

跨溶岩区域隧道施工围岩稳定性研究*

Study on Stability of Surrounding Rock in Tunnel Construction Across Karst Region

李 春

(广西交通集团有限公司, 广西 南宁 530007)

摘 要: 为研究跨溶岩区域隧道位于掌子面前方的溶洞在隧道开挖过程中对隧道的影响规律, 本文依托吾排隧道实际工程, 利用 FLAC 3D 软件进行数值建模与计算, 分析不同围岩级别、溶洞水压下隧道围岩在施工过程中的稳定性影响规律, 得到以下结论: (1) 在隧道开挖过程中, 围岩级别越高, 相同开挖步对应的最大主应力与最小主应力值越大, 围岩的变形位移值越小; 溶洞水压越大, 相同开挖步对应的最大主应力与最小主应力值越大, 围岩的变形位移值越大。(2) 拱顶位置处的应力在开挖前期小幅波动, 而后迅速增大再急剧减小, 墙脚位置处的主应力值在开挖前期保持相对稳定, 而后变化率逐渐增大, 仰拱位置处主应力值在开挖前期基本保持不变, 然后急剧增长; 拱顶、仰拱位置处的位移在前期缓慢增加, 开挖到一定深度时开始急剧增长。

关键词: 跨溶岩区域隧道; 围岩稳定性; 数值计算; FLAC 3D

中图分类号: U455 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2023) 03-0004-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.03.004

LI Chun

(Guangxi Transportation Science & Technology Group Co., Ltd., Nanning, 530007 China)

Abstract: In order to study the influence law of the cavern in front of the palm face of the tunnel in the tunnel excavation process, this paper relies on the actual project of the Wupai tunnel, and uses FLAC 3D software for numerical modeling and calculation to analyze the stability influence law of the tunnel surrounding rock in the construction process under different rock levels and cavern water pressure, and obtains the following conclusions: (1) In the tunnel excavation process, the higher the level of the surrounding rock, the greater the maximum principal stress and minimum principal stress values corresponding to the same excavation step, the smaller the deformation and displacement values of the surrounding rock; the greater the cavern water pressure, the greater the maximum principal stress and minimum principal stress values corresponding to the same excavation step, the greater the deformation and displacement values of the surrounding rock. (2) The stress at the top of the arch fluctuates slightly at the beginning of the excavation, then increases rapidly and then decreases sharply; the primary stress at the foot of the wall remains relatively stable at the beginning of the excavation, then the rate of change increases gradually; the primary stress at the back of the arch remains unchanged at the beginning of the excavation, then increases sharply; the displacement at the top of the arch and back of the arch increases slowly at the beginning, then starts to increase sharply when the excavation reaches a certain depth.

Keywords: tunnel across karst area; stability of surrounding rock; numerical calculation; FLAC 3D

* 基金项目: 广西科学研究与技术开发计划项目 (桂科攻 1355008-3)。

作者简介: 李春 (1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事公路设计和科研工作。

收稿日期: 2023-02-15

0 引言

随着我国经济的快速发展与隧道施工工艺的进步,大量的公路、铁路线路均需进行大量的隧道建设。我国目前已经成为世界上隧道数量最多、规模最大、工程条件最复杂、技术发展最迅速的国家^[1]。我国西南地区分布有大面积的喀斯特地貌,喀斯特地区的岩层中含有侵蚀性很强的岩溶水,会对可溶性岩石进行溶蚀作用,在喀斯特地区修建隧道时,突水突泥和衬砌开裂变形甚至破损的风险会大大增加。同时,若隧道衬砌背后存在岩溶空腔或管道,地下水汇聚到隧道衬砌背后的岩溶空腔或管道中,会产生巨大的水压荷载,对隧道的衬砌结构造成威胁。目前对于岩溶地区隧道围岩稳定性的研究已有了较多成果。童建军等^[2]为研究岩溶隧道的围岩分级问题,提出了岩溶发育程度对隧道围岩分级指标修正值 $\Delta BQ_{\text{岩}}$ 的计算方法,结合隧道不同围岩亚级BQ值,提出了岩溶隧道围岩定量分级方法。杨坤等^[3]基于贵州岩溶地区公路隧道实际工程,利用有限元数值方法研究了侧上方含落水洞的隧道围岩的力学响应,分析了落水洞距离隧道不同水平距离对隧道围岩稳定性的影响。张京亮等^[4]为研究隐伏溶洞对隧道开挖的影响,利用FLAC 3D软件建立数值模型,分析了溶洞的尺寸、隧道与溶洞的距离以及溶洞与隧道的相对位置对隧道围岩应力场、应变场的影响规律。曹林卫等^[5]利用RFPA软件对复合围岩的破裂突水过程进行了数值模拟,分析了不同厚度和不同类型的复合围岩的抗水压能力。陈秀雯等^[6]依托云南某隧道实际工程,利用有限元软件MIDAS GTS NX建立数值模型并进行数值计算,分析了围岩及初期支护的稳定性,并提出相应的工程措施。金美海等^[7]利用理论方法建立圆形衬砌顶部局部高水压与围岩压力联合作用的内力计算模型,利用数值计算方法对不同水压力大小和作用面积下的隧道衬砌进行受力计算分析。樊浩博等^[8]为研究管道型溶腔中的高水压力对隧道衬砌的影响,进行了富水管道型岩溶隧道衬砌结构的模型试验,分析了不同溶腔位置及水头高度对

衬砌结构内力的影响,同时利用数值模拟进一步研究了不同溶腔尺寸、位置和水头高度对衬砌内力的影响。众多研究成果均表明,岩溶隧道中溶洞与隧道之间的相对位置及距离对隧道围岩的稳定性具有较大的影响。邹洋等^[9]为研究岩溶隧道的顶板安全厚度及稳定性问题,考虑围岩的自重及隧道坡度等因素,建立判别方程,得到了岩溶隧道的顶板安全厚度的计算公式,并对影响顶板安全厚度的相关因素进行分析。王万锋等^[10]利用FLAC 3D建立了环向不同部位的溶洞与隧道间的临界安全距离数值模型,分析围岩的级别、溶洞水压以及溶洞尺寸对临界安全距离的影响。马国民等^[11]、肖喜等^[12]还针对岩溶隧道在涌突水破坏模式下的溶洞与隧道间的安全临界条件进行了研究。已有的研究中,大多仅考虑隧道环向不同部位的溶洞对隧道的影响,而考虑位于掌子面前方的溶洞在隧道开挖过程中影响隧道稳定性的研究较少。

鉴于此,本文依托柳州经合山至南宁高速公路项目中的吾排隧道实际工程,通过FLAC 3D软件进行建模与计算,研究位于掌子面前方的溶洞在隧道开挖过程中对隧道的影响规律,分析不同围岩级别、溶洞水压下隧道围岩在施工过程中的稳定性影响规律,以期为实际隧道工程施工和后续的研究做出贡献。

1 工程背景与数值建模

1.1 工程概况

本文以柳州经合山至南宁高速公路项目中的吾排隧道实际工程为例,研究跨溶岩区域的隧道施工围岩稳定性问题。隧址区位于来宾市忻城县果遂乡,隧道全长约1700 m,最大埋深约570 m,属于长隧道,隧址区为侵蚀低中山地貌,其地形陡峭,地表水较贫乏,地下水主要由孔隙潜水、裂隙水和岩溶水组成,主要由降雨进行补给。通过地质勘察资料,隧址区的地层岩性主要为粉质黏土、玄武岩、白云质灰岩、页岩、灰岩、砂岩,地表存在明显的岩溶现象。隧址区内断层、褶皱较发育,岩体节理裂隙发育,隧道范围内存在一

岩土力学

长条形向斜, 岩体结构破碎、岩溶发育, 属于蓄水条件较好的聚水构造带。

1.2 数值模型建立

为研究位于掌子面前方的溶洞在隧道开挖过程中对隧道的影 响规律, 利用 FLAC 3D 软件建立数值模型, 研究不同围岩级别和溶洞水压条件下隧道围岩在 施工过程中的稳定性影响规律。

模型依据实际隧道断面进行建立, 为减小由边界效应引起的计算误差, 计算模型的尺寸为 120 m×48 m×95 m, 其中 x 轴为水平方向, z 轴为 竖直方向, y 轴为隧道轴线方向, 隧道埋深取为 45 m, 隧道跨度为 16 m, 高度为 10 m。隧道前方 溶洞简化为一圆柱体, 在 xz 断面上的投影为半径 为 5 m 的圆形, 在 y 轴方向上的投影长度为 6 m, 建立数值模型如图 1 所示。

1.3 计算参数与边界条件

围岩的本构模型采用摩尔-库伦弹塑性模型, 初期支护结构用 shell 单元进行模拟, 厚度为

20 cm, 本构模型采用线弹性模型, 为便于建模,

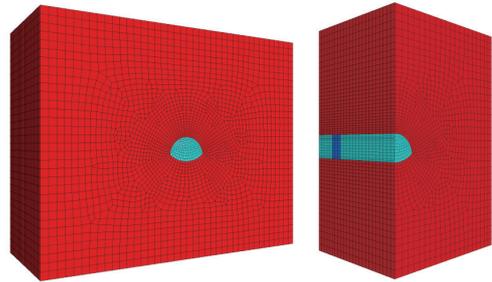


图 1 三维数值计算模型
Fig. 1 3D numerical calculation model

将初期支护结构中的钢筋与钢架的弹性模量等效给混凝土。结合 JTG 3370.1-2018 《公路隧道设计 规范》, 选取的计算参数如表 1 所示。

边界条件及初始条件设置为: 四周及底面约 束法向位移, 初始地应力场仅为重力场, 模型上 表面施加围岩自重荷载。初始地下水位线设在模 型顶部, 为透水边界, 掌子面设为透水边界, 溶 洞内依据不同工况情况施加孔隙水压力。

表 1 数值计算参数取值
Table 1 Values of numerical calculation parameters

材料	重度 / (kg/m ³)	孔隙率	弹性模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /°	抗拉强度 /kPa	渗透系数 / (m ² /Pa·s)
围岩 I	25.0	0.40	11.0	0.24	1.2	43.0	0.6	6.1×10 ⁻¹¹
围岩 II	24.0	0.40	9.0	0.26	1.0	41.0	0.5	6.1×10 ⁻¹¹
围岩 III	23.0	0.40	7.0	0.28	0.8	39.0	0.4	6.1×10 ⁻¹¹
围岩 IV	22.0	0.40	5.0	0.30	0.6	37.0	0.3	6.1×10 ⁻¹¹
初期支护	24.0	—	25.0	0.20	—	—	—	—

1.4 计算工况及过程

为研究位于掌子面前方的溶洞在隧道开挖过程中对隧道的影 响规律, 本文考虑围岩级别和溶 洞水压 2 类影响因素设计正交试验, 设计了 7 种 计算工况, 如表 2 所示。

表 2 计算工况
Table 2 Calculation conditions

工况	围岩级别	溶洞水压/MPa
1	I	1.0
2	II	1.0
3	III	1.0
4	IV	1.0
5	IV	0.6
6	IV	1.4
7	IV	1.8

在模拟隧道开挖时, 考虑到掌子面前方存在 充水溶洞, 在开挖位置逐渐接近充水溶洞的过程

中, 随着与充水溶洞的距离减小, 隧道受到的影 响会逐渐增大, 因此, 在隧道开挖过程中应逐级 减小开挖步距, 具体的隧道开挖过程如图 2 所示。

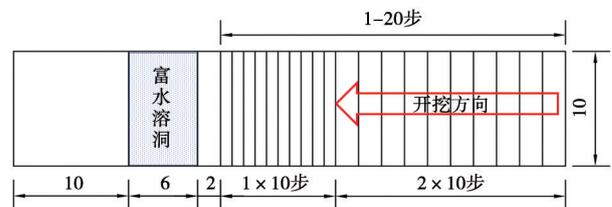


图 2 隧道开挖示意图 (单位: m)
Fig. 2 Schematic diagram of tunnel excavation (Unit: m)

在溶洞靠近开挖面一侧 2 m 位置处截取一断 面, 监测该断面特征点位置的应力、位移以及孔 隙水压力, 考虑到隧道开挖面左右对称分布, 故 仅监测一侧的数据即可, 监测点在断面上的具体 位置如图 3 所示。

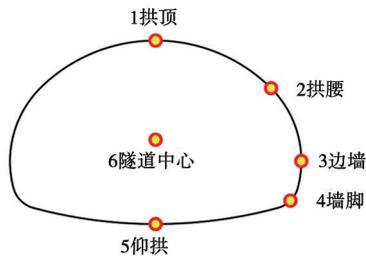


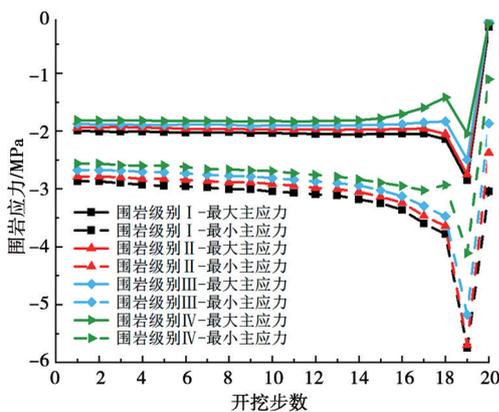
图 3 监测点位置示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the location of monitoring points

2 围岩级别对围岩稳定性的影响

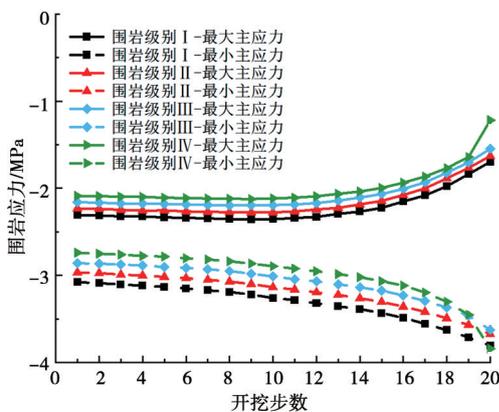
为研究围岩级别对围岩稳定性的影响，选取 4 个级别的围岩进行计算，围岩的力学参数如表 1 所示，溶洞水压为 1.0 MPa。

2.1 不同围岩级别下围岩的应力变化规律

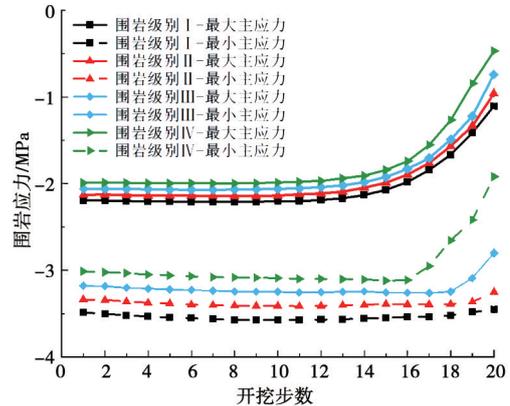
根据数值计算结果，得到隧道监测断面上各特征点处围岩的最大、最小主应力曲线，如图 4 所示。



(a) 围岩拱顶位置主应力变化



(b) 围岩墙脚位置主应力变化



(c) 围岩仰拱位置主应力变化

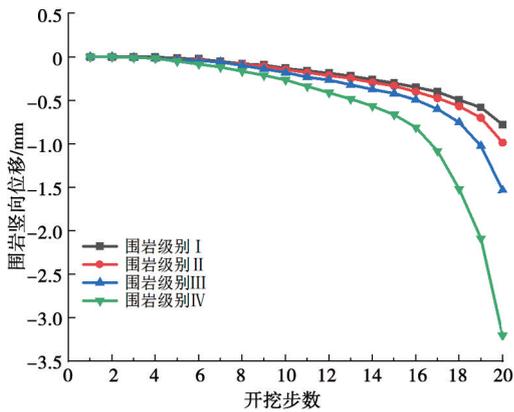
图 4 不同围岩级别下隧道开挖过程中监测断面围岩主应力变化情况
Fig. 4 Changes in the principal stress of surrounding rock at different levels during tunnel excavation

如图 4 (a) 所示，拱顶位置处的围岩最大主应力与最小主应力存在相似的变化规律：主应力值在前 18 开挖步过程中呈现较小幅度的增长，围岩级别越高，相同开挖步对应的最大主应力与最小主应力值越大，完成第 19 步后，最大主应力与最小主应力急剧增大，完成第 20 步后，最大主应力与最小主应力因开挖卸荷作用的影响而急剧减小，不同围岩级别下的围岩最大主应力终值相差较小，最大主应力终值随着围岩级别的升高而逐渐增大。如图 4 (b) 所示，墙脚位置处围岩主应力的变化规律为：在前 9 开挖步过程中最大主应力值呈现较小幅度的增长，围岩级别越高对应的应力值越大，第 9 开挖步后围岩应力开始释放，最大主应力值的减小速率逐渐增大；最小主应力在隧道开挖过程中呈现逐渐增大的趋势，且增大速率随着隧道开挖逐渐增大，围岩级别越高对应的应力增量越小。如图 4 (c) 所示，仰拱位置处围岩的最大主应力变化规律基本与墙脚位置处一致；最小主应力在隧道开挖前期出现小幅度的波动，随着隧道的开挖，不同级别围岩对应的应力在不同开挖步释放，围岩级别越高时应力释放地越晚。

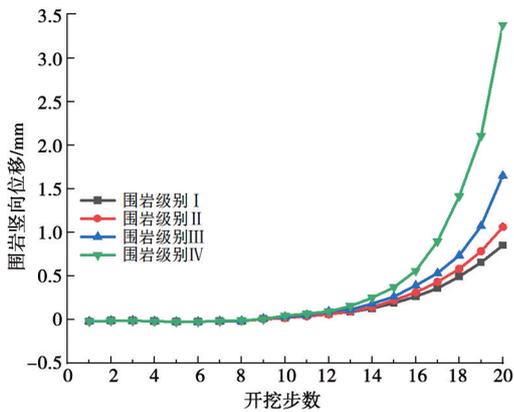
2.2 不同围岩级别下围岩的位移变化规律

根据数值计算结果，得到隧道监测断面上特征点的位移曲线，如图 5 所示。

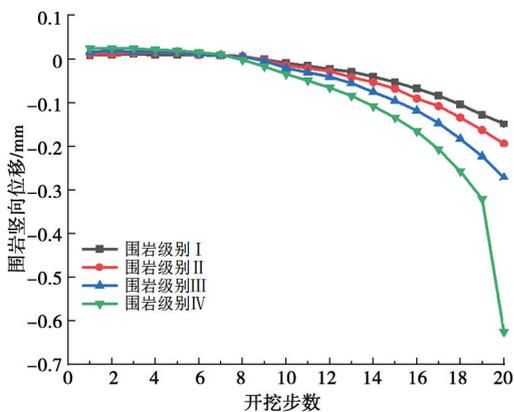
岩土力学



(a) 围岩拱顶位置竖向位移变化



(b) 围岩仰拱位置竖向位移变化



(c) 围岩边墙位置水平位移变化

图 5 不同围岩级别下隧道开挖过程中监测断面围岩位移变化情况
Fig. 5 Changes of displacement of surrounding rock in monitored sections during tunnel excavation under different levels of surrounding rock

如图 5 所示，在隧道开挖中，拱顶位置处的围岩产生向下的位移，且位移变化量逐渐增大，围岩级别越低，位移的增加速率越大，围岩级别

为 I、II、III、IV 时对应的拱顶位置处最大位移值分别为 0.81 mm、1.01 mm、1.49 mm、3.21 mm，围岩级别越高，拱顶位置处的围岩竖向位移值越小。仰拱位置处的围岩出现向上隆起的位移，位移变化量随着隧道开挖过程逐渐增大，且围岩级别越低，位移的增加速率越大，围岩级别为 I、II、III、IV 时对应的仰拱位置处最大隆起位移分别为 0.85 mm、1.07 mm、1.59 mm、3.41 mm，围岩级别越高，仰拱位置处的围岩竖向隆起值越小。右边墙位置处的围岩出现向左的水平位移，即位移方向指向隧道内部，位移变化量随着隧道开挖过程逐渐增大，围岩级别越低，位移的增加速率越大，围岩级别为 I、II、III、IV 时对应的右边墙位置处最大水平位移分别为 0.16 mm、0.21 mm、0.28 mm、0.59 mm，围岩级别越高，边墙位置处的围岩水平位移值越小。

3 溶洞水压对围岩稳定性的影响

为研究溶洞水压对围岩稳定性的影响，设置 0.6 MPa、1.0 MPa、1.4 MPa、1.8 MPa 四个梯度的溶洞水压，其余参数保持不变。

3.1 不同溶洞水压下围岩的应力变化规律

根据数值计算结果，得到隧道监测断面上各特征点处围岩的最大、最小主应力曲线，如图 6 所示。

如图 6 所示，拱顶位置处的围岩最大主应力与最小主应力变化规律较为相似，主应力值在前 18 开挖步过程中呈现较小幅度的增长，溶洞水压越大，相同开挖步对应的最大主应力与最小主应力值越大，完成第 19 开挖步后，最大主应力与最小主应力急剧增大，完成第 20 步后，最大主应力与最小主应力因开挖卸荷作用的影响而急剧减小，不同溶洞水压下的围岩最大主应力终值相差较小。在墙脚位置处，前 9 开挖步过程中最大主应力值呈现较小幅度的增长，第 9 开挖步后围岩应力开始释放，当溶洞水压越大时，对应的应力释放越早；最小主应力随隧道开挖不断增大，增长速率也在逐渐增大，当溶洞水压越大时，对应的最小主应力值越大。

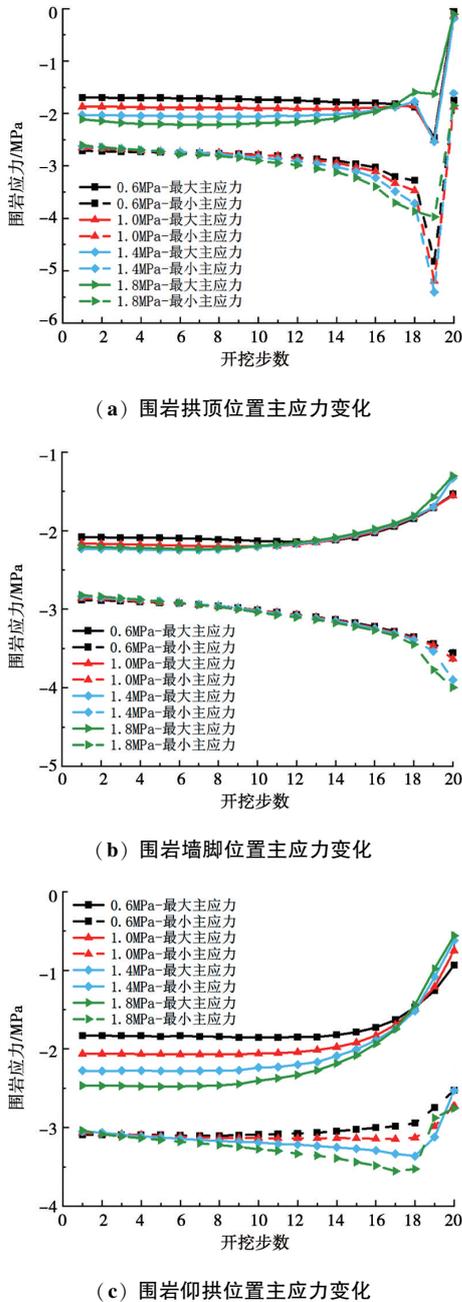


图 6 不同溶洞水压下隧道开挖过程中监测断面围岩主应力变化情况
Fig. 6 Change of principal stress of surrounding rock in monitoring section during tunnel excavation under different water pressure of karst cave

在仰拱位置处, 隧道开挖前期最大主应力基本保持不变, 然后应力逐渐开始释放, 应力的减小速率逐渐增大, 当溶洞水压越大时, 对应的应力释放越早, 释放率也越大。在前 18 隧道开挖步中, 最小主应力出现小幅波动, 在 18 开挖步完成后, 最小主应力值出现骤降, 应力发生释放, 且溶洞水压越大对应的应力的释放率越大。

3.2 不同溶洞水压下围岩的位移变化规律

根据数值计算结果, 得到隧道监测断面上特征点的位移曲线, 如图 7 所示

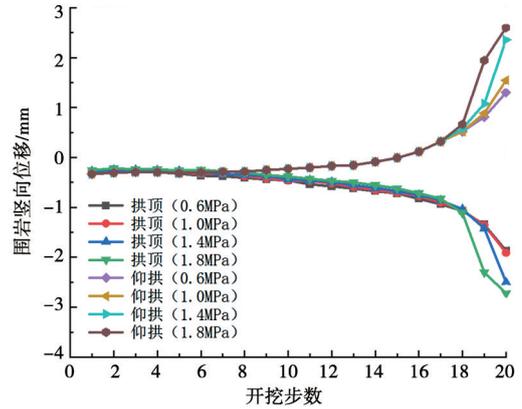


图 7 隧道开挖过程中监测断面围岩位移变化情况
Fig. 7 Displacement change of surrounding rock in monitoring section during tunnel excavation

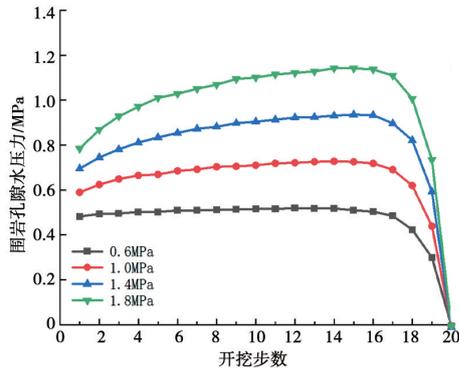
如图 7 所示, 拱顶位置处的围岩出现向下的位移, 位移变化量随着隧道开挖过程逐渐增大, 溶洞水压为 0.6 MPa、1.0 MPa、1.4 MPa、1.8 MPa 时对应的拱顶位置处最大竖向位移分别为 1.49 mm、1.54 mm、2.11 mm、2.36 mm, 溶洞水压越大, 对应拱顶位置处的围岩竖向位移值越大。仰拱位置处的围岩出现向上的隆起位移, 位移变化量随着隧道开挖过程逐渐增大, 溶洞水压为 0.6 MPa、1.0 MPa、1.4 MPa、1.8 MPa 时对应的仰拱位置处最大隆起位移分别为 1.39 mm、1.59 mm、2.41 mm、2.65 mm, 溶洞水压越大, 对应仰拱位置处的围岩竖向隆起值越大。

3.3 不同溶洞水压下围岩的孔隙水压力变化规律

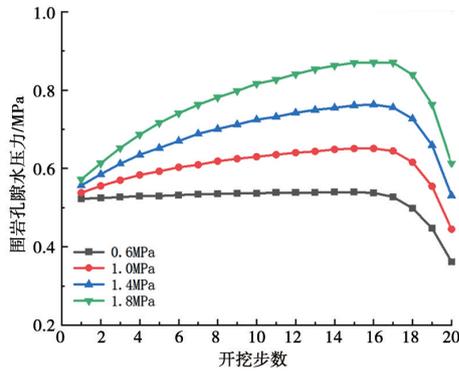
根据数值计算结果, 得到隧道监测断面上特征点的孔隙水压力变化曲线, 如图 8 所示。

如图 8 所示, 在前 15 开挖步中, 拱顶、边墙与仰拱位置处的围岩孔隙水压力均呈小幅增长的趋势, 且当溶洞水压越大时, 对应的围岩孔隙水压力增幅越大, 在完成第 15 个开挖步后, 围岩孔隙水压力出现骤降, 且当溶洞水压越大时, 对应的孔隙水压力消散速率越大, 在完成隧道开挖后, 拱顶位置处的最终孔隙水压力消散为 0, 而在边墙与仰拱位置处, 孔隙水压力未完全消散。

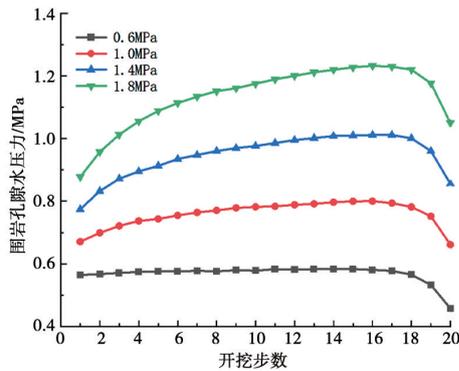
岩土力学



(a) 围岩拱顶位置主应力变化



(b) 围岩墙脚位置主应力变化



(c) 围岩仰拱位置主应力变化

图8 不同溶洞水压下隧道开挖过程中监测断面围岩主应力变化情况
Fig.8 Change of principal stress of surrounding rock in monitoring section during tunnel excavation under different water pressure of karst cave

4 结论

本文依托柳州经合山至南宁高速公路项目中的吾排隧道实际工程,通过FLAC 3D软件进行建模与计算,研究位于掌子面前方的溶洞在隧道开挖过程中对隧道的的影响规律,分析不同围岩级别、溶洞水压下隧道围岩在施工过程中的稳定性影响

规律,得到如下结论:

(1) 在隧道开挖过程中,围岩级别越高,相同开挖步对应的最大主应力与最小主应力值越大,围岩的变形位移值越小;溶洞水压越大,相同开挖步对应的最大主应力与最小主应力值越大,围岩的变形位移值越大。

(2) 拱顶位置处的应力在开挖前期小幅波动,而后迅速增大再急剧减小,墙脚位置处的主应力值在开挖前期保持相对稳定,而后变化率逐渐增大,仰拱位置处主应力值在开挖前期基本保持不变,然后急剧增长;拱顶、仰拱位置处的位移在前期缓慢增加,在开挖到一定深度时开始急剧增长。

参 考 文 献

- [1] 王梦恕. 中国盾构和掘进机隧道技术现状、存在的问题及发展思路 [J]. 隧道建设, 2014, 34 (3): 179-187.
- [2] 童建军, 桂登斌, 王明年, 等. 岩溶隧道围岩级别修正方法研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 2021, 41 (S1): 99-107.
- [3] 杨坤, 肖维民, 王丽君, 等. 上伏落水洞岩溶隧道围岩力学响应数值分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17 (S2): 637-644.
- [4] 张京亮, 夏志杰, 刘新荣, 等. 隐伏溶洞影响下隧道开挖稳定性数值模拟分析 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (13): 5455-5462.
- [5] 曹林卫, 黄明利, 杨泽, 等. 隧道与溶洞间复合围岩抗水压能力数值模拟 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (8): 3349-3357.
- [6] 陈秀雯, 刘家奇, 张浩, 等. 西南地区岩溶富水隧道坍塌力学机理及处治措施 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (36): 15639-15645.
- [7] 金美海, 刘新荣, 钟祖良. 岩溶隧道拱顶局部水压作用下衬砌受力特征研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17 (4): 1099-1105+1131.
- [8] 樊浩博, 周定坤, 刘勇, 等. 富水管道型岩溶隧道衬砌结构力学响应特征研究 [J]. 岩土力学, 2022, 43 (7): 1884-1898.
- [9] 邹洋, 彭立敏, 张智勇, 等. 基于突变理论的岩溶隧道拱顶安全厚度分析与失稳预测 [J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18 (10): 2651-2659.
- [10] 王万锋, 杨永泰, 陆钰铨, 等. 喀斯特地貌区隧道与隐伏充填溶洞临界安全距离分析 [J]. 中国岩溶, 2023, 1-12.
- [11] 马国民, 张秀丽, 杨华清. 岩溶隧道突涌水机制及安全临界条件研究 [J]. 安全与环境工程, 2022, 29 (2): 64-70.
- [12] 肖喜, 赵晓彦, 张巨峰, 等. 岩溶隧道涌突水破坏模式分类及防突厚度研究 [J]. 工程地质学报, 2022, 30 (2): 459-474.