

# Simulation and Analysis of Construction Parameters in Karst Tunnel Excavation

Mingchao Yan

The Fourth Engineering Co. Ltd. of China Railway Five Council, Shaoguan Guangdong  
Email: 1796087277@qq.com

Received: Sep. 4<sup>th</sup>, 2019; accepted: Sep. 20<sup>th</sup>, 2019; published: Sep. 27<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

The surrounding rock of a Karst tunnel of Huaishaocheng railway is soft and crushed, which uses three-step excavation method with temporary inverted arch and is easy to cause large deformation in surrounding rock and is not steady, so it's very important to choose proper excavation construction parameters. Based on the Karst tunnel, it simulated deformation of surrounding rock and supported under different footage driving cycle and step length by using 3D elastic-plastic finite element method, compared the advantages and disadvantages of each excavation construction parameter, and provided a basis for proper excavation construction parameters selection. The results show that the excavation of Karst tunnel under V level surrounding rock can reduce the construction speed and increase the construction cost using 2 m excavation driving cycle and 6m step length, but it can control the deformation obviously and ensure the construction safety. Effectiveness is verified by the measured data obtained at site.

## Keywords

Karst Tunnel, Excavation Construction Parameters, Driving Cycle, Step Length, Numerical Simulation, Deformation

---

# 岩溶大断面隧道开挖施工参数比选及现场实测分析

闫明超

中铁五局集团第四工程有限公司, 广东 韶关  
Email: 1796087277@qq.com

收稿日期: 2019年9月4日; 录用日期: 2019年9月20日; 发布日期: 2019年9月27日

## 摘要

怀邵衡铁路某岩溶大断面隧道围岩软弱破碎,采用三步临时仰拱法开挖时,开挖过程中围岩容易发生大变形和失稳,因此选择合理的开挖施工参数非常重要。本文采用三维弹塑性有限元方法对不同循环进尺的岩溶隧道进行了模拟分析、台阶长度条件下施工时隧道围岩与支护变形特性,对比分析了不同开挖施工参数的优缺点,为隧道开挖施工参数选取提供了依据。研究表明,岩溶隧道V级围岩条件下选择开挖进尺2 m,台阶长度6 m开挖施工,虽然会导致施工速度有所降低、施工成本增加,但隧道变形可以明显控制,确保隧道施工安全。最后,通过现场实测数据验证了该方法的有效性。

## 关键词

岩溶隧道, 开挖施工参数, 循环进尺, 台阶长度, 数值模拟, 变形

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

随着中国铁路的快速发展,铁路隧道穿过各种复杂地质区已经变得不可避免[1]。其中,隧道穿过岩溶区是一个很大的施工难题,尤其在保证施工进度,防止变形超限等方面,一直是一个值得研究的问题[2]。李彪定性的研究了溶洞体积和溶洞与隧道之间距离对隧道变形的影响[3];赵明阶等建立了岩溶隧道围岩稳定性的概化模型,系统地研究了不同程度的围岩对隧道的影响[4]。本文采用有限元三维弹塑性模型对不同循环进尺的岩溶隧道进行了模拟分析,研究了不同台阶长度的变形特性,对工程施工有一定的借鉴意义。

## 2. 工程概况

怀邵衡铁路某岩溶大断面隧道,全长3866 m,最大埋深167 m,隧道横断面宽度为14.6 m,高度为13.8 m。生物碎屑灰岩马平组(Cmp)、泥晶灰岩和大埔组(Cd)泥质灰岩广泛分布于隧道区。下部为浅灰色块状白云岩,中部为白云石和泥晶灰岩白云质灰岩,上部为浅灰色块状白云岩。岩溶极其发育,地下水丰富。这是一条一级风险隧道,贯穿整条线路。隧道围岩软弱破碎,容易发生大变形和失稳。隧道施工工期紧,施工难度大,是全线的一项重大而困难的控制工程。

根据隧道的实际情况,开挖施工采用三步临时仰拱法。为了减少隧道开挖对围岩的扰动,保证围岩稳定性,提高施工速度,选择合理的隧道开挖施工参数至关重要。本文基于MIDAS GTS NX有限元软件,采用三维弹塑性有限元法,模拟分析了岩溶隧道V类围岩条件下不同开挖施工参数(循环进尺、台阶长度)下隧道结构和围岩的变形特征,比较分析了不同开挖施工参数的优缺点,为选择合理的施工参数提供依据。

## 3. 数值模拟

### 3.1. 计算模型

为了减少边界约束对有限元模型计算结果的不利影响,计算模型的边界范围在所有方向上都大于孔跨度的三倍。具体计算时,计算场的宽度为水平方向120米,垂直方向60米,向下方向60米,向上方向120米。对于上部100 m的土层,不建立网格,而是采用在模型上边界施加荷载的方式考虑,荷载取

上部土体自重均匀作用在上边界网格上。

施工方法为三步临时仰拱开挖法，每步高度约 5 m。在模拟过程中，改变相应区域的材料特性模拟超前小导管，冻结相应区域的岩体单元模拟开挖，激活加固区域的材料模拟锚杆加固，激活相应的板单元模拟喷射混凝土。计算模型网格如图 1 所示。

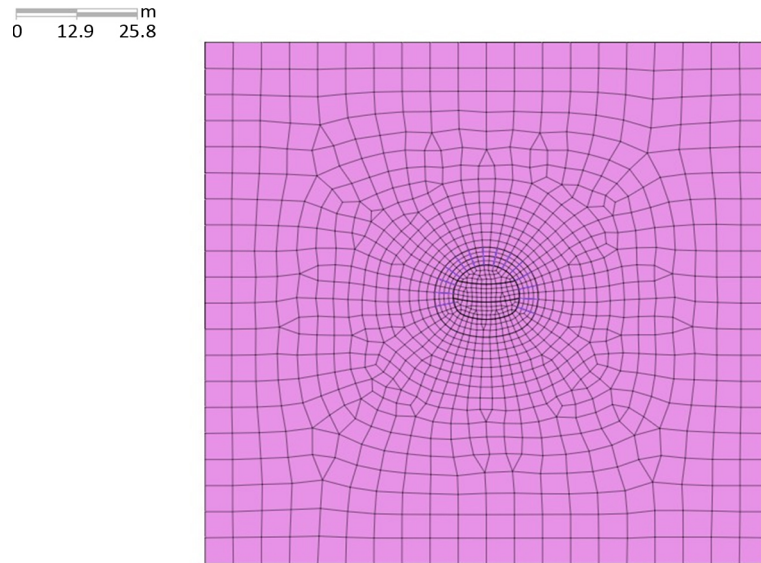


Figure 1. Grid graph of the calculation model  
图 1. 计算模型网格图

### 3.2. 单元类型与屈服准则

#### ① 单元类型的选取

数值模拟计算过程采用大型有限元软件 MIDAS GTS NX。计算中假设隧道围岩为连续介质，采用各向同性弹塑性实体单元进行模拟。一次支护和二次衬砌采用二维板单元模拟，单元锚杆采用嵌入式桁架模拟。计算中没有单独考虑钢网和钢支架的影响。

#### ② 塑性屈服准则

岩土材料有许多屈服准则，其中莫尔-库仑(Mohr-Coulomb)准则应用最为广泛。假设最大剪应力是屈服的决定性因素，基于这一准则建立了莫尔-库仑模型[5]。摩尔-库仑模型的屈服函数，当以摩尔形式表示时，为：

$$\tau_n = c - \sigma_n \tan \varphi \quad (1)$$

式中， $\tau_n$ ：极限抗剪强度；

$\sigma_n$ ：剪切面上的法向应力，以拉为正；

$c, \varphi$ ：岩土材料的粘聚力和内摩擦角。

由式(1)，当  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$  时，摩尔-库仑准则可写为：

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = c \cos \varphi - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi \quad (2)$$

式(2)仅是平面应状态的摩尔-库仑屈服函数，未反应中主应力  $\sigma_2$  的影响。在三维主应力空间中，当  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$  时，其破坏面可采用下式表示[6] [7]：

$$f(I_1, J_2, \theta) = \frac{1}{3} I_1 \sin \varphi + \sqrt{J_2} \sin \left( \theta + \frac{\pi}{3} \right) + \frac{\sqrt{J_2}}{\sqrt{3}} \cos \left( \theta + \frac{\pi}{3} \right) \sin \varphi - c \cos \varphi = 0 \quad (3)$$

其中,  $I_1$  和  $J_2$  分别为应力第一不变量、应力张量的第二不变量;  $\theta$  为洛德角, 即主应力空间第一主应力和偏应力分量夹角。

### 3.3. 计算工况与参数

针对该隧道 V 级围岩条件, 分别考虑循环进尺为 1 m 和 2 m, 台阶长度为 6 m、12 m 和 18 m 情况下隧道开挖施工工况[8], 如表 1 所示。

**Table 1.** Calculation condition  
**表 1.** 计算工况表

计算工况	1	2	3	4	5	6
循环进尺/m	1	1	1	2	2	2
台阶长度/m	6	12	18	6	12	18

计算时各材料物理力学参数取值如表 2 所示。

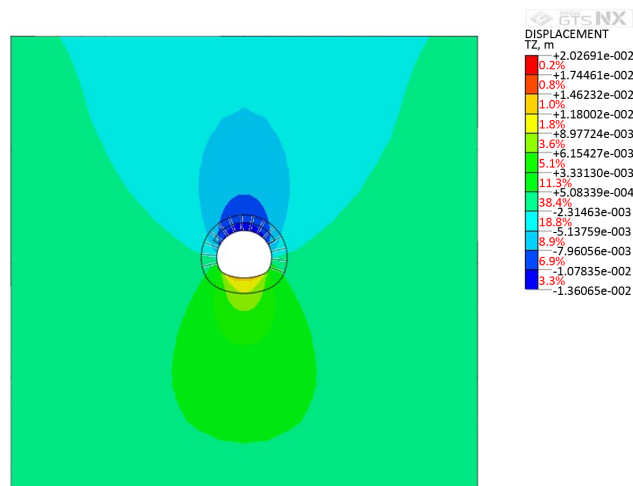
**Table 2.** Physical and mechanics parameters of the calculation model  
**表 2.** 计算模型物理力学参数

材料	重度/kN/m <sup>3</sup>	弹性模量/GPa	内摩擦角/°	粘聚力/kPa	泊松比
V 级围岩	20	2.5	23.5	125	0.4
初支、二衬	25	30	-	-	0.2
锚杆	78.5	200	-	-	0.3
超前小导管	20	5.0	23.5	125	0.4

### 4. 不同施工参数数值模拟分析

对于该岩溶隧道 V 级围岩段, 根据现场实际情况, 模拟分析不同循环进尺、台阶长度对隧道围岩和支护结构变形的影响。限于篇幅, 分析中仅给出工况四(循环进尺为 2 m, 台阶长度为 6 m)最终开挖完成时隧道围岩和支护的变形情况, 如图 2~5 所示。

由计算结果可知, 在工况四(循环进尺为 2 m, 台阶长度为 6 m)的情况下, 围岩拱顶竖向变形为-1.36 cm, 仰拱竖向变形为 2.03 cm。左右边墙均向内变形, 水平收敛为 2.68 cm。



**Figure 2.** Contour of vertical deformation of the surrounding rock  
**图 2.** 围岩竖向变形云图

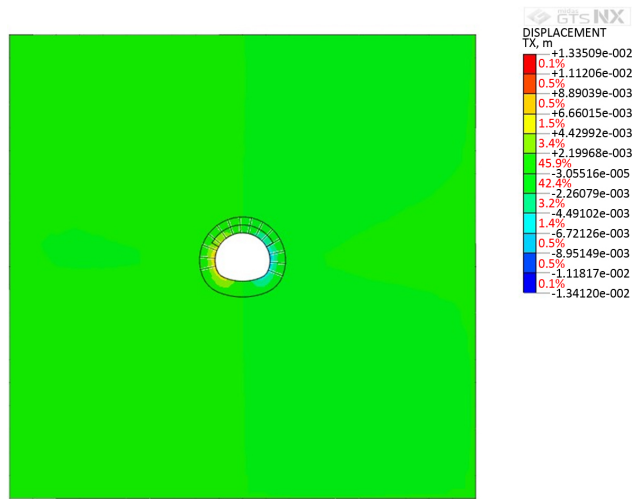


Figure 3. Contour of horizontal deformation of the surrounding rock  
图 3. 围岩水平变形云图

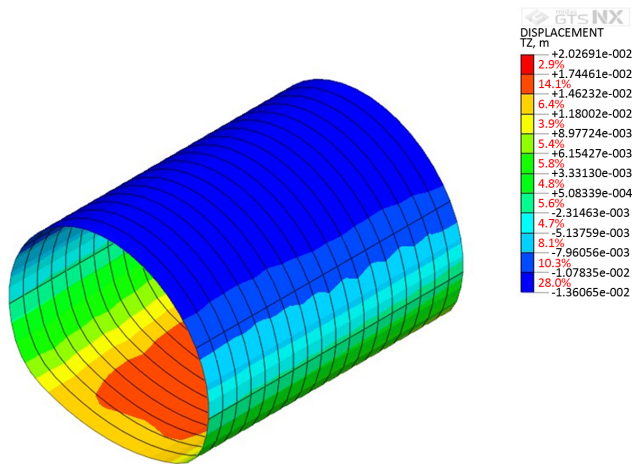


Figure 4. Contour of vertical deformation of the tunnel lining  
图 4. 衬砌竖向变形云图

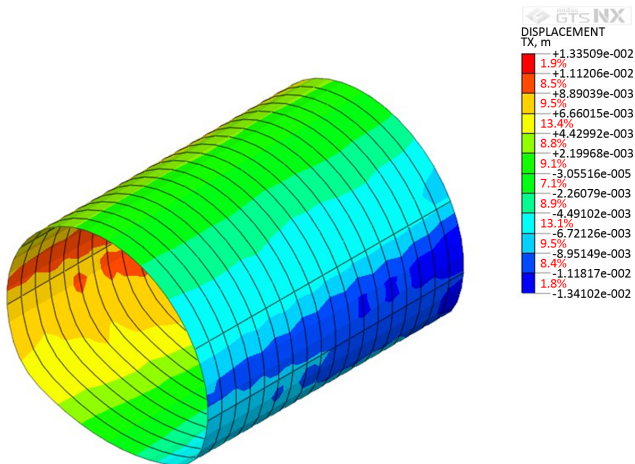


Figure 5. Contour of horizontal deformation of the tunnel lining  
图 5. 衬砌水平变形云图

### 5. 开挖支护方案比选分析

根据计算结果整理不同工况下隧道围岩与支护结构的变形大小见表 3。对比分析不同循环进尺、台阶长度对隧道围岩与衬砌变形的影响如图 6~8 所示。结合不同循环进尺、台阶长度对开挖施工的影响,分析得到:

在控制围岩变形方面,台阶长度的增加会导致拱顶沉降、仰拱隆起、水平收敛均增大。以循环进尺 1 m 的情况下为例:在台阶长度为 6 m 时,隧道拱顶沉降变形为-1.39 cm,仰拱隆起变形为 2.00 cm,水平收敛变形为 2.82 cm;在台阶长度为 12 m 时,与台阶长度为 6 m 时相比,隧道拱顶沉降变形增大了 2.2%,仰拱隆起变形增大了 6.0%,水平收敛变形增大了 1.4%;在台阶长度为 18 m 时,与台阶长度为 6 m 时相比,隧道拱顶沉降变形增大了 4.3%,仰拱隆起变形增大了 10.0%,水平收敛变形增大了 4.3%。

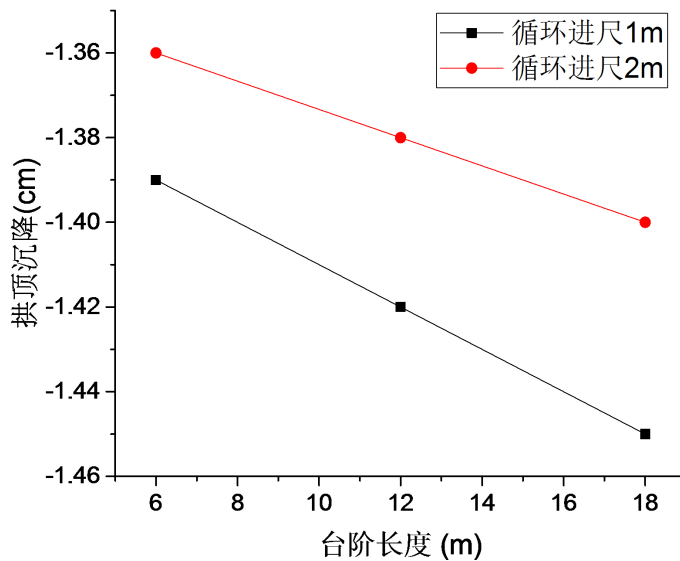


Figure 6. Curve of vault settlement and step length

图 6. 拱顶沉降 - 台阶长度曲线

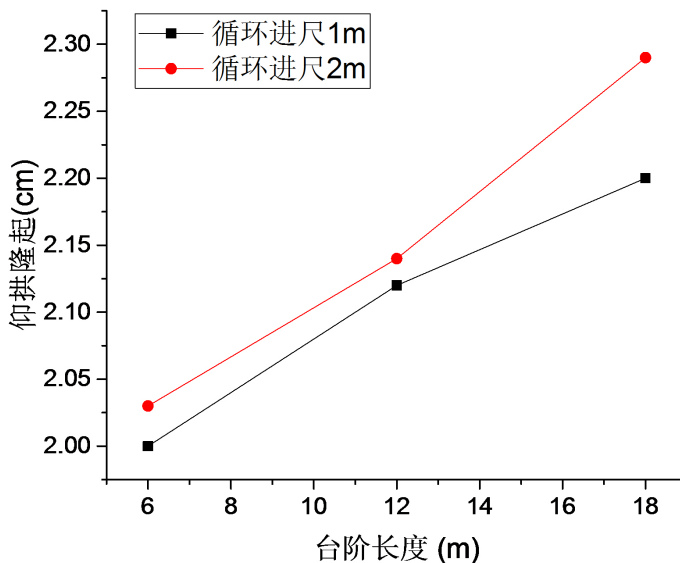


Figure 7. Curve of inverted arch upfit and step length

图 7. 仰拱隆起 - 台阶长度曲线

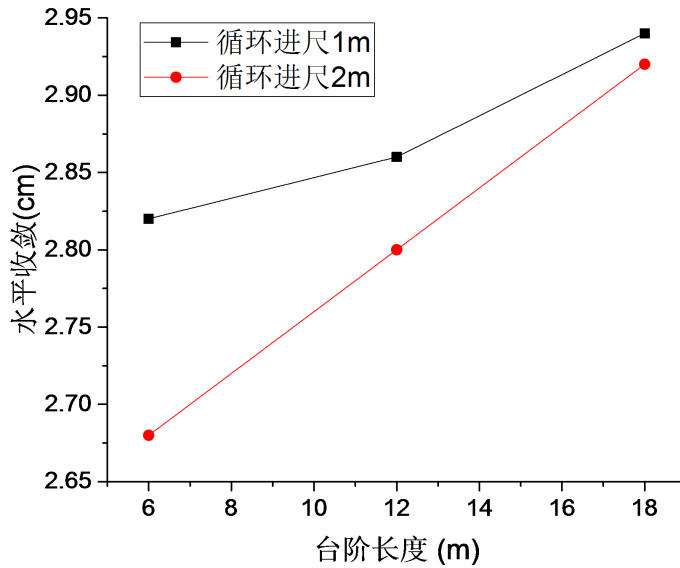


Figure 8. Curve of level convergence and step length

图 8. 水平收敛 - 台阶长度曲线

Table 3. Deformation of surrounding rock and support structure under different situation

表 3. 不同工况围岩与支护结构变形量

计算工况	1	2	3	4	5	6
循环进尺/m	1	1	1	2	2	2
台阶长度/m	6	12	18	6	12	18
拱顶沉降/cm	-1.39	-1.42	-1.45	-1.36	-1.38	-1.40
仰拱隆起/cm	2.00	2.12	2.20	2.03	2.14	2.29
水平收敛/cm	2.82	2.86	2.94	2.68	2.80	2.92

采用 2 m 循环进尺与 1 m 循环进尺相比，隧道拱顶沉降、仰拱隆起和水平收敛变形稍有减小。

## 6. 现场测试对比分析

为确保岩溶隧道施工安全，施工过程中采用循环进尺为 2 m，台阶长度为 6 m 进行开挖施工，同时对隧道进行了信息化监控量测，表 4 为拱顶沉降和水平收敛变形现场测试结果与计算结果的对比。结果显示：现场测试值与理论计算值基本吻合。

Table 4. Comparison of the site measured deformation and calculation value of surrounding rock

表 4. 围岩变形现场实测与计算值对比

	拱顶沉降/cm	水平收敛/cm
实测值	-1.2	1.4
计算值	-1.36	2.68

## 7. 结论

通过对岩溶隧道不同开挖施工参数的数值模拟和现场测试分析，可得到以下几点结论：

1) 对于岩溶隧道采用三台阶临时仰拱法开挖施工，循环进尺为 2 m，台阶长度为 6 m 时，隧道拱顶



沉降、仰拱隆起、水平收敛变形最大分别为-1.36 cm, 2.03 cm, 2.68 cm, 在所有计算工况中围岩与衬砌变形最小。

2) 为避免第一步开挖当日变形量过大, 在确定循环进尺时, 需要考虑现场设备条件能否及时支护, 为安全起见, 可以选择 1.5~2 m 循环进尺; 虽然隧道开挖台阶长度越小, 其控制围岩变形能力越强, 但短台阶空间局限性较大, 施工工期较长。由于隧道围岩级别为 V 级, 考虑施工过程安全以及施工工期的要求, 最终选择隧道开挖循环进尺为 2 m, 台阶长度为 6 m。

3) 现场测试结果显示: 理论计算值与现场测试值基本吻合。工程实践证明: 怀邵衡铁路岩溶隧道开挖施工时, 采用三台阶临时仰拱法, 选择循环进尺为 2 m, 台阶长度为 6 m, 可有效控制隧道受力和变形, 确保岩溶隧道的施工安全。

## 参考文献

- [1] 王晓. 断层破碎带地段隧道稳定性分析与施工参数优化研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [2] 王君, 丁春林, 张亚龙, 王高彦, 舒进. 大断面浅埋隧道开挖施工技术及其数值模拟[J]. 施工技术, 2014, 43(S2): 120-123.
- [3] 丁春林, 王君, 王高彦, 李志清. 浅埋大断面公路隧道开挖施工工法比选[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(S1): 269-274.
- [4] 仲崇海. 软弱围岩大断面隧道台阶法施工技术参数研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [5] 黄大成. 软弱地层台阶七步开挖施工隧道围岩稳定与变形特征研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [6] 李贻伟. 岩溶公路隧道围岩-支护结构受力特性数值模拟分析[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.
- [7] 彭川. 岩溶隧道围岩与结构稳定性分析[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2009.
- [8] 李奎. 隧道岩溶围岩力学特性的初步研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2005.