

# 深回填土区隧道群预留核心土法开挖数值模拟研究

陈功祥<sup>1</sup>, 蔡成曦<sup>2</sup>, 靳晓光<sup>1\*</sup>, 聂紫珩<sup>1</sup>

<sup>1</sup>重庆大学土木工程学院, 重庆

<sup>2</sup>中铁二十一局集团第五工程有限公司, 重庆

Email: 1309377125@qq.com, \*jxgcqu@163.com

收稿日期: 2021年4月2日; 录用日期: 2021年4月21日; 发布日期: 2021年4月28日

## 摘要

文章以重庆轨道交通十号线二期工程兰花路站为背景, 开展深回填土区暗挖隧道群力学特性的数值模拟研究。依据工程场地地勘资料及隧道支护结构设计, 建立三维有限元Midas-GTS NX模型。从围岩变形、应力特征及塑性分布特征三个方面, 对隧道群预留核心土法开挖围岩应力应变特征随施工步序影响研究。研究表明, 深回填土区预留核心土法开挖隧道围岩的位移、应力以及塑性区范围均可以满足稳定和安全要求, 其中隧道群拱顶与拱底区域有明显较大范围的压应力区, 在隧道施工过程中应尽快施作二衬, 形成支护闭环。

## 关键词

预留核心土法, 隧道群, 数值模拟, 力学特性

# Numerical Simulation of Tunnel Group Excavation with Reserved Core Soil Method in Deep Backfill Area

Gongxiang Chen<sup>1</sup>, Chengxi Cai<sup>2</sup>, Xiaoguang Jin<sup>1\*</sup>, Ziheng Nie<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing

<sup>2</sup> China Railway 21st Bureau Group Fifth Engineering Co., Ltd., Chongqing

Email: 1309377125@qq.com, \*jxgcqu@163.com

\*通讯作者。

文章引用: 陈功祥, 蔡成曦, 靳晓光, 聂紫珩. 深回填土区隧道群预留核心土法开挖数值模拟研究[J]. 土木工程, 2021, 10(4): 348-355. DOI: 10.12677/hjce.2021.104039

Received: Apr. 2<sup>nd</sup>, 2021; accepted: Apr. 21<sup>st</sup>, 2021; published: Apr. 28<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Based on the background of Lanhua Road Station of Chongqing Rail Transit Line 10 phase II project, this paper carries out the numerical simulation research on the mechanical properties of tunnel group in deep backfill area. From three aspects of surrounding rock deformation, stress characteristics and plastic distribution characteristics, this paper studies the influence of construction sequence on the stress-strain characteristics of surrounding rock in tunnel group excavation with reserved core soil method. The results show that the displacement, stress and plastic zone of the surrounding rock of the tunnel excavated by the reserved core soil method in the deep backfill area can meet the requirements of stability and safety, and there is a large range of compressive stress zone in the vault and arch bottom of the tunnel group, so the secondary lining should be constructed as soon as possible to form a closed support loop.

## Keywords

Reserved Core Soil Method, Tunnel Group, Numerical Simulation, Mechanical Properties

Copyright © 2021 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

随着铁路建设的飞速发展,越来越密集的铁路线路在城市地下空间交错贯通。由于工程地质条件复杂,许多隧道不得不利用有限的区间完成多条线路贯通的设计。一些学者对此进行了研究[1] [2] [3] [4] [5]。韦秉旭等利用 FLAC3D 软件模拟隧道在不同长度及半径核心土条件下的开挖过程,分析掌子面附件围岩的位移、应力及塑性区变化情况[1];冯家鑫等以昆仑隧道为例,运用有限元软件,分析了环形预留核心土开挖过程中各个开挖阶段的应力图以及位移和应力的变化规律,得出预留核心土施工过程中加强上台阶的支护可以有效的控制位移的变形值[2];张旭阳等通过以市红岛-胶南城际轨道交通工程为背景,其暗挖斜井上台阶采用预留核心土方法施工,通过现场施工结果与施工监控量测结果分析得出,预留核心土能有效约束掌子面围岩变形,增强围岩的自稳能力,抑制内空位移,减少拱顶及地表下沉量及有效控制振速[3];李莉、王永峰等通过对二次改造的龙山人防工程隧洞群的数值模拟分析,总结其对自身稳定性及二次开挖对隧洞群稳定性的影响,对扩挖状态下呈现不稳定状态的关键断面提出了具有针对性的支护措施[4];张功等针对使用强度折减法分析隧洞稳定性的三种失稳判据,即塑性区贯通判据、特征点位移突变判据及计算不收敛准则判据进行比较,并分别对单洞、双洞及四洞三种不同情况失稳判据的适用性进行了讨论,并对非均质岩土层条件下的隧洞稳定性进行了讨论[5];上述研究对预留核心土法以及隧道群施工稳定性进行了研究,但是可以看出针对隧道群预留核心土法施工数值模拟分析特别是深回填土区隧道群预留核心土法开挖的施工力学特性研究依然很少,还需要进行进一步的研究。

本文采用三维有限元数值模拟的方法,以重庆轨道交通十号线二期工程兰花路站~南湖区间隧道为研究对象,对深回填区隧道群施工力学行为进行研究,为隧道施工提供参考。

## 2. 数值模型的建立

### 2.1. 模型范围及边界条件

三维模型的长度取 115.4 m，其中隧道群模型两侧边界距左右隧道中心线各取 5 倍洞径宽度，宽度取隧道纵向 10 m (5 个施工步序)，模型高度取为 79.03 m，分为回填土层 59.03 m，中风化砂岩地层 20 m。有限元模型地表取自由边界，底部采用固定约束，其余各面施加法向约束。采用混合网络单元划分实体网格，桩基础采用 1D 植入式梁单元模拟，初期支护采用 2D 板单元，二衬结构采用实体单元模拟。回填土与注浆加固区采用修正摩尔 - 库伦准则，中风化砂岩地层采用摩尔 - 库伦准则，三维有限元 MIDAS-GTS NX 模型共建立了 81,593 个节点，113,791 个单元，建立的有限元数值模型如图 1 所示：

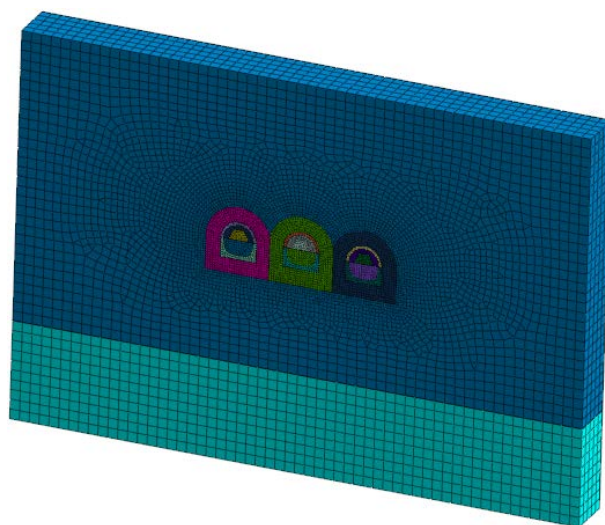


Figure 1. Numerical model of reserved core soil method  
图 1. 预留核心土法数值模型

### 2.2. 计算参数

依托重庆轨道交通十号线二期工程兰花路站~南湖区间隧道地勘报告及现场采样室内实验得到的相关物理力学参数，得到围岩与支护物理力学参数如表 1 所示：

Table 1. Tunnel surrounding rock and support parameters  
表 1. 隧道围岩与支护参数

围岩	重度 $\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	弹性模量(MPa)	泊松比 $\mu$	粘聚力 $c$ (kPa)	内摩擦角 $\varphi$ (°)
土石混合回填土	20	41	0.4	55	36
中风化砂岩	24	3760	0.12	1880	41
注浆加固区	22	280	0.3	220	40
初期支护 C25 砼	25	32,000	0.2	-	-
二次衬砌 C40 砼	25	32,500	0.2	-	-

### 2.3. 施工过程控制

隧道开挖模型将一个断面分为上半断面、上半断面核心土、下半断面三个施工步序，原设计施工步

序图如图 2 所示:

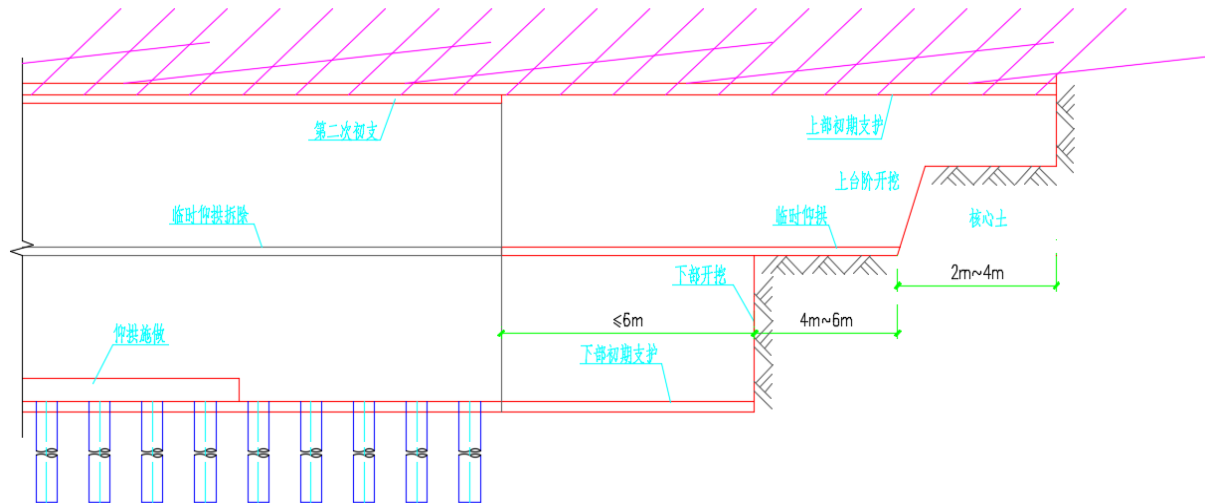


Figure 2. Longitudinal section of construction process

图 2. 施工工序纵剖面图

模型建立对施工步序进行简化分析, 简化后的施工步序如下:

- S1: 预先施作注浆加固区, 注浆加固范围为隧道外轮廓以外 3 m 等厚度范围内;
- S2: 短进尺开挖上部隧道;
- S3: 及时施作上部隧道初期支护, 开挖上部隧道核心土;
- S4: 施作上部隧道临时仰拱;
- S5: 短进尺开挖下部隧道;
- S6: 施作下部隧道初期支护, 拆除临时仰拱;
- S7: 施作桩基础;
- S8: 铺设二衬结构。

依照上述施工步序进行开挖支护, 隧道群施工掌子面相互错开, 左线开挖支护, 右线隧道掌子面滞后左线隧道二衬 10 m, 出入段线左线(中洞)隧道滞后右线隧道二衬 10 m。

### 3. 数值模拟结果及分析

针对隧道群并行开挖有限元模型, 通过建立模型分析计算, 得到不同施工阶段预留核心土法隧道群开挖后围岩应力、位移、塑性区及支护结构受力特征结果。

#### 3.1. 围岩变形受力特征

隧道群采用预留核心土法开挖后, 隧道围岩的竖向位移图如图 3 所示。

隧道施工阶段共计为 33 个施工阶段, 其中 S1~S11 为左洞施工阶段, S12~S22 为右洞施工阶段, S23~S33 为中洞施工阶段, 分别在隧道拱顶纵向布置 1~5 个监测节点(2 m 纵向间距)。绘制的隧道拱顶竖向位移图如图 4 所示。

由图 4 可知, 左洞施工完成时, 左洞节点 1 达到最大累计沉降为-5.6 mm, 右洞施工完成时, 右洞节点 1 处达到最大竖向累计沉降, 为-6.75 mm。中洞施工完成后, 中洞 1 节点拱顶竖向位移为整个施工阶段的最大值, 为-7.83 mm。

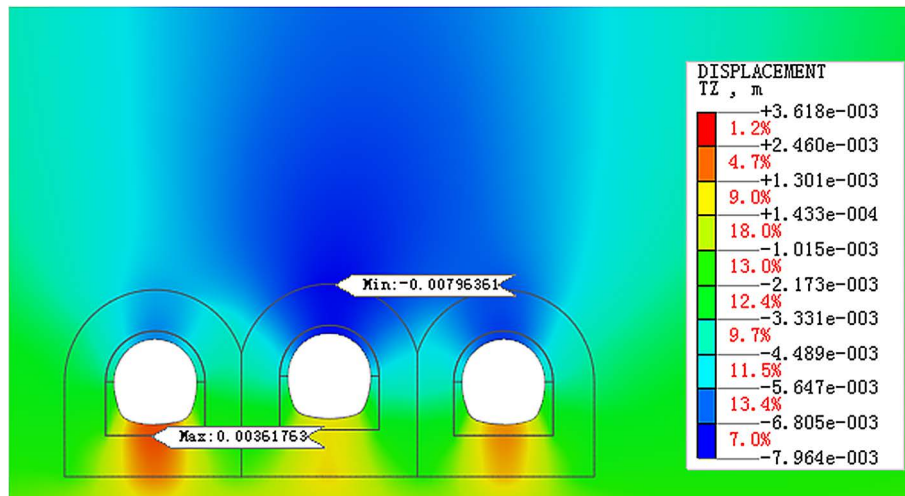


Figure 3. Cloud image of vertical displacement of surrounding rock after completion of construction of tunnel

图 3. 隧道施工完成后围岩竖向位移云图

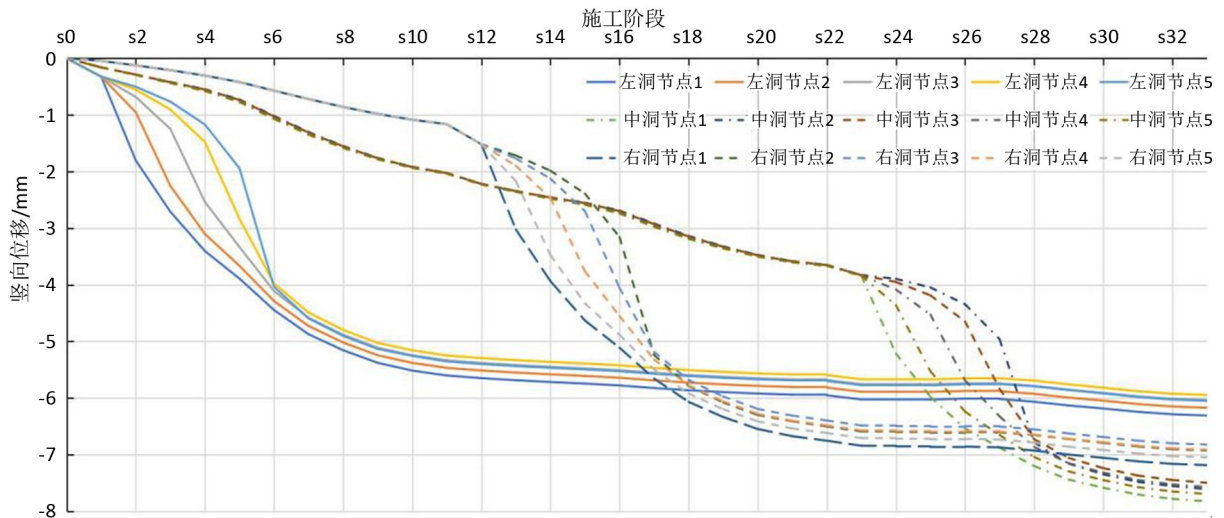


Figure 4. Vertical displacement diagram of vault after completion of construction

图 4. 施工完成后拱顶竖向位移图

左洞、中洞、右洞在各自开挖阶段的竖向位移增大明显，S1~S6、S12~S17、S23~S28 分别为左、右、中隧道开挖支护上半断面施工阶段，可以看出，当上半断面支护完成后，其拱顶竖向位移增幅出现减缓，说明初期支护的及时施作可以有效控制位移沉降。同时左洞对右洞拱顶的影响比对中洞的影响要小，施作支护结构后的隧道明显受其他洞室施工的扰动较小，中洞最后完成开挖支护，其受其他洞室施工的影响，拱顶的竖向位移为最大，但未超过拱顶沉降预警值。

### 3.2. 围岩应力特征

采用预留核心土法开挖完毕后，隧道围岩的最大主应力如图 5 所示。

由图 5 可知，隧道最大主应力为拉应力，在隧道群拱顶与拱顶位置出现明显的拉应力区，拉应力最大值出现在左洞隧道仰拱中间位置，为 1.36 Mpa，此时隧道群主要表现为拱顶的沉降与隧道底部的隆起，在注浆区拱腰位置出现局部的压应力区，压应力值较小，对隧道支护结构的影响较小。

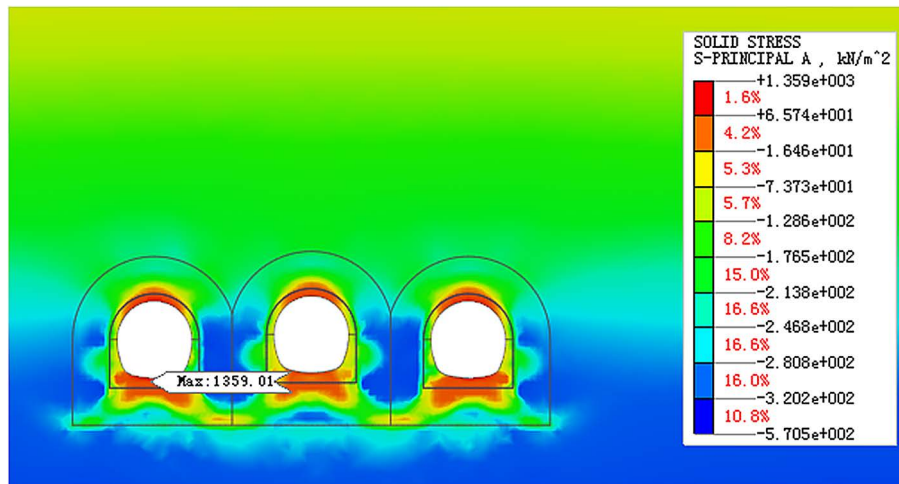


Figure 5. Cloud image of the maximum principal stress of surrounding rock after the construction of tunnel

图 5. 隧道施工完成后围岩最大主应力云图

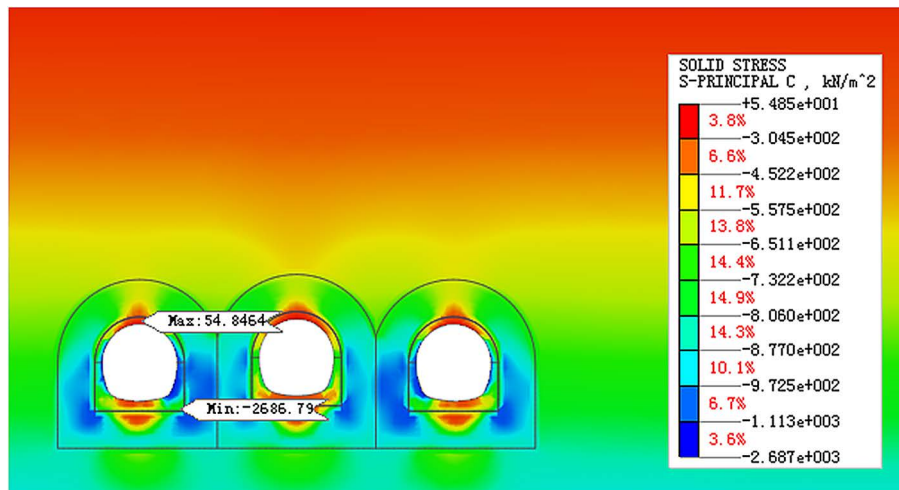


Figure 6. Cloud image of minimum principal stress of surrounding rock after construction of tunnel

图 6. 隧道施工完成围岩最小主应力云图

由图 6 可知，隧道拱腰位置以及注浆区拱腰出现了小范围的拉应力区。最小主应力峰值为 $-2.69$  Mpa，出现在左洞隧道脚趾注浆区与初期支护连接位置，从注浆加固区压应力区分布来看，左洞右侧与右洞左侧注浆区与支护结构的压应力区已经贯通，可能会导致注浆区位置压应力值增大，达到塑性破坏。

### 3.3. 初期支护应力特征

从图 7 可以看出，当中部隧道开挖支护阶段完成后，右洞初期支护在其左侧脚趾处达到了最大拉应力值，为  $7.96$  MPa，此时左洞隧道的初期支护脚趾处拉应力值为  $7.58$  MPa，中洞隧道初期支护的拉应力最大值在右侧脚趾处，其值为  $6.54$  MPa。三隧道在各自施工阶段的支护结构应力特征基本一致，最大应力均为拉应力且发生在隧道初期支护脚趾处，产生应力集中现象，隧道初期支护与围岩共同承受由隧道断面开挖导致的应力重分布，由此建议及时施作二衬，形成支护闭环，增大围岩自稳能力。

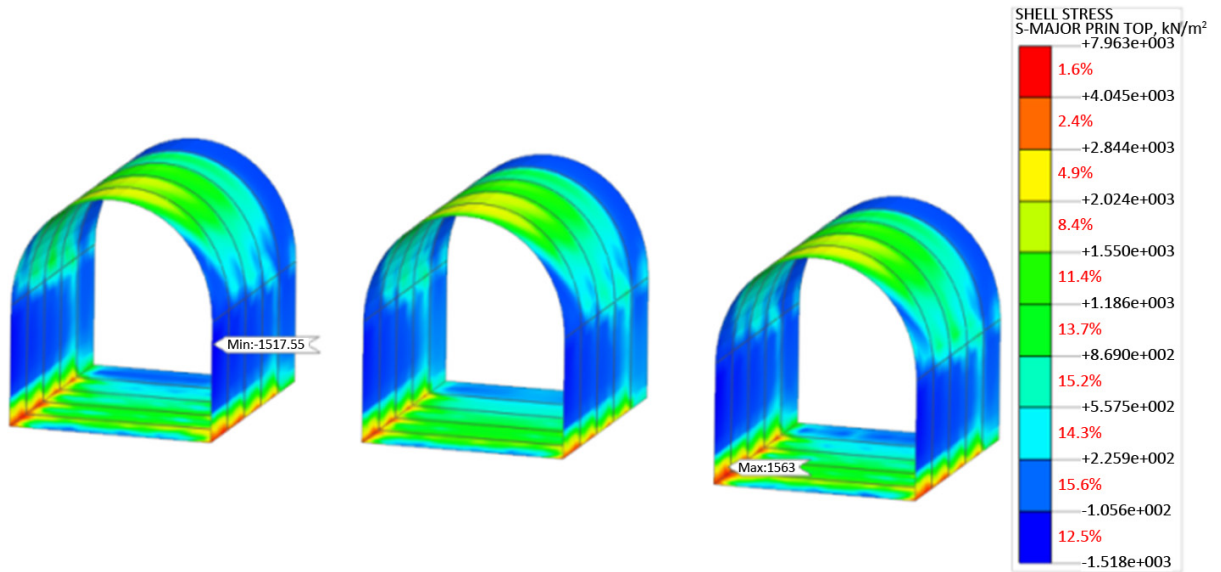


Figure 7. Support stress nephogram of the middle tunnel after the completion of excavation and support  
图 7. 中洞开挖支护完成后支护应力云图

### 3.4. 围岩塑性区分析

图 8 为隧道群开挖支护完成隧道结构外围注浆区塑性区分布图，隧道拱腰位置出现修正摩尔库伦本构模型中压缩“帽”的破坏区，主要由于隧道随开挖支护进行，隧道结构拱顶下沉，拱腰位置出现向向外的偏移导致注浆区受压，此时注浆区土体可能已经进入卸载后再加载的过程。同时，在隧道结构下部出现小范围塑性破坏，可能会表现为隧道仰拱的隆起，由图 8 可以看出，隧道仰拱区域为隧道开挖过程中的薄弱位置，建议加强支护。

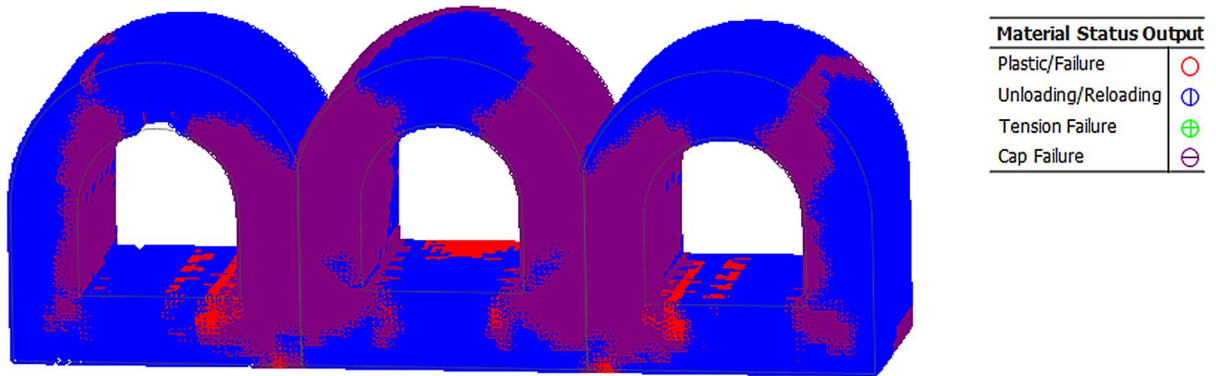


Figure 8. Distribution of plastic zone of Tunnel Group  
图 8. 隧道群塑性区分布图

## 4. 结论

- 1) 隧道群开挖支护施工阶段进行过程中，在隧道的拱顶与拱底会发生在施工安全控制允许范围内的沉降位移与隆起位移。
- 2) 隧道群拱顶与拱底主应力以压应力为主，隧道拱腰位置的主应力以拉应力为主，左洞与右洞拱腰部分的应力与距中洞距离有关，距离中洞越近，拉应力越大。

3) 隧道初期支护承受了大部分隧道开挖引起的应力重分配, 在初期支护左侧与右侧脚趾处有较大应力集中, 建议及时施作二衬, 形成支护闭环。

4) 隧道塑性区主要分布在隧道仰拱位置, 注浆区拱腰位置承受部分压力, 对隧道结构起到了保护作用。

### 参考文献

- [1] 韦秉旭, 唐辉湘. 预留核心土环向刻槽对隧道开挖的稳定性影响[J]. 公路, 2012(6): 276-282.
- [2] 冯家鑫, 郇澜. 软弱隧道环形预留核心土开挖过程数值分析[J]. 山西建筑, 2011, 37(29): 151-153.
- [3] 张旭阳. 地铁隧道软弱围岩的预留核心土施工技术[J]. 内蒙古煤炭经济, 2016(15): 129, 160.
- [4] 李莉, 王永峰, 王玉广, 等. 基于有限元模拟的隧洞结构稳定性分析[J]. 工程技术研究, 2020(24): 29-31.
- [5] 张功. 基于强度折减法的隧洞群稳定性分析[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2010.