力学,2006,27(6):1000-1004.
- [14] PESENDORFER M, LOEW S. Subsurface exploration and transient pressure testing from a deep tunnel in fractured and karstified limestones (Lotschberg Base Tunnel, Switzerland) [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science,2009,47(1):121-137.
- [15] 王琪. 近接溶腔对隧道围岩稳定性影响及防治措施研究[D]. 西安:长安大学,2014.