

文章编号: 1674-599X(2020)01-0082-05

安平隧道顶端溶洞对其围岩稳定性的影响

邓衍¹, 刘辉¹, 刘耀坤², 刘昶¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南理工学院, 湖南 岳阳 414006)

摘要:以湖南省龙塘至琅塘高速公路中安平隧道的具体设计、施工及地质情况为背景,采用 Abaqus CAE 2016 有限元软件,模拟安平隧道的施工过程。通过对比隧道顶部不同尺寸的溶洞对隧道拱顶、拱侧的围岩应力和位移的影响,绘制了不同尺寸的溶洞引起的隧道围岩应力场和位移场的变化图,分析了岩溶区隧道中溶洞引起的隧道周围围岩变化规律。研究表明:在一定范围内,既有顶部隐伏溶洞尺寸的增加将引起隧道位移的增加和隧道围岩拉应力的增加。该结果可为岩溶区的隧道建设安全提供技术支持。

关键词:顶端隐伏溶洞; 围岩稳定性; Drucker-Prager 本构模型; 数值分析

中图分类号: U455.6

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.014

The influence of hidden karst cave at the top of An-ping tunnel on the stability of surrounding rock in karst area

DENG Yan¹, LIU Hui¹, LIU Yao-kun², LIU Chang¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Sciences & Technology, Changsha 410114, China;

2. Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China)

Abstract: Taking the specific design of construction and geological conditions of An-ping tunnel in Long-tang to Lang-tang highways in Hunan Province as the background, the construction process of An-ping Tunnel excavated by CD method is simulated by using finite element software Abaqus CAE 2016. Comparing the influence of different size karst caves on the stress and displacement of surrounding rock around the tunnel vault and arch side, the variation diagram of the stress field and displacement field of surrounding rock caused by karst caves of different sizes is drawn, and the variation law of surrounding rock caused by karst caves in tunnel in karst area is analyzed. The results show that the increase of the size of the existing top concealed karst cave in a certain range will lead to the increase of the tunnel displacement and the increase of the tensile stress of the surrounding rock. The results can provide technical support for the construction of tunnels in karst areas.

Key words: concealed karst caverns; stability of surrounding rock; Drucker-Prager constitutive model; numerical analysis

随着经济和施工技术的不断发展和保护环境的需要,在中国公路建设中大量使用隧道的方式穿越高山。但是,由于中国疆域辽阔,在进行隧道施工过程中会遇到各种地质条件,岩溶地质便是其中之一。岩溶这种不良地质现象会给隧道开挖和运营安全带来隐患。岩溶区隧道施工中常出现涌水、突

泥、隧道周边围岩的变形、失稳和开挖中局部坍塌、掉块及落石等现象^[1]。因此,施工时需要确保围岩的稳定性并对岩溶地区隧道加强监控量测,提前采取应对措施。赵明阶^[2]等人进行了隧道开挖模型试验,研究了溶洞尺寸、间距及开挖工法对于隧道周围岩稳定性的影响。阳军生^[3-4]等人利用极限分析

收稿日期: 2019-09-23

作者简介: 邓衍(1995-),男,长沙理工大学硕士生。

上限法, 对溶洞中地基极限承载力的影响进行了研究, 推导出公路隧道穿越特大溶洞时检测应力与时间的关系。李术才^[5]等人通过分析地层沉降云图, 对岩溶不良地质条件造成的隧道沉降进行了研究。赵明阶^[6-8]等人以实际工程为例, 通过有限元软件, 将不同位置和不同洞径的溶洞进行了分类, 推导出隧道围岩位移场和应力场的变化规律。宋战平^[9-10]等人探讨了顶部溶洞洞径对隧道围岩稳定性的影响。曹茜^[11]等人通过软件计算, 得出岩溶隧道与溶洞的安全距离范围的影响因素, 并给出了最小安全距离的预测公式。黄武^[12]等人对隧道施工过程中围岩及衬砌结构的变形和受力特性进行了模拟。殷颖^[13-14]等人分析了溶洞隧道案例, 得到了溶洞影响隧道稳定性的规律。作者以湖南省龙塘至琅塘高速公路中的安平隧道为依托, 利用 Abaqus CAE 2016 有限元分析软件, 拟研究不同尺寸的溶洞对隧道围岩应力场、位移场的影响, 分析顶部溶洞引起隧道周围围岩应力变化和位移变化的规律, 以期为类似岩溶区隧道的设计与施工提供指导。

1 计算模型参数及模拟方案

采用 Drucker-Prager 屈服准则, 选取 Abaqus CAE 2016 软件, 根据安平隧道实际地质情况, 建立土的本构模型。

1.1 几何模型及位移边界条件

该模型取自安平隧道的岩溶发育段 K15+355~K15+365, 岩性为岩溶化灰岩。溶洞位于模型正上方。溶蚀特别发育, 地下水十分丰富, 加之地下水的水位较高, 且受页岩和砂岩等隔水层的阻断, 无法向周边水库泄洪, 涌积于此段, 形成承压带。隧道的半径为 6.05 m, 总高度为 7.2 m。围岩衬砌为 SIVb 类, 厚度为 25 mm。锚杆长度为 3.5 m, 直径为 22 mm。锚杆支护的间距为 1.2×1.0 m, 呈梅花型布置。

该模型的边界条件为: 处于 $x=0, 100$ m 的 YOZ 面上的所有节点在 x 方向固定, 即为滑动铰支座; 处于 $z=0, 10$ m 的 XOY 平面上所有节点在 z 方向固定, 亦为滑动铰支座; 处于 $y=-100$ m 的 XOZ 平面上所有节点为固定铰支座; 地表为无约束自由面。

隧道计算模型的网格划分如图 1 所示。

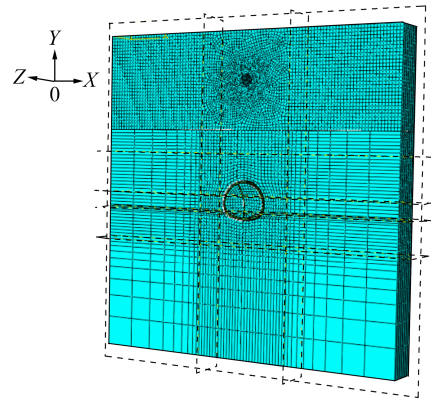


图 1 隧道计算模型的网格划分

Fig. 1 Meshing of tunnel computing model

1.2 材料参数

用实体单元模拟围岩以及开挖的土体、隧道的初衬和二衬。隧道围岩岩体及支护材料力学参数见表 1。

表 1 隧道围岩岩体及支护材料力学参数

Table 1 Mechanical parameters of surrounding rock mass and support material of tunnel

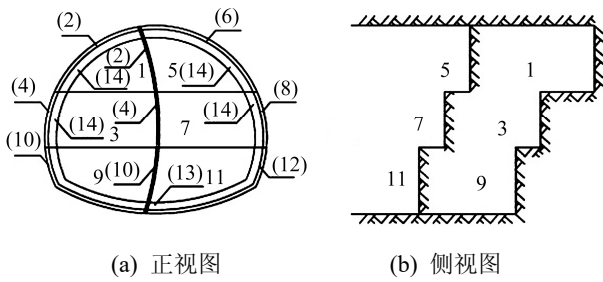
岩石及支护材料名称	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	摩擦角/ ($^{\circ}$)	膨胀角/ ($^{\circ}$)
IV级围岩	2.3	1.28	0.3	52.1	12.5
V级围岩	2.1	0.38	0.3	41.4	46.9
C25 混凝土	2.4	2.00	0.2	—	—
C30 混凝土	2.5	2.50	0.2	—	—
钢筋	7.8	2.00	0.2	—	—

1.3 模拟方案

采用 Abaqus CAE 2016 进行模拟, 根据隧道顶部圆形隐伏溶洞洞径的变化来分析对隧道的影响。通过模拟整个隧道使用 CD 法开挖, 计算各分析步骤中应力和位移的变化, 得到不同洞径的溶洞对隧道开挖的影响。

隧道开挖的内轮廓面为三心圆断面形式。为便于分析工程顶部圆形隐伏溶洞对隧道的影响, 按溶洞的大小, 将溶洞位置固定于隧道正上方, 到拱顶的距离为 25.0 m, 溶洞半径分别为 0, 1, 2, 3, 6, 9, 12 和 15 m, 所建模型分别为 M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7 和 M8。

隧道开挖如图 2 所示。该模型各模拟计算步骤为: 首先对整个模型设置初始重力场, 接着进行地应力平衡。通过多次对图 2 中的 1, 3, 5, 7, 9 和 11 处分别进行 5 m 前进开挖。在每次开挖后, 紧接着对 2, 4, 6, 8, 10 和 12 处分别进行初期支护并拆除其中



(a) 正视图 (b) 侧视图

图 2 隧道开挖示意

Fig. 2 Diagram of tunnel excavation

隔壁，最终完成二次支护。该模型构建完成。

2 数值计算结果分析

采用 Abaqus CAE 2016，建立安平隧道的三维模型。通过数值模拟分析，得到在不同施工步骤下隧道开挖后围岩的应力场和位移场。采用软件计算后，溶洞半径为 2 m 时的结果如图 3 所示。

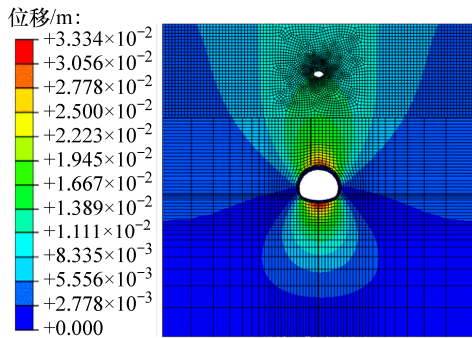


图 3 溶洞半径为 2 m 时的隧道位移场计算结果

Fig. 3 Calculation results of tunnel displacement field when the radius of karst cave is 2 m

2.1 拱顶沉降应力与岩溶洞径的关系

不同溶洞洞径对隧道拱顶应力影响的计算结果如图 4 所示。

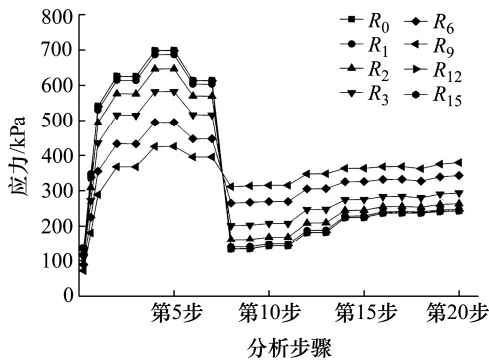


图 4 不同溶洞洞径对隧道拱顶应力影响计算结果

Fig. 4 Calculation results of the effect of different karst cave diameters on tunnel vault stress

从图 4 中可以看出，完成二次衬砌之前，无溶洞的应力的最大值明显高于有溶洞的。随着隧道顶部圆形隐伏溶洞洞径的增大，隧道围岩顶部沉降应力减小。在开挖顶部土并完成二次衬砌之后，拱顶沉降应力骤降，无溶洞的应力的最小值小于有溶洞的。最后，应力慢慢稳定。

2.2 拱侧收敛应力与岩溶洞径的关系

不同溶洞洞径对隧道拱侧应力影响的计算结果如图 5 所示。

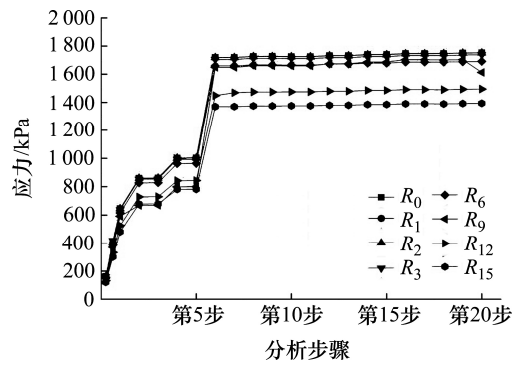


图 5 不同溶洞洞径对隧道拱侧应力影响的计算结果

Fig. 5 Calculation results of the effect of different karst cave diameters on tunnel arch stress

从图 5 中可以看出，随着隧道的开挖，拱侧的收敛应力快速增长。在顶部土开挖完成后，即第 6 分析步骤后，应力稳定在一个固定值。随着隧道顶部圆形隐伏溶洞洞径的增大，隧道围岩拱侧收敛应力减小。

2.3 拱顶沉降位移变化与岩溶洞径的关系

不同溶洞洞径对隧道拱顶位移影响的计算结果如图 6 所示。

从图 6 中可以看出，无溶洞的情况下，随着隧道的开挖，拱顶沉降位移一直控制在 5 mm 之内。

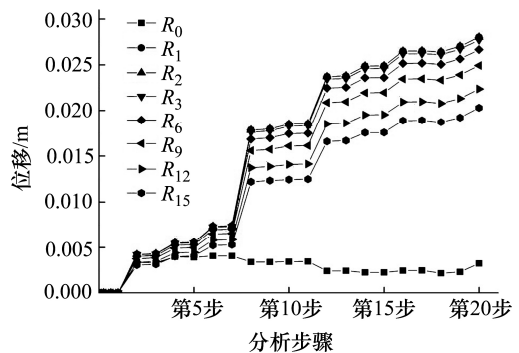


图 6 不同溶洞洞径对隧道拱顶位移影响的计算结果

Fig. 6 Calculation results of the effect of different karst cave diameters on tunnel vault displacement

而有溶洞的情况下, 随着隧道的开挖, 小洞径溶洞使得隧道拱顶沉降的位移变大, 大洞径溶洞反而使得隧道拱顶沉降位移变小。隧道开挖所产生的效应促进了拱顶沉降位移的增加。

2.4 拱侧收敛位移变化与岩溶洞径的关系

不同溶洞洞径对隧道拱侧位移影响的计算结果如图 7 所示。

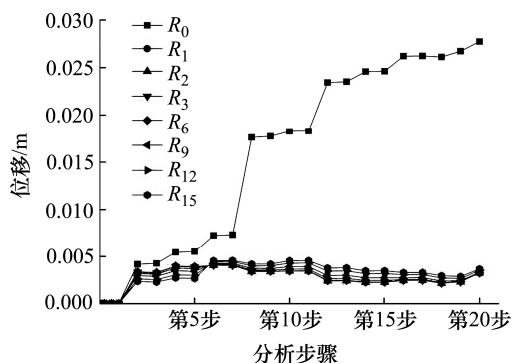


图 7 不同溶洞洞径对隧道拱侧位移影响的计算结果

Fig. 7 Calculation results of the displacement effect of different karst cave diameters on tunnel arch displacement

从图 7 中可以看出, 有溶洞的情况下, 拱侧收敛位移一直控制在 5 mm 之内。而无溶洞时, 随着隧道的开挖, 拱侧收敛位移增加, 隧道开挖所产生的效应抑制了拱侧收敛位移的增加。

3 结论

采用 Abaqus CAE 2016, 分析了 CD 法开挖隧道各阶段中拱顶、拱侧应力和位移的变化, 得出的结论为:

1) 对比分析了无溶洞和有溶洞时隧道应力的分布模式以及破坏机理。无溶洞时, 洞顶部的沉降发生在用 CD 法开挖上侧土体之前。在开挖完成之后, 顶部支护所受到的沉降应力显著减小。同时, 拱侧受到围岩收敛的应力在一直增加。在用 CD 法开挖岩溶隧道上侧土时, 应加强对顶部围岩应力进行监控与量测。

2) 对比分析了无溶洞和有溶洞时隧道位移的变化机理。对于拱顶的沉降位移, 随着隧道进一步的开挖, 无溶洞时, 拱顶较为稳定; 而有溶洞时, 沉降位移快速增加。对于拱侧的收敛位移, 有溶洞时, 拱侧的收敛位移较为稳定; 而无溶洞时, 收敛位移变化较大。溶洞的存在使得围岩的径向位移有

明显的增大。表明: 有溶洞的围岩在开挖时会产生较大的变形, 由溶洞引起的隧道围岩变形发生在隧道的拱侧, 可以通过超前支护等手段有效控制溶洞引起的围岩变形。

3) 隧道顶部溶洞洞径的变化对拱顶下沉量和拱侧收敛量产生了显著的影响。同时, 使用 CD 法开挖的隧道需要对中隔壁的应力、应变变化保持持续关注。小洞径溶洞使得隧道拱顶沉降位移变大, 大洞径溶洞反而使得隧道拱顶沉降位移变小。有溶洞时, 隧道开挖所产生的效应促进了拱顶沉降位移的增加却抑制了拱侧收敛位移的增加。

参考文献(References):

- [1] SU Mao-xin, QIAN Qi-hu, LI Shu-cai, et al. An method of metra advanced geological prediction under karst geology condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1428-1434.
- [2] 赵明阶, 徐容, 许锡宾. 岩溶区全断面开挖隧道围岩变形特性模拟[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(6): 710-715. (ZHAO Ming-jie, XU Rong, XU Xi-bin. Deformation modeling of the surrounding rock during full-face excavation of tunnel in karst regions[J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2004, 32(6): 710-715. (in Chinese))
- [3] 阳军生, 张军, 张起森, 等. 溶洞上方圆形基础地基极限承载力有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 296-301. (YANG Jun-sheng, ZHANG Jun, ZHANG Qi-sen, et al. Finite element analysis of ultimate bearing capacity of circular footing above karst cave[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 296-301. (in Chinese))
- [4] 刘辉, 杨峰, 阳军生. 空洞上方浅基础地基破坏模式与极限承载力分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3373-3378. (LIU Hui, YANG Feng, YANG Jun-sheng. Failure mechanism and ultimate bearing capacity of strip footing above void[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3373-3378. (in Chinese))
- [5] LI Shu-cai, LI Shu-chen, Zhang Qing-song, et al. Forecast of karst-fractured groundwater and defective geological conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 217-225.
- [6] 赵明阶, 刘绪华, 敖建华, 等. 隧道顶部岩溶对围岩稳定性

- 影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 445-449. (ZHAO Ming-jie, LIU Xu-hua, AO Jian-hua, et al. Numerical analysis of the influence of karst caves in top of tunnel on the stability of surrounding rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003,24(3): 445-449.(in Chinese))
- [7] 吴梦军,许锡宾,赵明阶,等.岩溶地区公路隧道施工力学响应研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(9):1525-1529.(WU Meng-jun,XU Xi-bin,ZHAO Ming-jie,et al. Construction mechanics response study of highway tunnel in karst[J].Rock and Soil Mechanics,2004,23(9): 1525-1529.(in Chinese))
- [8] 赵明阶,敖建华,刘绪华,等.岩溶尺寸对隧道围岩稳定性影响的模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004, 23(2): 213-217. (ZHAO Ming-jie, AO Jian-hua, LIU Xu-hua,et al.Model testing research on the influence of karst cave size on the stability of surrounding rock masses during tunnel construction[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 213-217. (in Chinese))
- [9] 宋战平,党宏斌,李宁.既有溶洞对隧道围岩位移特征影响的数值试验[J].长江科学院院报,2008,25(5):79-83. (SONG Zhan-ping,DANG Hong-bin,LI Ning.Numerical experimentation of the influence of karst cave on displacement characteristics of the rock mass[J].Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2008,25(5): 79-83.(in Chinese))
- [10] 宋战平,綦彦波,李宁.顶部既有隐伏溶洞对圆形隧道稳定性影响的数值分析[J].岩土力学,2007,28(S1):485-489.(SONG Zhan-ping,QI Yan-bo,LI Ning. Numerical experimental research on concealed karst cave's influence on circular tunnel stability[J].Rock and Soil Mechanics,2007,28(S1):485-489.(in Chinese))
- [11] 曹茜.岩溶隧道与溶洞的安全距离研究[D].北京:北京交通大学,2010.(CAO Qian.Study on safe thickness for rock between tunnel and karst cave in karst region[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2010.(in Chinese))
- [12] 黄武,颜佳林.岩溶隧道开挖围岩力学及渗流三维数值模拟[J].交通科学与工程,2015,31(1):56-63.(HUANG Wu,YAN Jia-lin.Three dimensional numerical simulation, seepage characteristics and mechanical properties of the tunnel excavation[J].Journal of Transport Science and Engineering,2015,31(1):56-63.(in Chinese))
- [13] 殷颖,田军,张永杰.岩溶隧道灾害案例统计分析研究[J].公路工程,2018,43(4):210-273.(YIN Ying,TIAN Jun,ZHANG Yong-jie.Study on statistical analysis of karst tunnel disaster cases[J].Highway Engineering,2018,43(4): 210-273.(in Chinese))
- [14] 钟爱军,李懋,王立新,等.隧道上穿溶洞对管片衬砌结构稳定性影响分析[J].交通科学与工程,2018,34(2):71-77. (ZHONG Ai-jun,LI Miao,WANG Li-xin,et al.Analysis of the influence on the stability of the lining structure through the solution tunnel[J]. Journal of Transport Science and Engineering,2018,34(2):71-77.(in Chinese))