

# 深埋隧道台阶法施工围岩压力拱的变化规律

徐泽沛

长沙理工大学土木工程学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2022年10月15日; 录用日期: 2022年11月9日; 发布日期: 2022年11月16日

## 摘要

通过分析隧道台阶法施工过程中围岩应力重分布的规律, 研究压力拱的动态变化, 得出: 两台阶法临时和最终上部压力拱的厚度均较相应侧压力拱大, 但坐标轴上最大应力相对增量均相应较小; 两台阶法临时上部压力拱向隧道壁移动而临时侧压力拱远离隧道壁移动形成相应最终压力拱, 而最终压力拱厚度和坐标轴上最大应力均较大; 两台阶法中随上台阶高度的增大, 临时上部压力拱逐渐向隧道壁移动并趋于稳定, 而临时侧压力拱逐渐远离隧道壁并趋于稳定, 临时压力拱厚度均先增大后趋于稳定, 坐标轴上最大应力均逐渐增大; 台阶数量不影响最终压力拱。

## 关键词

隧道压力拱, 台阶法, 应力分布, 台阶高度, 最大应力

# Regulation of Pressure Arch around Deep Buried Tunnel during Construction with Steps Method

Zepei Xu

School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan

Received: Oct. 15<sup>th</sup>, 2022; accepted: Nov. 9<sup>th</sup>, 2022; published: Nov. 16<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Through analysis of stress redistribution of surrounding rock during the tunnel construction process step, the dynamic changes of tunnel pressure arch were studied. The conclusions were gotten: in the two process steps the thickness of the temporary and final upper pressure arch is larger than that of the side pressure arch, but the maximum stress on the coordinate axis is relatively smaller, the temporary upper pressure arch moves to the tunnel and the temporary side

pressure arch moves away from the tunnel to form the corresponding final pressure arch, and the final pressure arch thickness and the maximum stress on the coordinate axis are larger, with the increase of the height of the upper step, the temporary upper pressure arch gradually moves away from tunnel and stabilized, the temporary side pressure arch gradually moves away from the tunnel and stabilized, the thickness of temporary pressure arch is increased and then stabilized, the maximum stress on the coordinate axis increases; the step quantities do not affect the final pressure arch.

## Keywords

Tunnel Pressure Arch, Step Method, Stress Distribution, Height of Step, Maximum Stress

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

隧道建设过程中,围岩应力变化是一个动态的过程,隧道压力拱的形成也是一个动态变化过程。受到施工方法等的影响,不同施工方法对其产生的影响也不同,所以施工方法选择不当会影响围岩应力分布及压力拱的形成,甚至造成工程事故[1][2][3]。目前隧道工程常用的施工方法有全断面法、台阶法等,台阶法灵活多变、适用性强,而且是实现其它施工方法的重要手段。台阶法是把工作面分成几部分开挖,相当于把隧道断面分为几块,每块的形状大小不同,每一块开挖后,围岩中形成不同阶段的临时压力拱,在这一过程中,应力分布的变化,压力拱的改变等都是选择相应施工方法时要考虑的内容。只有在施工过程中充分发挥了隧道压力拱的积极作用,才能更好地保证施工的安全,这也是新奥法所要求的充分发挥围岩的自承能力的关键所在,因为围岩的自承能力靠压力拱来体现[4]-[10]。

本文采用颗粒流方法从细观方面结合隧道台阶法施工的特点研究其施工过程中压力拱的变化规律。

## 2. 隧道台阶施工法简述

隧道台阶施工法是新奥法中适用性最广的施工方法,多适用于IV、V级围岩中。它将断面分成上断面和下断面两部分或多部分分别进行开挖,如图1所示,随着台阶长度和台阶高度的调整,它几乎可以用于所有的地层,因而是最常用的施工方法,采用台阶法开挖关键问题是台阶的划分形式[1]。

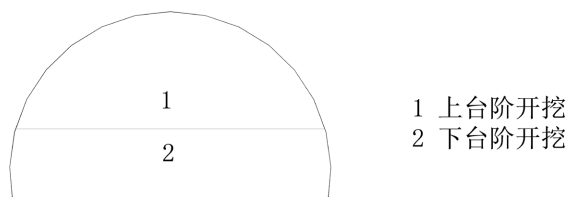


Figure 1. Construction procedure of steps method

图 1. 台阶法施工工序

## 3. 隧道压力拱理论

隧道压力拱是在荷载或初始应力场的作用下,当隧道开挖后,岩体产生不均匀位移,在隧道围岩中产生互相“楔紧”作用,于是在一定范围内的围岩中产生拱效应[11][12][13][14]。隧道开挖之前岩体处

于自然平衡的原岩应力状态，但原岩应力状态因隧道开挖，自然平衡被打破，围岩进行应力调整，重新分布，这也是围岩被动自行寻求自稳的固有特性。围岩应力重分布的过程是隧道压力拱形成的过程，围岩应力重分布的结果是形成二次应力状态，形成稳定的压力拱。二次应力状态中应力重分布形成的能承受外部荷载的加强区域即为隧道压力拱。

隧道压力拱是由水平应力重分布的上部压力拱和底部压力拱及垂直应力重分布的两侧压力拱组成的。隧道底部压力拱与上部压力拱的分布规律基本相同，所以，工程中只考虑上部压力拱和侧压力拱。上部压力拱的外界是水平应力极大值的梯度趋势线，内界是隧道开挖前后水平应力大小相等的线；侧压力拱的外界是垂直应力极大值的梯度趋势线，内界是隧道开挖前后垂直应力大小相等的线。

## 4. 两台阶法施工过程中围岩应力分布

### 4.1. 计算条件及计算模型

本文利用二维颗粒流软件研究隧道台阶法施工过程中的压力拱，本构模型采用接触粘接模型，几何模型长宽均为 10 m，圆形隧道半径为 1 m，颗粒及墙体参数如表 1，隧道断面开挖完成后岩体能自稳，并形成自然平衡压力拱，如图 2，模型的坐标原点在隧道中心，水平向右为 x 轴，竖直向上是 y 轴，圆形隧道的中心在坐标原点，垂直荷载  $p_y = 10 \text{ Mpa}$ ，水平荷载  $p_x = 5 \text{ Mpa}$ 。

Table 1. Parameters of particles and wall

表 1. 颗粒及墙体参数

$r/\text{cm}$	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$f$	$kn/(\text{N}/\text{m})$	$ks/(\text{N}/\text{m})$	$n\_bond/\text{N}$	$s\_bond/\text{N}$
2~5	2600	10.0	$5 \times 10^8$	$5 \times 10^8$	$1 \times 10^6$	$1 \times 10^6$

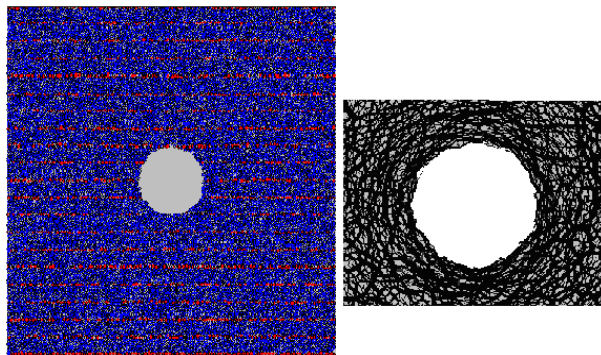


Figure 2. Model of tunnel after excavation

图 2. 隧道开挖后的模型

### 4.2. 上台阶开挖后围岩应力分布

文献[15]已研究了隧道断面形状、大小及初始地应力对压力拱的影响，所以根据其研究成果本文研究圆形小断面隧道台阶法施工时压力拱的变化规律。台阶法施工过程中隧道压力拱研究的台阶高度为净高的 1/4，即 0.5 m，上台阶开挖稳定后，应力分布如图 3，水平应力  $\sigma_x$  在(0.0,1.88)点出现极大值  $\sigma_{mx} = 5.81 \text{ Mpa}$ ，垂直应力  $\sigma_y$  在(1.27,0.75)点出现极大值  $\sigma_{my} = 13.56 \text{ Mpa}$ ，剪应力  $\tau_{xy}$  在台阶右上方为正，右下方为负。

上台阶开挖后，围岩应力重分布，形成临时压力拱，其参数如表 2，表中  $y_{内}$ 、 $y_{外}$ 、 $x_{内}$ 、 $x_{外}$  分别是上部压力拱和侧压力拱的内外界， $\sigma_{my}$ 、 $\sigma_{mx}$  分别是上部压力拱和侧压力拱坐标轴上最大的应力。

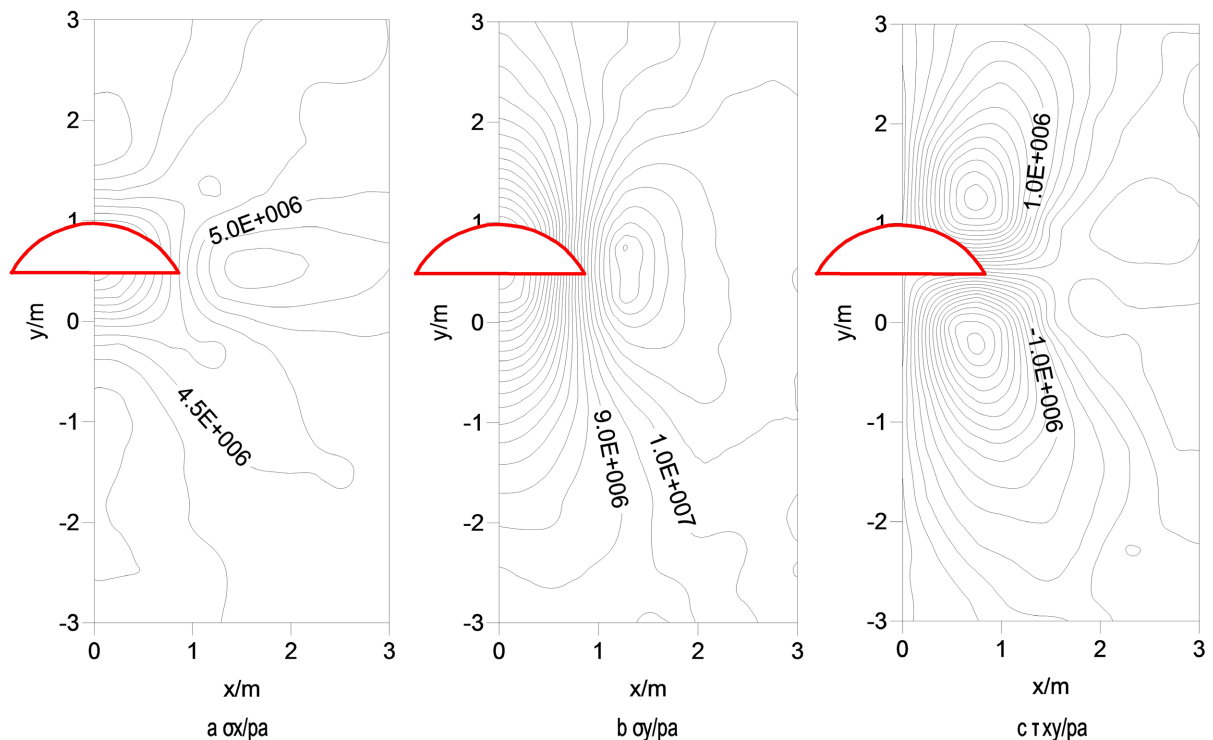


Figure 3. Stress distribution after the excavation of the upper step

图 3. 上台阶开挖后的应力分布

Table 2. Parameters of the temporary pressure arch after the excavation of the upper step

表 2. 上台阶开挖后临时压力拱的参数

上台阶高度/m	$y_{内}/m$	$y_{外}/m$	$x_{内}/m$	$x_{外}/m$	$\sigma_{xm}/Mpa$	$\sigma_{ym}/Mpa$
0.50	1.39	1.88	0.90	1.27	5.81	13.56

定义压力拱的厚度为外界减去内界，即  $y_{外} - y_{内}$  和  $x_{外} - x_{内}$ ；定义坐标轴上最大应力相对增量为现有最大应力减去初始应力之差除以初始应力的百分比，即  $(\sigma - \sigma_0)/\sigma_0$ 。则由表 2 可得，上台阶开挖后，上部压力拱的厚度(0.49 m)大于侧压力拱(0.37 m)，上部压力拱坐标轴上最大应力相对增量(16.2%)小于侧压力拱(35.6%)。

#### 4.3. 下台阶开挖后围岩应力分布

上台阶开挖稳定后，再进行下台阶开挖，下台阶开挖后，应力分布如图 4，形成最终压力拱。水平应力  $\sigma_x$  在(0.0,1.68)点出现极大值  $\sigma_{mx} = 6.89$  Mpa，垂直应力  $\sigma_y$  在(1.52,0.0)点出现极大值  $\sigma_{my} = 14.31$  Mpa，剪应力  $\tau_{xy}$  在隧道右上方为正，右下方为负。

下台阶开挖后，应力再次重新分布，形成最终压力拱，压力拱如表 3。

由表 3 可得，下台阶开挖后，上部压力拱的厚度(0.53 m)大于侧压力拱(0.49 m)，上部压力拱坐标轴上最大应力相对增量(39.8%)小于侧压力拱(43.1%)。

比较表 2 和表 3 可得，两台阶法施工过程中，最终上部压力拱内外界均小于临时上部压力拱，表明下台阶施工后，上部压力拱向隧道壁移动，但厚度在增大；而最终侧压力拱内外界均大于临时压力拱，表明下台阶施工后，侧压力拱远离隧道壁移动，且厚度增大，因为随着隧道开挖断面的进一步扩大，隧道上方向两侧转移更多荷载，要求隧道上方更大范围夹紧围岩，同时侧部更大范围承受上方转移的荷载，这样才能使围岩稳定。

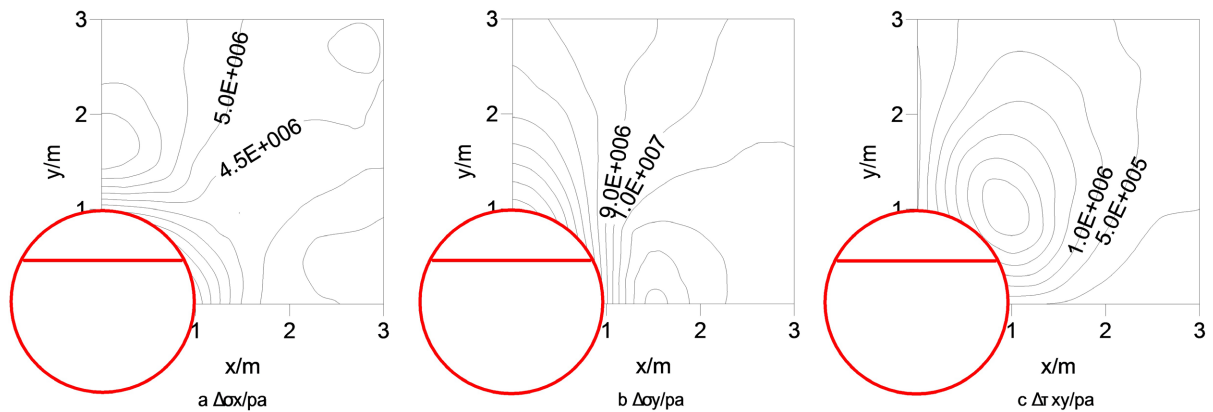


Figure 4. Stress distribution after the excavation of the lower step

图 4. 下台阶开挖后的应力分布

Table 3. Parameters of final pressure arch after the excavation of lower step

表 3. 下台阶开挖后最终压力拱的参数

上台阶高度/m	$y_{内}/m$	$y_{外}/m$	$x_{内}/m$	$x_{外}/m$	$\sigma_{xm}/Mpa$	$\sigma_{ym}/Mpa$
0.50	1.15	1.68	1.03	1.52	6.89	14.31

## 5. 台阶法施工方案对压力拱的影响

### 5.1. 两台阶法上台阶高度对临时压力拱的影响

隧道采用上下两台阶进行开挖,分别计算上台阶高度为断面净高的 1/8~7/8 时隧道开挖后的应力分布,得到上台阶开挖后形成的临时压力拱,其参数如表 4,由表 4 可得,上部压力拱内外界随上台阶高度的增大而减小,并趋于定值,压力拱的厚度逐渐增大并趋于定值,坐标轴上最大应力相对增量逐渐增大;而侧压力拱内外界随上台阶高度的增大而增大,并趋于定值,压力拱的厚度逐渐增大并趋于定值,坐标轴上最大应力相对增量逐渐增大;上部压力拱厚度较大,但坐标轴上最大应力相对增量较小。

Table 4. Parameters of the temporary pressure arch at different upper step height

表 4. 不同上台阶高度临时压力拱参数

上台阶高度/m	$y_{内}/m$	$y_{外}/m$	$x_{内}/m$	$x_{外}/m$	$\sigma_{xm}/Mpa$	$\sigma_{ym}/Mpa$
0.25	1.49	1.91	0.74	1.16	5.57	12.18
0.50	1.39	1.88	0.90	1.27	5.81	13.56
0.75	1.30	1.80	0.98	1.46	6.00	13.85
1.00	1.26	1.77	1.01	1.48	6.21	14.37
1.25	1.16	1.67	1.01	1.48	6.56	14.69
1.50	1.11	1.67	1.01	1.48	6.71	14.72
1.75	1.10	1.67	1.01	1.48	6.82	14.62

### 5.2. 两台阶法上台阶高度对最终压力拱的影响

隧道采用上下两台阶进行开挖,分别计算上台阶高度为净高的 1/8~7/8,且待围岩稳定后再开挖下台阶,隧道整个断面全部开挖完成后形成最终压力拱,其参数如表 5,由表 5 可得,压力拱各参数受上台阶高度的影响较小,而基本相同,但上部压力拱厚度较大,坐标轴上最大应力相对增量较小。

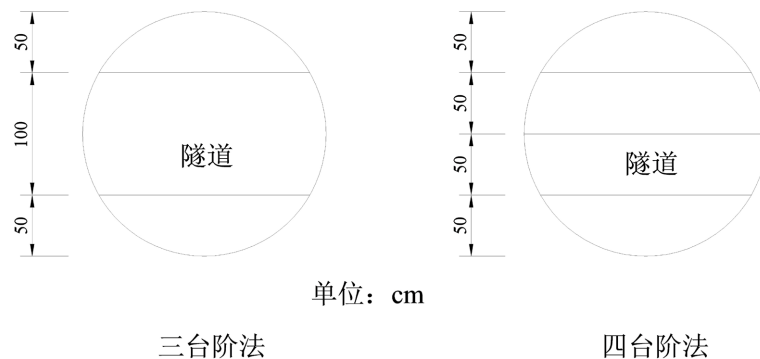
**Table 5.** Parameters of final pressure arch at different upper step height  
**表 5.** 不同上台阶高度最终压力拱参数

上台阶高度/m	$y_{内}/m$	$y_{外}/m$	$x_{内}/m$	$x_{外}/m$	$\sigma_{xm}/Mpa$	$\sigma_{ym}/Mpa$
0.25	1.15	1.67	1.04	1.52	6.88	14.28
0.50	1.15	1.68	1.03	1.52	6.89	14.31
0.75	1.13	1.67	1.01	1.48	7.04	14.61
1.00	1.14	1.67	1.01	1.48	6.99	14.61
1.25	1.14	1.67	1.01	1.48	6.98	14.62
1.50	1.16	1.67	1.01	1.48	6.98	14.62
1.75	1.15	1.67	1.01	1.48	6.99	14.65

### 5.3. 台阶数量对最终压力拱的影响

隧道全断面开挖相当于一个台阶施工，上下台阶开挖为两台阶施工，本文研究的三台阶、四台阶法施工工序如图 5，台阶法中还有更多台阶法，因工程实际中常用的台阶数量最多为四个，所以本文研究的台阶数量为二、三、四。隧道施工时，每一台阶开挖稳定后再进行下一台阶开挖，逐步开挖完所有台阶，当隧道开挖完成后形成最终压力拱。三台阶和四台阶法形成的最终压力拱参数如表 6。如果改变第一台阶高度，也可得到与两台阶法相同的规律。结合表 5、表 6 可得，三种台阶法最终压力拱各参数基本相同，表明台阶数量影响临时压力拱，而不影响最终压力拱。

改变各部分台阶高度数值后，经过计算也可得到相同的结论。



**Figure 5.** Construction of three steps and four steps method  
**图 5.** 三台阶和四台阶法施工工序

**Table 6.** Parameters of final pressure arch of three steps and four step method  
**表 6.** 三台阶和四台阶法最终压力拱参数

台阶数量	$y_{内}/m$	$y_{外}/m$	$x_{内}/m$	$x_{外}/m$	$\sigma_{xm}/Mpa$	$\sigma_{ym}/Mpa$
三台阶	1.19	1.69	1.05	1.57	6.88	14.35
四台阶	1.19	1.69	1.05	1.57	6.88	14.35

## 6. 结论

本文结合隧道工程中常用的台阶施工方法，分析其施工过程中引起围岩的应力重分布的规律，研究压力拱的动态变化规律，得到如下结论：



1) 两台阶法上台阶开挖后形成的临时压力拱, 其中上部压力拱的厚度较侧压力拱大, 但坐标轴上最大应力相对增量较小。

2) 两台阶法下台阶开挖后形成最终压力拱, 其中上部压力拱的厚度较侧压力拱大, 但坐标轴上最大应力相对增量较小。

3) 两台阶法施工过程中, 临时上部压力拱向隧道壁移动形成最终上部压力拱, 同时压力拱厚度增大; 而临时侧压力拱远离隧道壁移动形成最终侧压力拱, 同时压力拱厚度增大; 临时压力拱坐标轴上最大应力均小于最终压力拱的对应值。

4) 两台阶法中随上台阶高度的增大, 临时上部压力拱逐渐向隧道壁移动并趋于稳定, 而临时侧压力拱逐渐远离隧道壁并趋于稳定; 临时压力拱厚度均先增大后趋于稳定, 坐标轴上最大应力相对增量均逐渐增大; 上台阶高度对最终压力拱影响较小。

5) 台阶数量影响临时压力拱, 而不影响最终压力拱。

## 致 谢

感谢基金支持, 感谢引文作者。

## 基金项目

长沙理工大学重点学科资助项目(11ZDXK06)。

## 参考文献

- [1] 陈秋南, 包太, 徐泽沛. 隧道工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [2] 蔡美峰, 何满朝, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [3] 关宝树. 隧道工程施工要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [4] 陶星. 隧道开挖释放荷载的有限元模拟方法研究[J]. 四川建筑, 2012, 32(6): 67-68.
- [5] 杨昌民, 李飞, 张汉超, 雷保军. 某高速公路隧道分步开挖数值模拟[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2013(4): 167-168.
- [6] 蔡美峰. 深部开采围岩稳定性与岩层控制关键理论和技术[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(3): 5-13.
- [7] 苏子龙, 孔强. 金家楼隧道施工过程的数值模拟分析[J]. 山西建筑, 2022, 48(20): 156-158.
- [8] 言志信, 史盛, 江平, 等. 某砂岩隧道在开挖过程中变形的数值模拟研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2013(6): 631-636.
- [9] 冯忠居, 朱登远, 彭小兵, 等. 泥岩隧道施工技术对围岩的影响及其数值模拟分析[J]. 公路, 2013, 58(12): 224-229.
- [10] 何栋梁, 成彦惠, 方建勤, 柳群义. 考虑时空效应的隧道围岩变形分析[J]. 公路交通科技, 2016, 33(7): 91-95.
- [11] 安永林, 李佳豪, 刘文娟, 周进, 谭格宇. 隧道压力拱边界统一判定方法及其空间演化特征[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(8): 84-90.
- [12] Lee, C.J., Wu, B.R., Chen, H.T. and Chiang, K.H. (2006) Tunnel Stability and Arching Effects during Tunneling in Soft Clayey Soil. *Tunneling and Underground Space Technology*, **21**, 119-132.  
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2005.06.003>
- [13] 张佩, 刘泽昊, 齐吉琳, 杜修力. 卵石倾角对砂卵石地层隧道开挖影响的细观力学研究[J]. 工程力学, 2022, 39(10): 48-60.
- [14] 瞿东明, 侯明章, 吴科亮, 张亚龙. 深埋大断面隧道开挖施工方案比选分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015, 11(11): 206-209.
- [15] 徐泽沛. 隧道压力拱细观机理及影响因素研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2014.