

# 深埋隧道侧导坑法施工对隧道压力拱的影响规律

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11月9日; 录用日期: 2022年12月28日; 发布日期: 2023年1月3日

## 摘要

通过分析隧道侧导坑法施工过程中引起围岩的应力重分布的规律, 研究隧道压力拱的动态变化, 探究侧导坑法施工对隧道压力拱的影响规律, 得出: 隧道侧导坑法开挖时, 上部压力拱的内外界随导坑宽度的增大而增大, 侧向压力拱的内界随侧导坑宽度的增大而减小, 侧向压力拱的外界基本保持不变; 而侧导坑开挖后, 压力拱的分布范围受侧导坑宽度的影响较大, 侧导坑宽度对最终压力拱不产生影响。研究成果为隧道施工选择侧导坑法时提供理论基础和方法依据。

## 关键词

隧道压力拱, 侧导坑法, 应力分布

# Influence Regulation of Deep Buried Tunnel during Construction with Side Heading Method on Tunnel Pressure Arch

Zepei Xu

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

Received: Nov. 9<sup>th</sup>, 2022; accepted: Dec. 28<sup>th</sup>, 2022; published: Jan. 3<sup>rd</sup>, 2023

## Abstract

By analyzing the law of stress redistribution of surrounding rock caused by the construction of side heading method of tunnel, the dynamic change of tunnel pressure arch is studied, and the law of influence of side heading method on tunnel pressure arch is explored. It is concluded that: During the excavation of side heading method of tunnel, the internal and external boundaries of upper

pressure arch increase with the increase of heading width, the internal boundaries of lateral pressure arch decrease with the increase of side heading width, and the external boundaries of lateral pressure arch basically remain unchanged; after the excavation of side heading, the distribution range of pressure arch is greatly affected by the width of side heading, and the width of side heading has no effect on the final pressure arch. The research results provide theoretical basis and method basis for selecting side heading method in tunnel construction.

## Keywords

Tunnel Pressure Arch, Side Heading Method, Stress Distribution

Copyright © 2023 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

隧道施工过程中, 围岩压力拱的形成是一个动态的过程, 不仅受到施工方法的影响, 而且不同施工方法产生的影响程度也不同。施工方法的选择对隧道安全来说是重要且关键的因素, 它会影响力分布及压力拱的形成, 甚至还可能造成工程事故[1] [2]。目前常用的隧道施工方法有全断面法、侧导坑法等, 全断面法施工简单, 工序少, 但要求岩体自稳能力强, 侧导坑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和不同范围及不同形状的压力拱, 在这一过程中, 围岩应力分布的变化, 压力拱的改变等都是选择相应施工方法时要考虑的重要内容。因为围岩的自承能力靠压力拱来体现, 所以只有在施工过程中充分发挥了压力拱的积极作用, 才能更好地保证隧道施工的安全, 这也是新奥法所要求的充分发挥围岩的自承能力的核心思想[3] [4] [5] [6]。

隧道压力拱是隧道开挖后, 岩体产生不均匀位移, 围岩互相“楔紧”, 在一定范围内形成的拱效应[7] [8] [9]。它也是围岩应力重新分布的结果, 是围岩被动自行寻求自稳的固有特性。隧道压力拱是由上部及底部压力拱和两侧压力拱组成。前者是由水平应力重分布的形成的, 后者是由垂直应力重分布形成的。前者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直线; 后者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直线。隧道压力拱的外轮廓为圆形, 内轮廓一般为直线。

本文采用颗粒流方法从细观方面结合隧道侧导坑法施工的特点来研究台阶法施工过程中压力拱的分布规律。

## 2. 隧道施工的侧导坑法

侧导坑法适用于围岩稳定性较差(如软弱松散围岩), 隧道跨度较大, 地表沉陷难于控制的地段。单侧导坑法的关键问题也是确定侧导坑的尺寸, 侧导坑尺寸如过小, 则其分割洞室跨度增加开挖稳定性的作用不明显, 且施工机具不方便开展工作; 如过大, 则导坑本身的稳定性降低而需要增强临时支护, 而由于大部分临时支护都是要拆掉的, 故导致工程成本增加。一般侧导坑的宽度不宜超过 0.5 倍洞宽, 高度以到起拱线为宜, 施工工序如图 1 所示[1]。侧导坑法中还有双侧导坑法等, 其施工过程中应力变化规律与单侧导坑法类似, 故本文研究的侧导坑法仅单侧导坑法。

图 1 的侧导坑法施工过程中, 侧导坑开挖后, 相当于小断面隧道, 会形成临时平衡, 产生压力拱, 由于断面较小, 压力拱规模也较小但后行部分上台阶开挖后, 断面跨度突然增大, 围岩会发生较大的位

移, 压力拱范围较大, 甚至会出现坍塌, 所以第 2 步施工是较为关键的一步, 必须引起重视, 尤其是对压力拱的分析和控制, 当围岩达到稳定后, 再进行后行部分台阶开挖, 然后形成最终的压力拱, 第 3 步的施工必须在第 2 部施工后, 围岩达到暂时稳定的情况下进行的, 这也是侧导坑法施工对最终压力拱影响的重要一环。

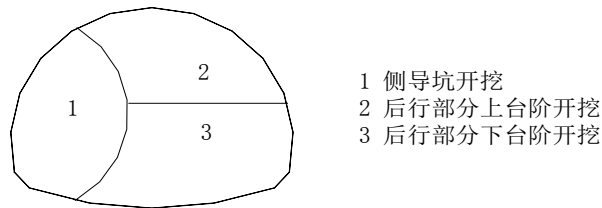


Figure 1. Construction process of side heading method  
图 1. 侧导坑法施工工序

### 3. 侧导坑开挖后的应力分布规律

#### 3.1. 计算条件及计算模型

本文利用二维颗粒流软件研究隧道侧导坑法施工过程中的压力拱, 对于深埋隧道岩体采用软弱松散岩体, 经过颗粒流软件试算, 接触粘接模型与硬岩性质接近, 所以进行数值计算时本构模型采用接触粘接模型; 选用圆形隧道半径为 1 m, 因围岩为 3~5 倍洞宽, 则计算的几何模型长宽均取为 10 m; 颗粒及墙体参数经过试算取值如表 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. Particle and wall parameters  
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	$5 \times 10^8$	$5 \times 10^8$	$1 \times 10^6$	$1 \times 10^6$

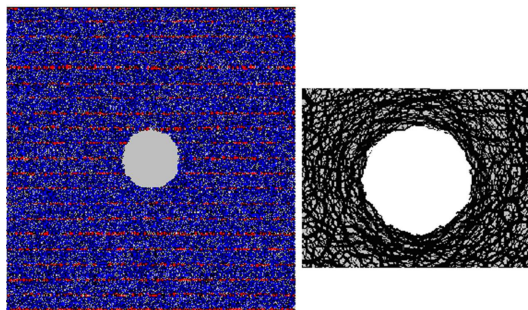


Figure 2. Model of tunnel after excavation  
图 2. 隧道开挖后的模型

#### 3.2. 隧道开挖后的应力分布规律

侧导坑(导坑右侧壁)开挖后, 应力分布如图 3, 水平应力  $\sigma_x$  在(-0.7, 1.28)点出现极大值 6.98 MPa,

垂直应力  $\sigma_y$  在  $(-1.58, 0.0)$  点出现极大值 11.78 MPa, 剪应力  $\tau_{xy}$  在导坑左下方和右上方区域时为正, 在左上方和右下方区域时为负。

因侧导坑断面轮廓是割圆形, 高宽比大于 1, 隧道侧导坑开挖后形成的压力拱应力分布为上部压力拱分布区域与侧向压力拱基本相同, 上部压力拱  $y$  轴上水平应力增量的合力大于侧向压力拱  $x$  轴上垂直应力增量的合力。

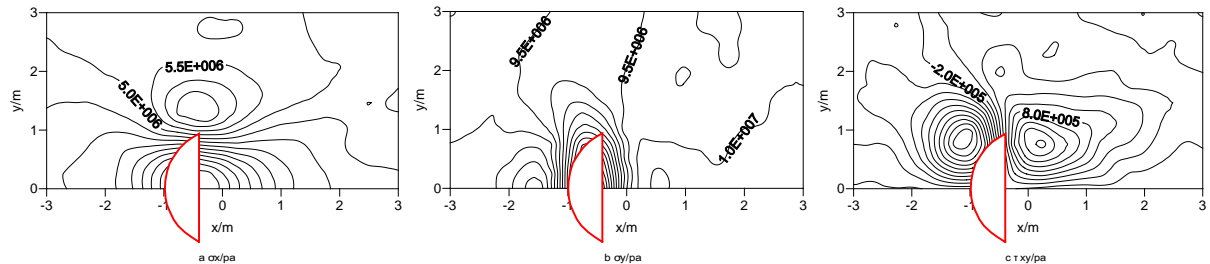


Figure 3. Stress distribution after excavation of side heading

图 3. 侧导坑开挖后的应力分布

#### 4. 不同侧导坑宽度对应的压力拱

分别计算导坑宽度为断面净宽的 1/10~5/10 时隧道开挖后的应力, 侧导坑开挖后形成的压力拱参数如表 2, 从表中可看出, 上部压力拱的内界、外界随导坑宽度的增大而增大; 侧向压力拱的内界随导坑宽度的增大而减小, 侧向压力拱的外界基本保持不变; 坐标轴上的最大应力均随导坑宽度的增大而增大。

Table 2. Geometric parameters of pressure arch corresponding to different heading widths

表 2. 不同导坑宽度对应的压力拱几何参数

导坑宽度/m	$y_{内}/m$	$y_{外}/m$	$x_{内}/m$	$x_{外}/m$	$\sigma_{xm}/MPa$	$\sigma_{ym}/MPa$
0.20	0.68	1.07	1.40	1.58	5.69	10.68
0.40	0.80	1.27	1.31	1.58	6.58	11.23
0.60	0.94	1.28	1.22	1.58	6.98	11.78
0.80	1.01	1.49	1.16	1.58	7.06	12.28
1.00	1.08	1.52	1.11	1.59	7.06	12.86

#### 5. 侧导坑法施工过程中压力拱的演化

按图 1 中 1、2、3 施工步的顺序开挖, 在不同施工步完成稳定后会形成一个临时压力拱, 待全部开挖完毕, 形成最终压力拱。这里仅用后行部分上台阶高度为 0.25 m 为例时行分析说明侧导坑法施工过程中压力拱的演化规律。

##### 5.1. 后行部分上台阶开挖

如图 4, 后行部分上台阶开挖后, 水平应力  $\sigma_x$  在  $(0.0, 1.78)$  点出现极大值 6.40 MPa, 垂直应力  $\sigma_y$  在  $(-1.51, 0.0)$  点出现极大值 14.04 MPa。与侧壁导坑开挖后的应力状态比较, 可看出, 随着后行部分上台阶的开挖, 上部压力拱的外界增大, 侧压力拱的外界减小,  $y$  轴上的最大水平应力减小,  $x$  轴上的最大水平应力增大。

因后行部分上台阶开挖后，断面宽度变大，需要较大区域的水平应力才能形成上部压力拱，同时上部压力拱转移至侧压力拱的荷载增大。

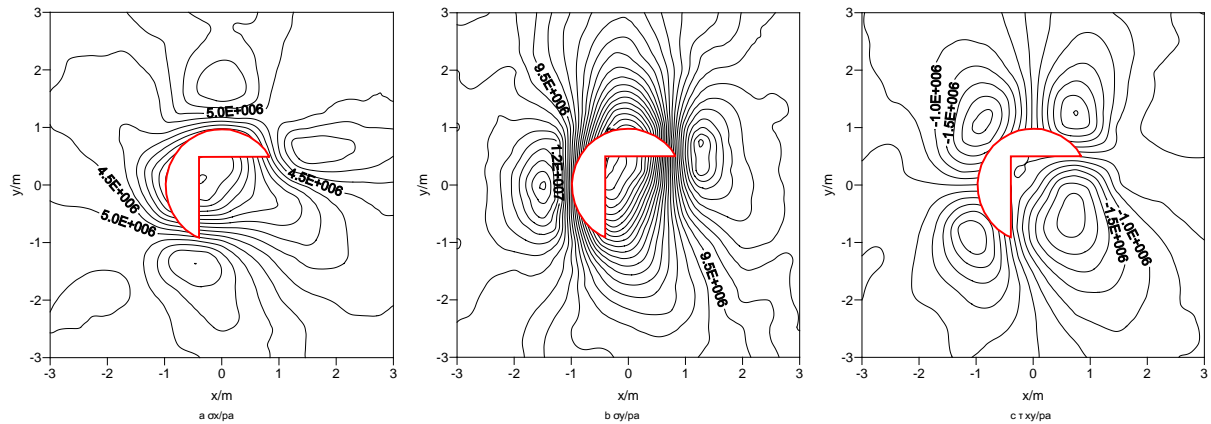


Figure 4. Stress distribution after excavation of upper step in backward section

图 4. 后行部分上台阶开挖后的应力分布

## 5.2. 后行部分下台阶开挖

如图 5，后行部分下台阶开挖后，水平应力  $\sigma_x$  在(0.0, 1.69)点出现极大值 6.85 MPa，垂直应力  $\sigma_y$  在(-1.51, 0.0)点出现极大值 14.77 MPa。与后行部分上台阶开挖后的应力状态比较，可看出，随着后行部分下台阶的开挖，上部压力拱的外界有所减小，侧压力拱的外界基本不变，y 轴上的最大水平应力增大，x 轴上的最大水平应力增大。

后行部分下台阶开挖前，此部分岩体对隧道围岩起到支撑作用，开挖后，断面宽度达最大值，隧道两侧对称，引起上部压力拱分布区域变化较小，侧向失去支撑引起上部压力拱和侧压力拱内应力变大。

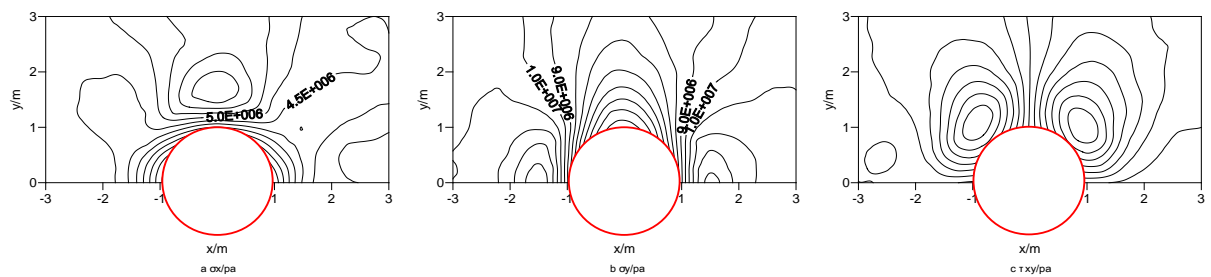


Figure 5. Stress distribution after excavation of lower step in backward section

图 5. 后行部分下台阶开挖后的应力分布

## 6. 侧导坑宽度对最终压力拱的影响

隧道采用侧导坑法进行施工，分别计算侧导坑宽度为断面净宽的 1/10~5/10 时且隧道整个断面全部开挖完毕的最终平衡状态，最终形成的压力拱参数如表 3，从表可看出，压力拱的各项参数基本相等，表明导坑宽度对最终压力拱不产生影响。

与全断面开挖的最终压力拱相比，导坑法施工最终上部压力拱的内界和外界与全断面基本相等，侧压力拱的内界和外界较小，坐标轴上的最大应力较大。与台阶法开挖的最终压力拱相比，侧导坑法施工最终压力拱与上台阶高度较小的两台阶或多台阶施工时的最终压力拱基本相同，表明用导坑法施工与上

台阶高度较小的两台阶或多台阶施工引起的最终压力拱相同，这一规律与工程实际相符，因为工程中围岩较差时，多选用较小上台阶高度的两台阶法、多台阶法或侧导坑法之一，这三种方法对围岩稳定影响基本相同。

**Table 3.** Geometric parameters of pressure arch corresponding to different heading widths  
**表 3.** 不同导坑宽度对应的压力拱几何参数

导坑宽度/m	$y_{内}/m$	$y_{外}/m$	$x_{内}/m$	$x_{外}/m$	$\sigma_{xm}/MPa$	$\sigma_{ym}/MPa$
0.20	1.18	1.68	1.03	1.51	6.83	14.35
0.40	1.18	1.68	1.03	1.51	6.84	14.35
0.60	1.19	1.69	1.03	1.51	6.85	14.36
0.80	1.18	1.68	1.03	1.52	6.84	14.35
1.00	1.18	1.68	1.03	1.52	6.84	14.35

## 7. 结论

本文结合隧道工程中常用的施工方法，分析侧导坑法施工过程中引起围岩的应力重分布的规律，研究隧道施工过程中压力拱的动态变化，得到如下结论：

1) 隧道侧导坑法施工的重要步是后行部分的上下台阶施工，后行部分上台阶施工是断面跨度增大会引起压力拱的较大变化，后行部分下台阶施工是隧道最终压力拱形成的重要关键步。

2) 隧道采用侧导坑法开挖时，上部压力拱的内外界随导坑宽度的增大而增大；侧向压力拱的内界随侧导坑宽度的增大而减小，侧向压力拱的外界基本保持不变。

3) 侧导坑宽度对最终压力拱不产生影响。

## 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, 编. 隧道工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [2] 关宝树. 隧道工程施工要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [3] 杨昌民, 李飞, 张汉超, 等. 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, 9(4): 167-168+181.
- [4] 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.
- [5] 言志信, 史盛, 江平, 党冰, 刘灿, 徐甜. 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, 33(6): 631-636.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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>
- [9] 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.