

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2019.01.004

花岗岩残积土隧道渗流效应数值模拟研究

蒋凌云, 张宏, 蒋美幸, 罗雯

(吉首大学 张家界学院, 湖南 张家界 427000)

摘要: 为探讨渗流效应对花岗岩残积土隧道的影响, 通过将水注入围岩中实现渗流目的, 并进行数值模拟。模拟过程中, 设置了4组水压力, 分别为0, 50, 100, 150 kPa, 得到了不同压力与位移和支护结构之间的关系。研究表明: 当围岩孔隙水压力为50 kPa时, 不宜进行上台阶开挖; 当围岩孔隙水压力为100 kPa时, 不宜进行下台阶开挖。隧道的开挖受水压力的影响较大, 水压力越大, 渗流范围越广, 同时仰拱隆起现象越严重, 此时顶部衬砌结构发生较大变形, 故开挖隧道时应进行支护与监测。支护好上台阶后, 应及时对围岩进行支护, 以避免渗流过广而导致围岩出现较大位移。隧道下台阶的施工受多因素的影响, 应及时对拱顶部位进行加固, 避免出现工程事故。

关键词: 花岗岩残积土; 围岩压力; 支护体系; 渗流效应; 数值模拟

中图分类号: U451

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2019)01-0023-08

引文格式: 蒋凌云, 张宏, 蒋美幸, 等. 花岗岩残积土隧道渗流效应数值模拟研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(1): 23-30.

A Numerical Simulation Study on Seepage Effect of Granite Residual Soil Tunnel

JIANG Lingyun, ZHANG Hong, JIANG Meixing, LUO Wen

(Zhangjiajie College, Jishou University, Zhangjiajie Hunan 427000, China)

Abstract: In order to study the influence of seepage effect on granite residual soil tunnel, seepage is realized by injecting water into surrounding rock, followed by a numerical simulation. In the simulation process, four groups of water pressures (0, 50, 100 and 150 kPa) have been set up, thus obtaining the relationship between different pressures, displacements and supporting structures. The results show that, with the pore water pressure of surrounding rock being 50 kPa, the excavation of the upper step is unfavorable; with the pore water pressure of surrounding rock being 100 kPa, the excavation of the lower step is more unfavorable. Tunnel excavation is greatly influenced by water pressure. The larger the water pressure is, the wider the seepage range is, and the more serious the inverted arch uplift will be. At this time, the top lining structure is characterized with a large deformation, which makes the supporting and monitoring of the tunnel excavation quite necessary. After supporting the upper steps, a timely supporting should be given to the surrounding rock so as to avoid a large displacement caused by excessive seepage. The construction of the lower steps of the tunnel is influenced by multiple factors, and the vault should be reinforced in time to avoid unnecessary engineering accidents.

Keywords: granite residual soil; surrounding rock pressure; supporting system; seepage effect; numerical simulation

收稿日期: 2018-03-12

基金项目: 吉首大学张家界学院科研基金资助项目 (zyyb201705)

作者简介: 蒋凌云 (1989-), 女, 湖南永州人, 吉首大学张家界学院教师, 硕士, 主要研究方向为岩土工程与建筑材料,

E-mail: 858181290@qq.com

1 研究背景

花岗岩残积土因具有大孔隙比、高压缩性能与高强度、遇水易发生崩解等特性，故在对花岗岩浅埋隧道进行开挖的过程中，容易引发隧道坍塌等多种工程地质灾害，存在严重的工程隐患^[1-3]。

在充水或富水条件下，花岗岩残积土通常处于松软状态，其土体强度与水渗流效应有关^[4-5]。因此，研究渗流对花岗岩残积土隧道的影响，有利于指导花岗岩隧道的设计与施工，预防与控制隧道开挖过程中地质灾害的发生。

现阶段分析隧道围岩渗流-变形关系的方法主要有现场试验、室内模型试验和数值仿真3种^[6-8]。近年来，有诸多学者^[9-11]通过建立室内试验模型，开展了关于隧道围岩稳定性方面的模型试验，如中国生等^[12]按照相似比理论，采用1:15的比例浇筑了试验模型，并通过模拟隧道推进式循环爆破开挖方式，以同一测点处岩体爆破前后的声速变化评价隧道围岩的损伤程度，探寻爆破参数的变化对振动效应的影响。在这一研究方法中，虽然可以通过注水的方式模拟在围岩中发生的渗流现象，但是因为注水量难以控制，导致得到的结果不够理想^[13]。而在实际工程中，土体的含水量较容易被测得，且通过建立数值仿真模型，围岩渗流也易于被控制^[14]。因此，本研究拟对福建省沙县端西隧道洞口的开挖与支护进行FLAC3D软件模拟，并结合现场开挖实测数据，得到围岩在不同孔隙水压条件下花岗岩残积土隧道围岩应力、围岩变形和支护体系受力图，进而分析渗流对围岩的影响，以期为花岗岩残积土隧道的支护与施工提供一定的理论参考。

2 工程概况

端西隧道位于福建省沙县高砂镇境内，隧道长为6 216 m，该段围岩的主要成分为花岗岩残积土，隧道出口端如图1所示。



图1 端西隧道出口

Fig. 1 Duan-xi Tunnel exit

3 数值模型的建立

3.1 模型尺寸的选取及网格划分

依据已有的工程经验，地下洞室在开挖过程中，通常会引引起3~5倍洞径范围内的围岩应力发生变化。故本研究的试验模型中，对于端西隧道拱顶至上边界的高度取45 m，仰拱到下边界的高度取55 m，隧道轮廓线到两边的宽度都取55 m^[15]。

本模型的两边和下方有约束，即 $\mu_x=0$ 、 $\mu_z=0$ ，上方无约束。又因本隧道的埋深较深，上覆土层可以用堆载的方式进行模拟，因而可构造出如图2所示的隧道网格模型。

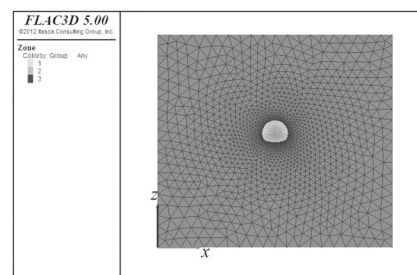


图2 隧道网格模型图

Fig. 2 Tunnel mesh model diagram

3.2 本构模型和参数确定

根据洞口段工程地质资料，采用Mohr-Coulomb本构模型对其进行模拟，各参数及其取值见表1。

表1 本构模型参数及其取值

Table 1 Constitutive model parameters with their values

参数类别	参数名称	取值
地层围岩力学参数	土的重度 / (kN·m ⁻³)	17.3
	体积模量 / GPa	1.8
	剪切模量 / GPa	0.47
	泊松比	0.25
	内摩擦角 / (°)	25.77
	内聚力 / kPa	0.03
	抗拉强度 / kPa	0.054
流固耦合计算参数	围岩孔隙率	0.55
	渗透率 / (m ² ·Pa ⁻¹ ·s ⁻¹)	1e ⁻¹⁰
	水的密度 / (kg·m ⁻³)	1.0 × 10 ³
	体积模量 / GPa	2
衬砌结构壳体单元参数	抗拉强度 / kPa	1.0
	弹性模量 / GPa	15
	密度 / (kg·m ⁻³)	7 000
	泊松比	0.25
	厚度 / m	0.3
锚杆结构锚索单元参数	锚杆长度 / m	3.8
	弹性模量 / GPa	45
	水泥圈加固周长 / m	1.5
	水泥浆耦合法向刚度 / GPa	15
	水泥浆耦合剪向刚度 / GPa	15
	水泥浆耦合黏聚力 / MPa	1.0

3.3 渗流边界及渗流方向

水在围岩中发生渗流时, 其渗流边界不超过模型边界, 并且渗流方式以竖向渗流为主, 同时向周边进行扩散。

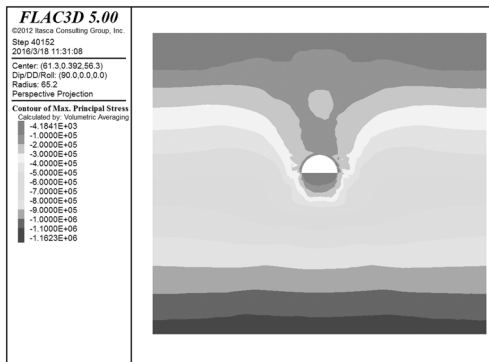
3.4 数值模拟方案

本研究采用上、下台阶法开挖隧道, 首先通过向隧道周边围岩注入 4 组水压力模拟渗流现象, 水压力大小分别为 0, 50, 100, 150 kPa, 然后进行隧道开挖与支护模拟。

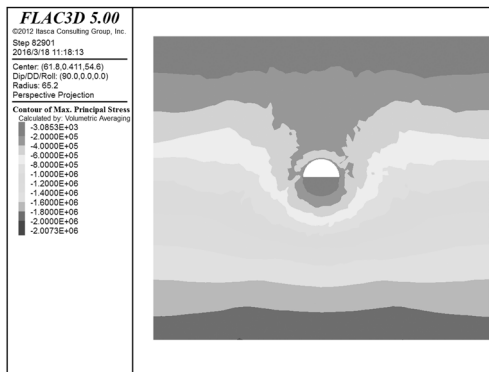
4 模拟结果与分析

4.1 围岩应力模拟结果

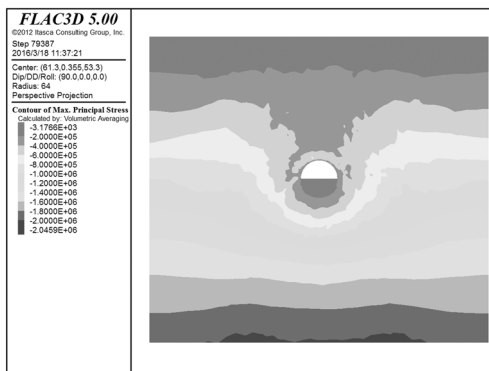
图 3 和图 4 分别为模拟所得不同水压力条件下, 上、下台阶开挖引起的围岩最大主应力云图。



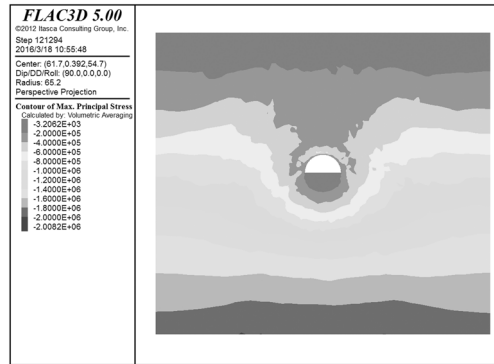
a) 水压力为 0 kPa



b) 水压力为 50 kPa



c) 水压力为 100 kPa



d) 水压力为 150 kPa

图 3 不同水压力下台阶开挖引起的围岩最大主应力云图

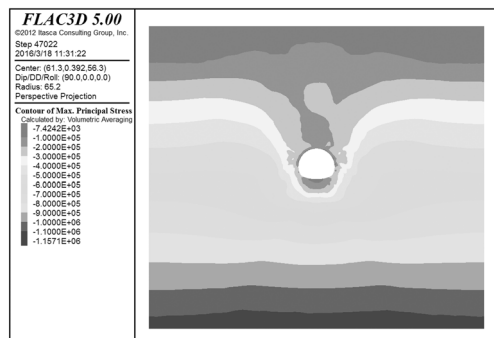
Fig. 3 Maximum principal stress map of surrounding rock caused by excavation of the upper steps under different confining pressures

由图 3 可以得知, 在不同水压渗流条件下上台阶开挖过程中:

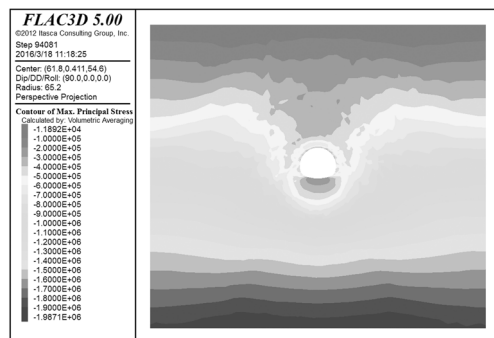
1) 围岩侧墙的最大主应力先随着水压力的增加呈显著增大的变化趋势, 至围岩水压力增大为 50 kPa 后, 围岩侧墙最大主应力随着围岩水压力的增大而呈缓慢增加的变化趋势。

2) 对于水压力为 0 kPa 的隧道围岩, 在开挖上台阶并且支护后, 其拱顶以上围岩和隧道周边围岩侧墙的最大主应力都高于有水压力的隧道围岩。

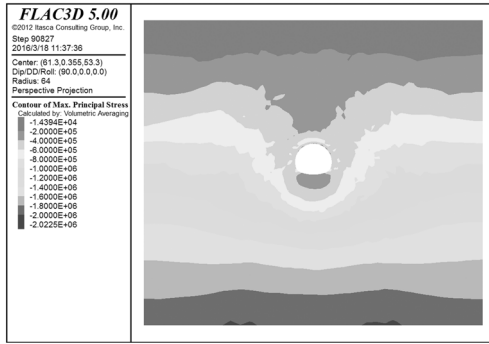
3) 当隧道存在水压力时, 在隧道围岩拱腰处的围岩最大主应力略高于拱顶处的, 可能是因为拱顶处的围岩遇水出现了局部崩解。



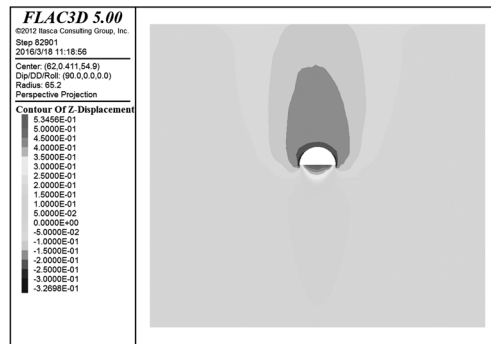
a) 水压力为 0 kPa



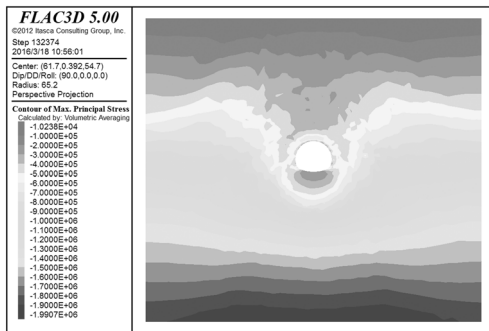
b) 水压力为 50 kPa



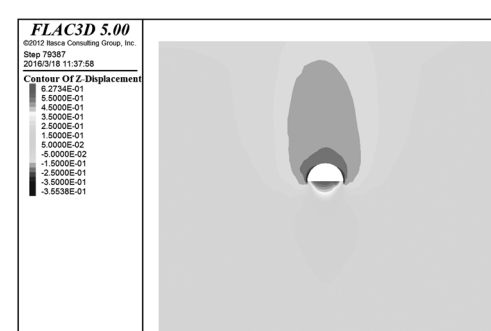
c) 水压力为 100 kPa



b) 水压力为 50 kPa



d) 水压力为 150 kPa



c) 水压力为 100 kPa

图 4 不同水压力下下台阶开挖引起的围岩最大主应力云图

Fig. 4 Maximum principal stress map of surrounding rock caused by excavation under different confining pressures

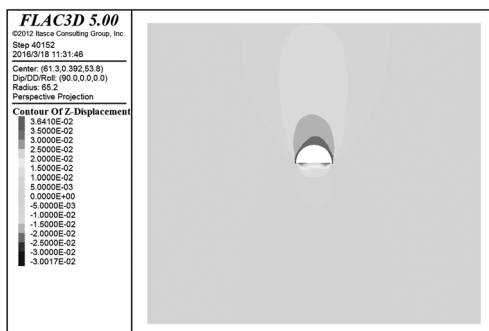
由图 4 可以得知, 在 4 种不同大小水压力下下台阶开挖过程中:

- 1) 无水压力的隧道, 其围岩侧墙的最大主应力略低于有水压力的隧道围岩侧墙最大主应力。
- 2) 当水压力超过 50 kPa 时, 同一部位的围岩侧墙的最大主应力随着水压力的增加反而降低。

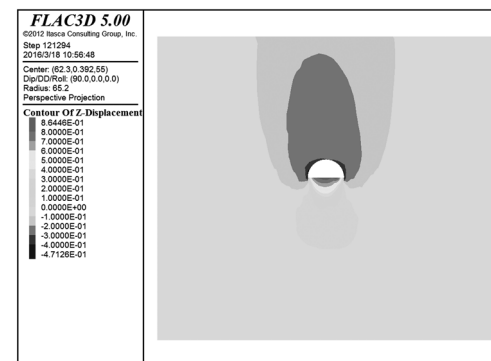
3) 当水压力为 100 kPa 时, 可以发现围岩各点处的最大主应力都略高于其它 3 种情况的。换言之, 不宜在水压力为 100 kPa 时进行隧道开挖。因此, 在隧道开挖实际施工过程中, 要随时观察水对隧道围岩的影响。

4.2 围岩变形模拟结果

图 5 和图 6 为模拟所得不同水压力下, 上、下台阶开挖引起的围岩竖向位移云图。



a) 水压力为 0 kPa



d) 水压力为 150 kPa

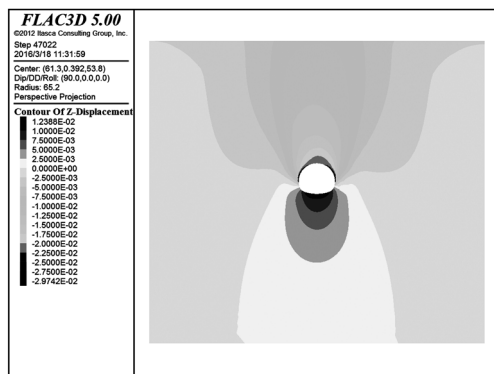
图 5 不同水压力下上台阶开挖引起的围岩竖向位移云图

Fig. 5 Vertical displacement of surrounding rock caused by excavation of upper steps under different water pressures

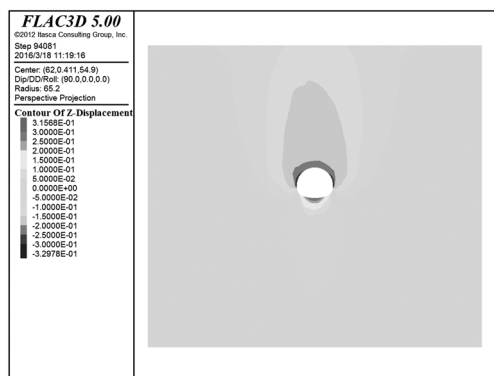
由图 5 可以得知, 在 4 种不同大小水压力下上台阶开挖过程中:

- 1) 在 4 种水压力下下台阶均存在局部隆起现象, 且下台阶土体的隆起范围和隆起高度都随着围岩水压力的增加而增加。

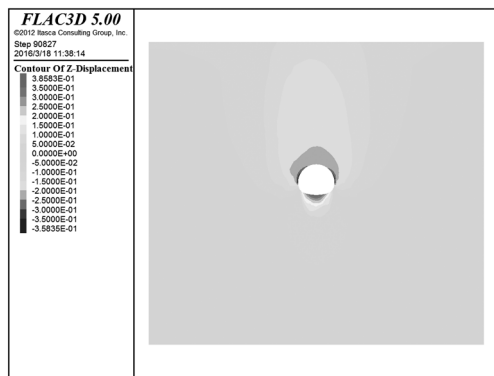
2) 4 种水压力作用下, 围岩的拱顶均略有沉降, 并且拱顶的沉降值随着围岩水压力的增大呈现先降低后增加的变化趋势。分析其原因, 可能是由于低水压力在一定程度上能提高土体的黏结力, 而随着水压力的进一步增大, 花岗岩残积土遇水后会存在部分崩解, 导致拱顶处产生较大位移。



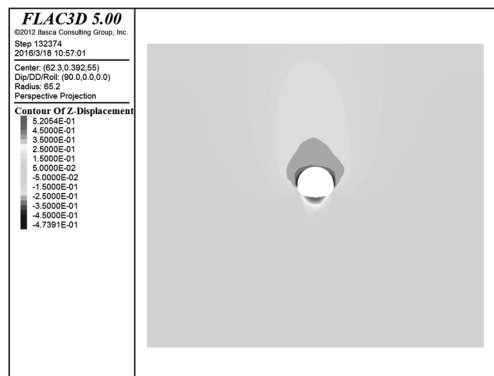
a) 水压力为 0 kPa



b) 水压力为 50 kPa



c) 水压力为 100 kPa



d) 水压力为 150 kPa

图 6 不同水压力下台阶开挖引起的围岩竖向位移云图

Fig. 6 Vertical displacement of surrounding rock caused by excavation under different water pressures

由图 6 可以得知, 在下台阶开挖过程中:

1) 各水压力下隧道仰拱均存在向上隆起的现象, 且仰拱向上隆起的高度与范围均随着围岩水压力的增大而增加。故隧道断面开挖完成后, 应及时对仰拱进行加固处理。

2) 开挖隧道下台阶时, 已加固的上台阶部位拱顶处也产生了较大的竖向位移, 其值随着围岩孔隙水压力的增大而增加。因而在整个隧道开挖过程中, 应着重监测隧道拱顶的位移。

在隧道地表和拱顶共设置了 6 个观测点(见图 7), 其开挖工序与各观测点位移间的关系见图 8 和图 9。

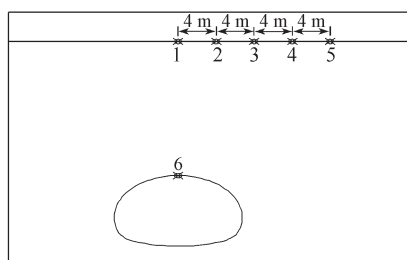


图 7 观测点布置图

Fig. 7 Layout of observation points

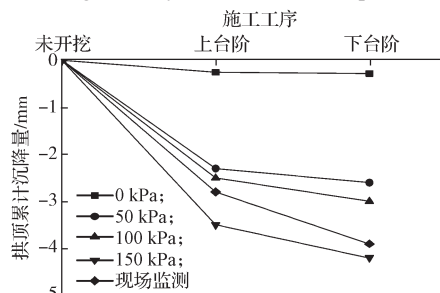
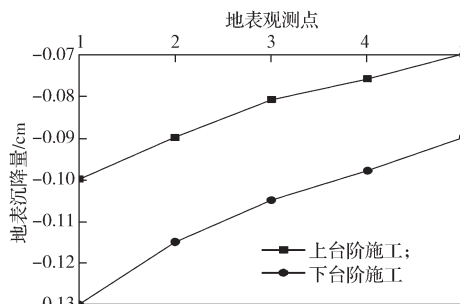
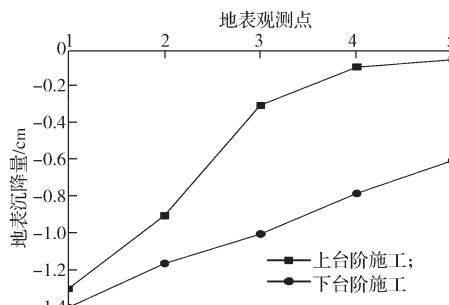


图 8 拱顶位移 - 施工工序曲线

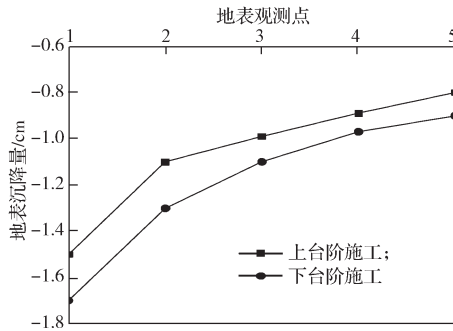
Fig. 8 Vault displacement-construction process curves



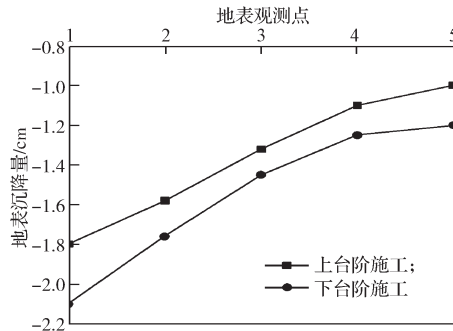
a) 水压力为 0 kPa



b) 水压力为 50 kPa



c) 水压力为 100 kPa



d) 水压力为 150 kPa

图 9 地表不同观测点位移 - 施工工序曲线

Fig. 9 Displacement of different observation points on the earth's surface-construction process curves

观察图 8 和图 9 可以得知:

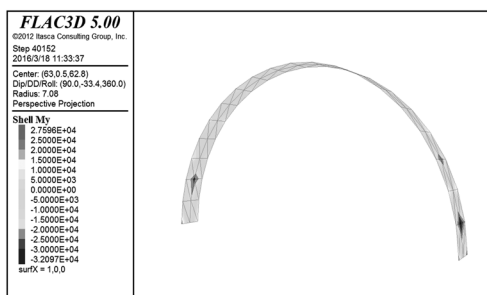
1) 围岩水压力越大, 同一监测部位的沉降量也越大。

2) 当围岩水压力为 0 kPa 时, 整个隧道开挖过程中, 隧道拱顶沉降量和地表沉降量都略低于其它 3 种工况下的沉降量。当围岩水压力为 50 kPa 时, 下台阶的开挖致使监测部位 3~5 处产生了较大的沉降量, 故建议实际工程中在下台阶施工前, 应事先排水或采取其它有效措施。

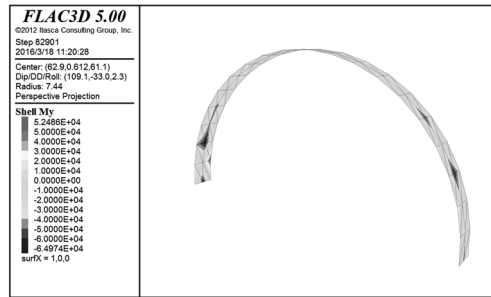
3) 进行隧道下台阶开挖时, 拱顶的现场监测位移量变化较为明显, 说明实际现场施工受外界因素的影响较大。

4.3 支护体系受力模拟结果

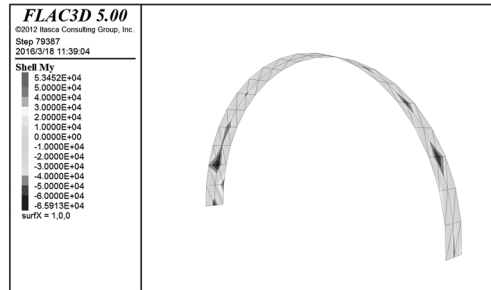
图 10 和图 11 为模拟所得不同水压力作用下上、下台阶开挖过程中, 施工引起的支护体系的弯曲应力云图, 其反映了各支护体系的受力情况。



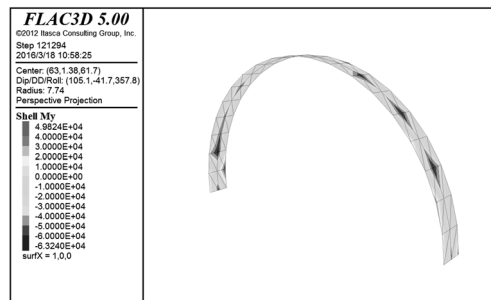
a) 水压力为 0 kPa



b) 水压力为 50 kPa



c) 水压力为 100 kPa



d) 水压力为 150 kPa

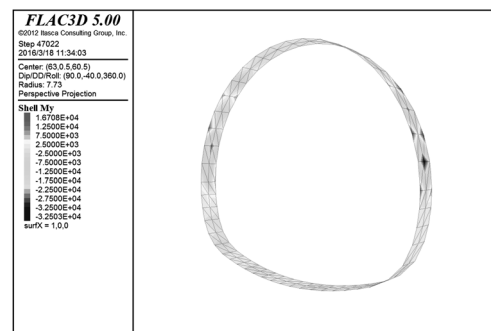
图 10 不同水压力下上台阶开挖引起的支护体系弯曲应力云图

Fig. 10 Bending stress of supporting system caused by the excavation of upper stage under different water pressures

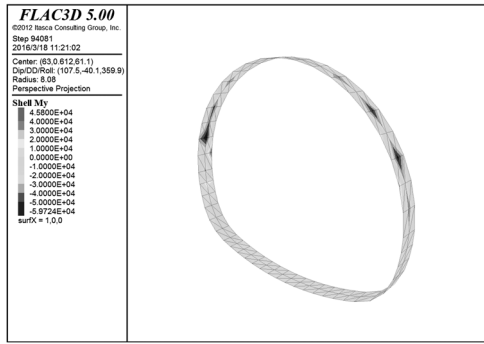
由图 10 可以得知:

1) 开挖上台阶时, 拱腰处衬砌出现局部压应力, 衬砌结构在 y 轴方向的弯曲应力随着水压力的增大呈现出先增加后减少的变化趋势。

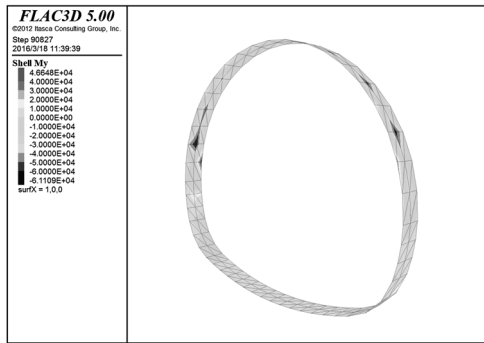
2) 衬砌结构在 y 轴负方向产生的弯曲应力区域随着围岩水压力的增大不断扩大, 且不断向拱顶方向延伸。故当围岩水压力较大时, 应提前排水, 以确保围岩具有一定的稳定性。



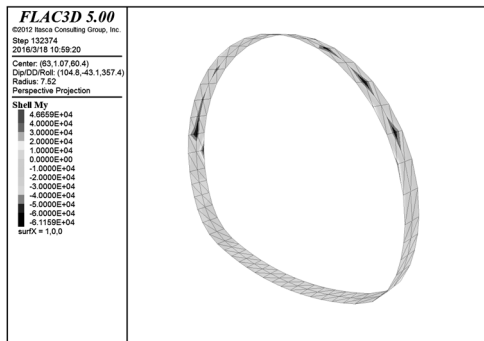
a) 水压力为 0 kPa



b) 水压力为 50 kPa



c) 水压力为 100 kPa



d) 水压力为 150 kPa

图 11 不同水压力下下台阶开挖引起的支护体系弯曲应力云图

Fig. 11 Bending stress of supporting system caused by excavation under different water pressures

由图 11 所示不同水压力下下台阶开挖引起的支护体系弯曲应力云图可以得知, 在 4 种不同大小水压力下下台阶开挖过程中:

- 1) 当下台阶开挖完成后, 衬砌结构在 y 轴方向的弯曲应力随着围岩水压力的增加而增大;
- 2) 除隧道仰拱处几乎不产生 y 轴方向的弯曲应力之外, 其它部位都在 y 轴方向产生了较大的弯曲应力, 特别是开挖完下台阶后, 上台阶对应的拱圈在 y 轴方向的弯曲应力急剧增大。因此, 实际工程施工中, 为了避免下台阶的开挖对上台阶围岩产生较大的影响, 下台阶的开挖应在上台阶开挖完成并且支护之后进行。

4.4 施工检测结果

在模拟试验过程中, 同时对实际施工的隧道不同部位进行了现场监测, 具体监测点的布置情况如图 12 所示。

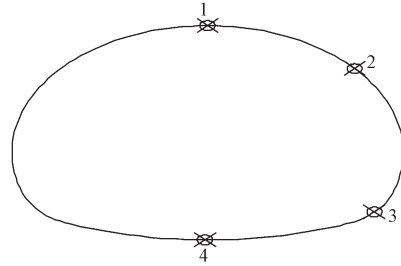
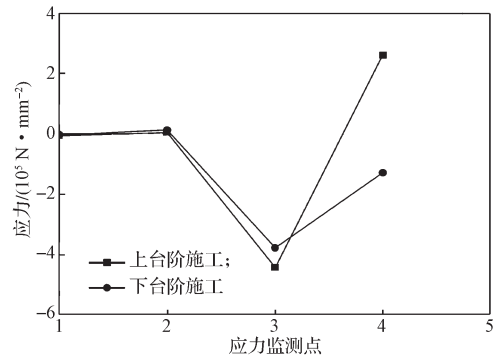


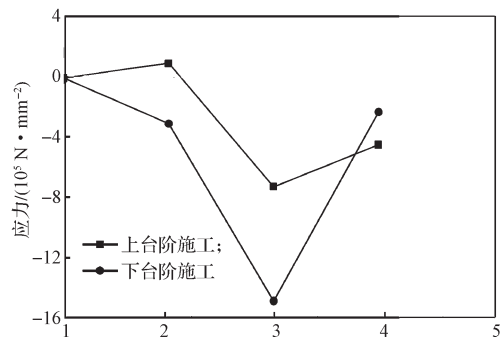
图 12 观测点布置图

Fig. 12 Layout of observation points

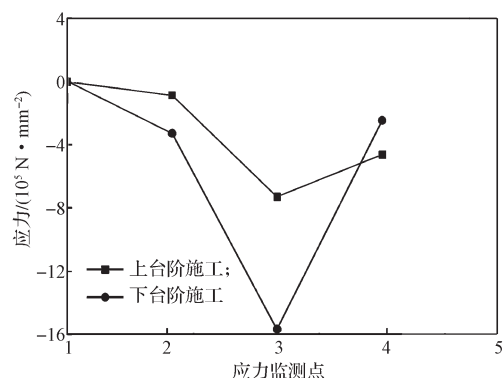
本研究得到的不同水压力情况下, 施工工序对各观测点的应力变化曲线, 如图 13 所示。



a) 水压力为 0 kPa



b) 水压力为 50 kPa



c) 水压力为 100 kPa

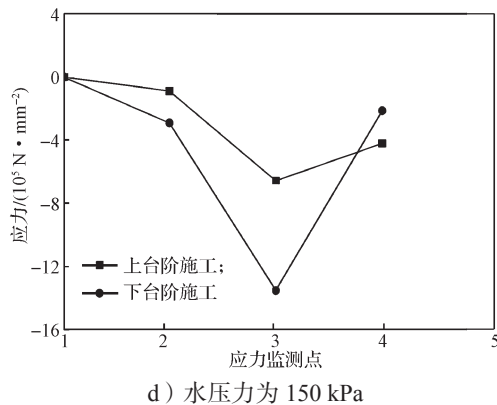


图 13 不同监测点应力 - 施工工序曲线图

Fig. 13 Different monitoring points stress-construction process curves

由图 13 可看出：1) 当围岩水压力为 0 kPa 和 50 kPa 时，隧道拱腰处以压应力为主。2) 随着围岩水压力的增大，拱腰部位的压应力逐渐消散。3) 同一监测点的应力值随着围岩水压力的增大呈现出先增大后减少的变化趋势。4) 隧道开挖完成后，拱顶、拱腰和拱址处应力值均稍有增大，而仰拱的应力值略有降低，故隧道开挖过程中应及时对产生应力较大的部位进行加固。

5 结论

对端西隧道的开挖与支护体系运用 FLAC3D 进行了数值模拟，通过将水注入围岩中实现渗流目的，课题组设置了 4 组水压力，分别为 0, 50, 100, 150 kPa，得到了不同水压力与位移和支护结构之间的关系。同时，结合现场实际监测数据，进一步探讨了渗流对花岗岩残积土隧道的影响，具体结论如下：

1) 上台阶开挖过程中，随着围岩孔隙水压力增加，围岩压力逐渐增大，可能是由于水在花岗岩残积土中发生渗流，导致土体局部崩解。当围岩孔隙水压力达 100 kPa 时，其对隧道的下台阶开挖非常不利。

2) 开挖隧道时，随着围岩水压力增加，仰拱影响范围相应增大，且会导致仰拱局部隆起。同时，下台阶开挖在已加固的上台阶拱顶处也能产生较大竖向位移，其值随着围岩孔隙水压力的增大而增大。因而在整个隧道开挖过程中，应着重监测隧道拱顶处位移。

3) 完成上台阶开挖后，衬砌结构在 y 轴负方向产生的弯曲应力区域随着围岩孔隙水压力的增大不断扩大，且不断向拱顶方向延伸。当完成下台阶开挖后，上台阶部位在 y 轴方向的弯曲应力迅速增大，故为了避免下台阶的开挖对上台阶围岩产生较大影响，下台阶的开挖应在上台阶开挖支护完成后进行。

4) 实际监测数据中，与其它情况比较，下台阶开挖引起拱顶发生了较大沉降，表明现场施工受外界因素影响较大，故隧道施工时应着重加固拱顶部位。

参考文献：

- [1] 杨茂长. 福建沿海地区花岗岩残积土工程特性探讨 [J]. 资源环境与工程, 2010, 24(1): 41-43.
YANG Maochang. Discussion on Characteristics of the Residual Soil of Granite in Coastal Areas of Fujian [J]. Resources Environment & Engineering, 2010, 24(1): 41-43.
- [2] 梁仕华, 周世宗, 张朗, 等. 广州东部地区花岗岩残积土物理力学指标统计分析 [J]. 广东工业大学学报, 2015, 32(1): 29-33, 49.
LIANG Shihua, ZHOU Shizong, ZHANG Lang, et al. Statistics Analysis of Physical and Mechanical Indexes of Granite Residual Soil in Eastern of Guanzhou [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2015, 32(1): 29-33, 49.
- [3] LEI M F, PENG L M, SHI C H, et al. Upper Bound Analytical Solution for Surrounding Rock Pressure of Shallow Unsymmetrical Loading Tunnels [J]. Journal of Central South University, 2015, 22(6): 2339-2347.
- [4] 任文峰, 高璇, 王星华, 等. 富水全风化花岗岩隧道变形规律与力学特性 [J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(2): 34-41.
REN Wenfeng, GAO Xuan, WANG Xinghua, et al. Deformation Rule and Mechanical Characteristic of Tunnel in Water-Rich Full-Weathering Granite Area [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(2): 34-41.
- [5] 路威. 富水强风化花岗岩地层浅埋大跨隧道施工地层变形机理研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
LU Wei. Study on Mechanism of Stratum Displacement Caused by Shallow Tunnels with Large-Span Constructed in Intensely Weathered Granite with Abundant Water [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [6] 李勇. 新型岩土相似材料的研制及在分岔隧道模型试验中的应用 [D]. 济南: 山东大学, 2006.
LI Yong. Development of a New Geo-Technical Similar Material and Its Application in Bifurcated Tunnel Model Test [D]. Jinan: Shandong University, 2006.
- [7] YANG Xiaoli, LI Wentao, PAN Qiuqing. Influences of Anisotropy and Inhomogeneity on Supporting Pressure of Tunnel Face with Kinematical Approach [J]. Journal of Central South University, 2015, 22: 3536-3543.
- [8] 蒋凌云. 复杂条件下花岗岩残积土隧道支护结构力学特性研究 [D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2016.

- et al. Software Design of Electromagnetic Calculation in Phase Shift Rectifier Transformer Based on Visual C++[J]. Electrical Application, 2007(8): 23-25.
- [4] 孙俊忠, 许伯强. 五相异步电动机的设计与参数计算[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(6): 84-90.
SUN Junzhong, XU Boqiang. Manufacturing Design and Parameter Calculation of Five-Phase Asynchronous Motor[J]. Electrical and Control Applications, 2017, 44(6): 84-90.
- [5] 季杏法. 小型三相异步电动机技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987: 50-96.
JI Xingfa. Technical Manual for Small Three-Phase Asynchronous Motor[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1987: 50-96.
- [6] 陈维, 姜远远. 二极异步电动机的设计[J]. 防爆电机, 2017, 52(4): 3-6.
HEN Wei, JIANG Yuanyuan. Design of Two-Pole Induction Motors[J]. Explosion-Proof Electric Machine, 2017, 52(4): 3-6.
- [7] 吴旭云, 吴旭志. 专用异步电动机电磁设计软件的数值计算方法[J]. 长春大学学报, 2005, 15(2): 12-14, 24.
WU Xuyun, WU Xuzhi. Numerical Calculation Methods of the Software for the Electromagnetism Design of Special Definite-Purpose Motor[J]. Journal of Changchun University, 2005, 15(2): 12-14, 24.
- [8] 王阳. 变频调速异步电动机设计探究[J]. 工业设计, 2017(12): 114-115.
WANG Yang. Design and Exploration of Asynchronous Motor with Variable Frequency Speed Regulation[J]. Industrial Design, 2017(12): 114-115.
- [9] 周凌. 多绕组移相整流变压器的设计研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.
ZHOU Ling. Study on the Design of Multi-Winding Phase Transformer Transformer[D]. Changsha: Hunan University, 2007.
- [10] 陈世坤. 电机设计[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2000: 115-395.
CHEN Shikun. Motor Design[M]. 2nd ed. Beijing: Machinery Industry Press, 2000: 115-395.
- [11] 李函霖. 对大中型异步电动机的设计方案的优化[J]. 科技展望, 2016, 26(8): 135.
LI Hanlin. Optimization of Design Scheme for Large and Medium-Sized Asynchronous Motor[J]. Science and Technology Outlook, 2016, 26(8): 135.

(责任编辑: 廖友媛)

(上接第30页)

- JIANG Lingyun. Study on Mechanical Properties of Supporting Structure for Granite Residual Soil Tunnel Under Complex Conditions[D]. Xiangtan: Hunan University of Science & Technology, 2016.
- [9] LIU J H, LIU X M, ZHANG Y J, et al. Numerical Analysis and Field Monitoring Tests on Shallow Tunnels Under Weak Surrounding Rock[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(10): 4056-4063.
- [10] 刘金云, 夏才初. 输水隧道动力模型试验中相似比尺规律的探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(3): 510-517.
LIU Jinyun, XIA Caichu. Study on Similarity Technique for Dynamic Model Test of Water-Conveyance Tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(3): 510-517.
- [11] LUI P P, LEE Y W, MOK T Y, et al. Alendronate Reduced Peri-Tunnel Bone Loss and Enhanced Tendon Graft to Bone Tunnel Healing in Anterior Cruciate Ligament Reconstruction[J]. European Cells and Materials, 2013, 25: 78-96.
- [12] 中国生, 敖丽萍, 付玉华. 循环爆破开挖下隧道围岩振动效应与损伤演化的模型实验[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(6): 853-860.
ZHONG Guosheng, AO Liping, FU Yuhua. Model Experimental Studies of Vibration Effect and Damage Evolution of Tunnel's Surrounding Rock Under Cyclic Blasting Excavation[J]. Explosion and Shock Waves, 2016, 36(6): 853-860.
- [13] 官伟. 软岩隧道围岩压力及关键部位支护研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2006.
GUAN Wei. Study on Surrounding Rock Pressure and Supports of Soft Rock Tunnels[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2006.
- [14] YANG Xiaoli, YANG Zihan, LI Yongxin, et al. Upper Bound Solution for Supporting Pressure Acting on Shallow Tunnel Based on Modified Tangential Technique[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(12): 3676-3682.
- [15] 蒋凌云, 陈秋南, 李腾飞, 等. 大跨度土质隧道自然成拱优化数值模拟研究[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2014, 26(4): 43-47.
JIANG Lingyun, CHEN Qiunan, LI Tengfei, et al. Research on Simulation and Optimization of Large-Span Soil Tunnel Under Natural Arching Rail[J]. Journal of Hunan University of Arts and Science(Natural Science Edition), 2014, 26(4): 43-47.

(责任编辑: 廖友媛)