

# 土石混合回填土区小净距隧道群施工力学分析及应用

申国顺

中铁二十一局集团第五工程有限公司，重庆  
Email: 185052774@qq.com

收稿日期：2021年5月2日；录用日期：2021年5月16日；发布日期：2021年5月28日

## 摘 要

为了研究土石混合回填土区小净距隧道群施工力学行为,依据依托工程地勘、设计和相关文献研究成果,确定比较合理的土石混合回填土和加固区参数,建立小净距隧道群施工过程的三维有限元模型,分析先开挖地铁区间左线隧道、再开挖区间右线隧道、最后开挖中间出段线隧道施工过程的围岩和支护结构变形和受力特征。分析结果表明,选择的开挖顺序、施工和支护步序是比较合理的;隧道群中各分隧道的围岩拱顶竖向位移及洞群围岩拱顶竖向位移最终值均未超过洞群开挖过程中设计规定值,隧道最大主应力主要集中在二次衬砌,小于钢筋混凝土的抗压强度;各隧道围岩塑性区主要集中在隧道左、右边墙和隧道掌子面前方土体,塑性区的纵向影响范围约为10 m,与单模二次衬砌的长度相当;隧道初期支护的最大主应力、二次衬砌中部的最大主应力和最大剪应力皆在容许范围之内,先行隧道的二次衬砌起到了很好地约束和承载作用。

## 关键词

土石混合回填土, 小净距隧道群, 施工力学, 三维有限元, 数值模拟

## Analysis of Construction Mechanics of Tunnel Group with Small Clear Distance in Soil-Rock Mixed Backfill Area

Guoshun Shen

China Railway 21st Bureau Group No.5 Engineering Co., Ltd., Chongqing  
Email: 185052774@qq.com

Received: May 2<sup>nd</sup>, 2021; accepted: May 16<sup>th</sup>, 2021; published: May 28<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

In order to study the construction mechanical behavior of the small-distance tunnel group in the soil-rock mixed backfill area, based on the research results of engineering geological survey, design and related literature, a reasonable parameter of the soil-rock mixed backfill and reinforcement area is determined, and the small-distance tunnel group The three-dimensional finite element model of the construction process analyzes the deformation and force characteristics of the surrounding rock and supporting structure during the construction process of first excavating the left tunnel of the subway section, then excavating the right tunnel of the section, and finally excavating the middle section tunnel. The analysis results show that the selected excavation sequence, construction and support sequence are relatively reasonable; the final value of the vertical displacement of the surrounding rock vault of each sub-tunnel in the tunnel group and the vertical displacement of the surrounding rock vault of the tunnel group did not exceed The specified value is designed during the excavation of the tunnel group. The maximum principal stress of the tunnel is mainly concentrated in the secondary lining, which is less than the compressive strength of reinforced concrete; the plastic zone of the surrounding rock of each tunnel is mainly concentrated in the left and right walls of the tunnel and the soil in front of the tunnel face The longitudinal influence range of the plastic zone is about 10 m, which is equivalent to the length of the single-mode secondary lining; the maximum principal stress of the initial tunnel support, the main principal stress of the secondary lining and the maximum shear stress are all within the allowable range The secondary lining of the first tunnel played a good restraint and bearing role.

## Keywords

Soil Rock Mixed Backfill, Small Clear Distance Tunnel Group, Construction Mechanics, Three Dimensional Finite Element, Numerical Simulation

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

土石混合回填土由作为骨料的碎石或块石和作为充填物的黏土或砂土等构成,是一种非均匀、不连续、内部构造复杂且无规律的地质体,其物理力学性质介于纯土体和破碎岩体之间。徐文杰等[1]从岩土力学的角度出发,认为土石混合回填土是指第四纪以来形成的,由具有一定工程尺度、强度较高的块石、细粒土体及孔隙构成且具有一定含石量的极端不均匀松散岩土介质。土石混合回填土的力学特性不仅取决于充填土体、碎石和石块本身的力学性质,也与土、石的相对比例,颗粒集配,碎石形态等密切相关[2][3],国内外学者运用室内试验、现场原位试验、理论分析、数值模拟等研究方法,对土石混合回填土的物理力学性能[4]-[19]进行了大量研究,取得了丰硕的成果。国内外学者针对隧道群施工过程中围岩的稳定性开展了大量的研究[20]-[26],但这些研究大多是针对岩体或黄土中的隧道群的施工稳定性分析,针对土石混合回填土区的隧道群在施工过程中地层的应力分布、变形发展及卸荷规律的研究并不多。随着我国山地城市(如重庆、贵阳等)的不断扩张和轨道交通的快速发展,一些车站、区间隧道(含停车线隧道)不开避免地要穿越回填土地层。由于回填土的物理力学性质和隧道群施工过程的复杂性以及隧道群围岩的稳定性差,土石混合回填土区隧道群施工力学行为及稳定性亟待进行深入的研究,本文以重庆轨道交

通十号线二期兰花路站 - 南湖路站区间范围为工程背景, 开展土石混合回填土区隧道群施工力学行为及稳定性研究。

## 2. 工程概况

重庆轨道交通十号线二期兰花路站~南湖路站区间范围包含有区间正线左、右线、出段线以及十号线与环线联络线等地下结构工程。其中, 区间正线(左、右线)长 927 m, 出段线长 200 m, 隧道开挖宽度 8.764 m。隧道群中各分隧道之间相距非常近, 其中左线隧道与位于中间的出段线隧道的净距约为 5.35 m, 出段线隧道与右线隧道的净距约为 5.75 m, 区间典型断面设计如图 1 所示。

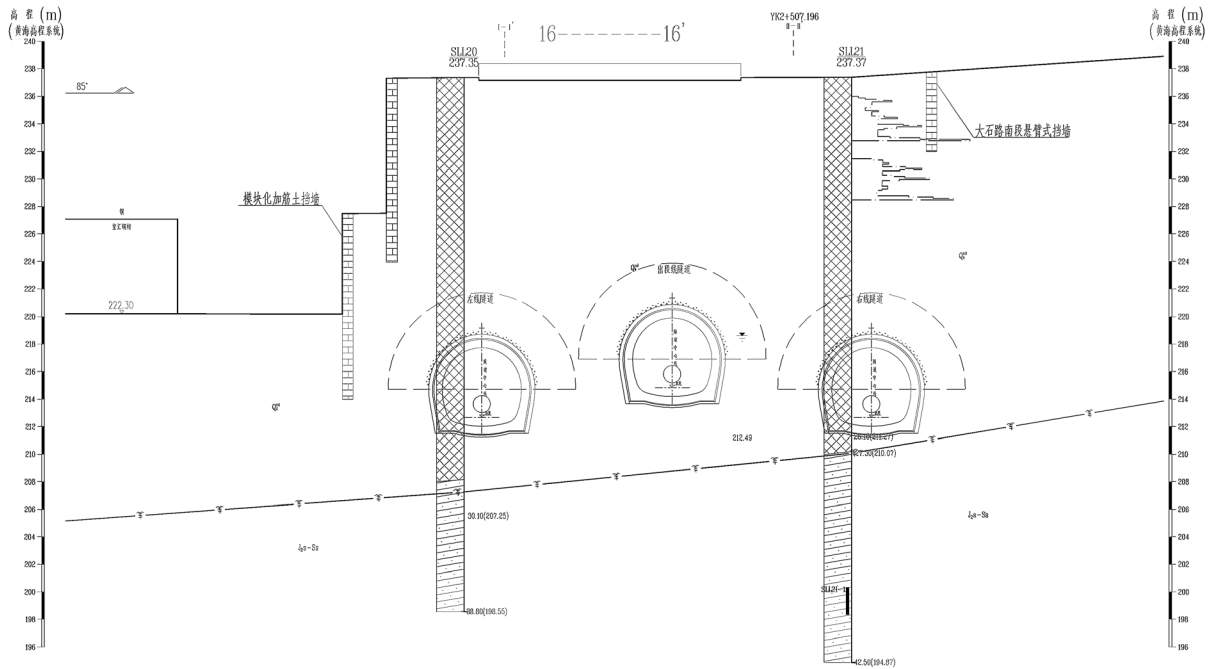


Figure 1. Tunnel group space position  
图 1. 隧道群空间位置

## 3. 隧道群施工过程有限元模型的建立

为确定重庆轨道交通十号线二期兰花路站~南湖路站回填土区间隧道群采用暗挖法施工的开挖顺序、施工和支护步序是否合理。在 Midas GTS 软件中建立三维有限元模型, 分析先开挖地铁区间左线隧道、再开挖区间右线隧道、最后开挖中间出段线隧道施工过程的围岩及支护结构变形和受力特征, 同时, 指导工程有序施工。

### 3.1. 模型范围和边界条件

根据依托工程施工图设计资料, 区间隧道断面为 8.654 m × 8.660 m 的马蹄形。地层岩性从上到下依次为素填土(36 m)、粉质粘土(2 m)和砂岩, 围岩基本分级为 V 级。基于圣维南原理, 考虑到隧道群各分隧道之间的间距非常近, 左、右线分别自中心线向两边取约为 5 倍洞径 45 m, 模型水平方向取 115 m, 下层的砂岩层取 40 m, 则模型竖直方向取 80 m, 沿隧道轴向取 96 m。模型采用四面体与六面体混合实体单元。建立的数值模型划分网格之后共有单元 94,702 个, 节点 53,123 个。模型的边界条件为: 模型的底部边界施加垂直方向的位移约束; 左、右边界施加水平方向位移约束; 模型的前后边界施加轴向的位

移约束；模型顶部为自由面。隧道群整体模型及位置关系如图 2 所示。

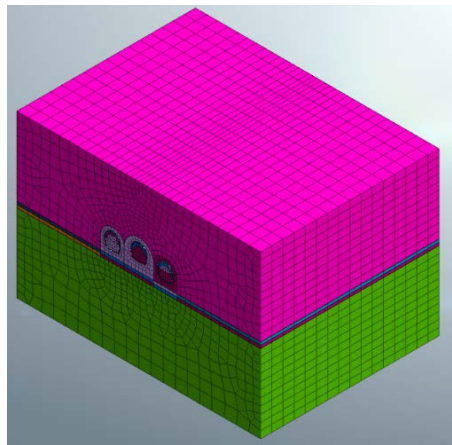


Figure 2. Three-dimensional numerical model of tunnel group

图 2. 隧道群三维数值计算模型

### 3.2. 围岩及支护结构参数选取

#### ①隧道超前加固区

隧道开挖前在掌子面进行帷幕注浆、超前大管棚和超前小导管注浆支护，超前大管棚支护在隧道围岩形成 0.5 m 厚的环状加固圈，超前小导管注浆支护在隧道围岩中形成厚度为 1.5 m 的环状加固圈。在模型中采用 3D 实体单元来模拟注浆加固区，以提高加固区参数来反映预加固效果。

#### ②喷射混凝土和钢拱架

初期支护钢拱架与喷射混凝土进行联合支护，采用等效刚度法将钢拱架的弹性模量折算给喷射混凝土。

数值模拟分析过程中假定岩土体为各向同性，采用 Mohr-Coulomb 准则，参考相关经验[27] [28] [29] [30]和现行规范[31] [32]，围岩及支护结构的物理力学参数如表 1 所示。

Table 1. Parameters of surrounding rock and supporting materials

表 1. 围岩及支护材料力学参数

部位	$E(\text{GPa})$	$\mu$	$\gamma(\text{kN/m}^3)$	$c(\text{kPa})$	$\varphi$
土石混合回填土	0.09	0.4	20	14.5	20
砂岩	3.76	0.2	25	1800	41
注浆加固区	0.7	0.26	22	200	30
初期支护 C25 混凝土	32	0.2	25	—	—
二次衬砌 C40 混凝土	32.5	0.2	25	—	—

### 3.3. 隧道群开挖和支护方法

隧道采用预留核心土台阶法机械开挖。隧道群三线并行施工过程中掌子面相互错开，后进隧道开挖在先行隧道施作一个二次衬砌循环后进行。本工程先施工正线左线隧道，后施工正线右线洞室，待正线左、右线隧道二次衬砌完成后进行出入段线隧道施工。其中右线隧道开挖滞后左线隧道二次衬砌距离为

10 m，出段线隧道滞后右线隧道二次衬砌距离为 10 m，三线并行开挖掌子面里程控制要求如图 3 所示。单洞开挖前，先进行超前支护和全帷幕注浆加固。全帷幕注浆每一循环注浆长度为 20 m，开挖 15 m，保留 5 m 止浆岩盘，第一循环采用 2 m 岩层作为止浆墙。数值模拟开挖过程中，隧道群单洞开挖每循环进尺拟定为 2 m，上台阶拱环掌子面超前上台阶核心土 4 m，上台阶核心土超前下台阶开挖断面距离为 4 m，为防止上台阶初期支护变形过大，在上台阶底部加设临时仰拱，上台阶临时仰拱拆除点与下台阶开挖面之间的间距也控制为 4 m，据此向前循环开挖。

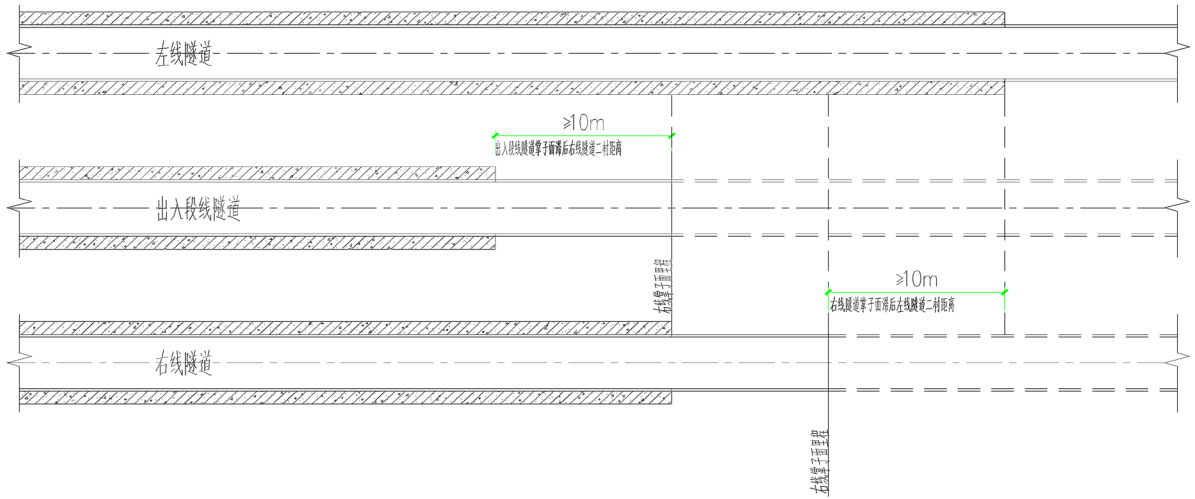
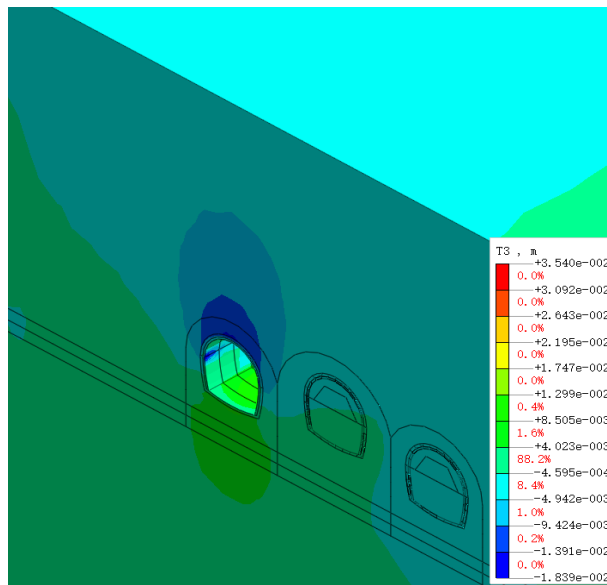


Figure 3. Mileage control schematic diagram of three-line parallel excavation  
图 3. 三线并行开挖掌子面里程控制示意图

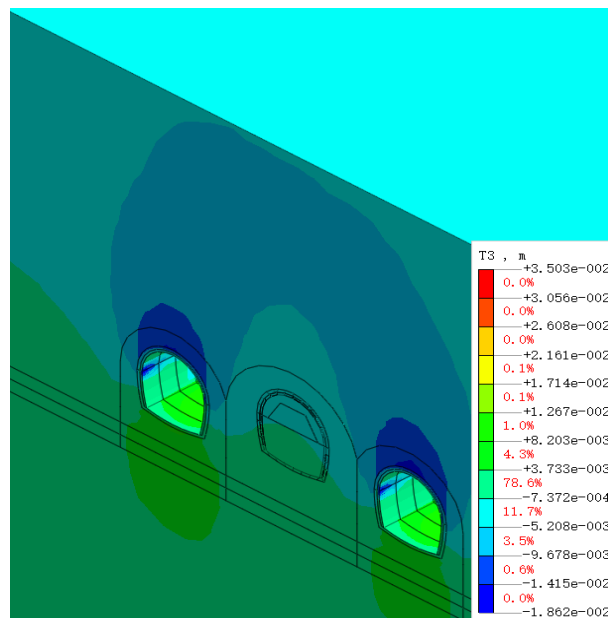
## 4. 隧道群围岩施工力学行为

### 4.1. 围岩位移

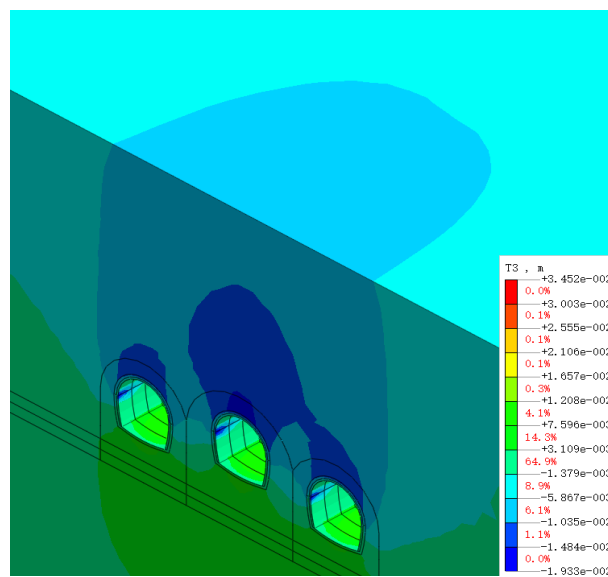
隧道群施工开挖过程中，围岩竖向位移云图随隧道群施工进度的发展变化如图 4 所示。



(a) 左隧首次二次衬砌完成后(20 施工步)竖向位移云图(m)



(b) 右隧首次二次衬砌完成后(30 施工步,左隧完成二次衬砌 50 m) 竖向位移云图(m)



(c) 中隧首次二次衬砌完成后(58 施工步,左隧二次衬砌 60 m,右隧二次衬砌 30 m)竖向位移云图(m)

**Figure 4.** Cloud map of vertical displacement of surrounding rock (Unit: m)

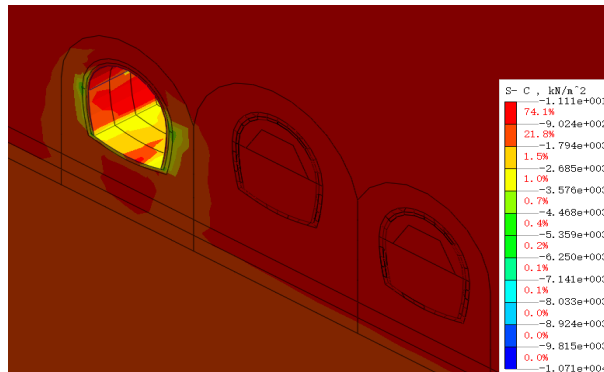
**图 4.** 隧道群施工过程中围岩竖向位移云图(单位: m)

由图 4 可以看出,隧道群在开挖过程中,左隧首次二次衬砌完成后,隧道群竖向最大位移为 18.4 mm,地表沉降 4.9 mm;右隧首次二次衬砌完成后,隧道群竖向最大位移为 18.6 mm,地表沉降 5.2 mm;中隧首次二次衬砌完成后,隧道群竖向最大位移为 19.3 mm,地表沉降 10.4 mm。隧道群中各分隧道的围岩拱顶竖向位移及洞群围岩拱顶竖向位移最终值均未超过洞群开挖过程中设计规定的围岩拱顶最大竖向位移 20 mm 的限值;地表沉降最大竖向位移值也均未超过洞群开挖过程中设计规定的地表最大沉降量 30 mm 的限值,洞群围岩处于稳定状态。

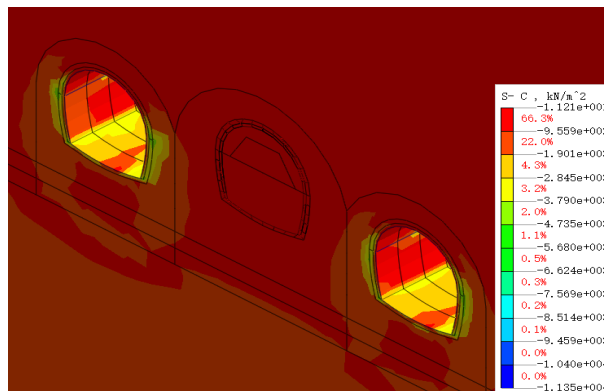
隧道群围岩位移随洞群的不新开挖而逐渐增大，最大位移为隧道群施工完成时中间隧道的拱顶处。最后施工的中间隧道对右侧隧道竖向位移的影响程度要大于其对左侧隧道竖向位移的影响，中间隧道围岩竖向位移影响区与右侧隧道的围岩竖向位移影响区逐渐交汇相连形成相互影响区；在整个施工过程中隧道群各分洞的水平变形均较小，以竖向变形为主。

#### 4.2. 隧道应力

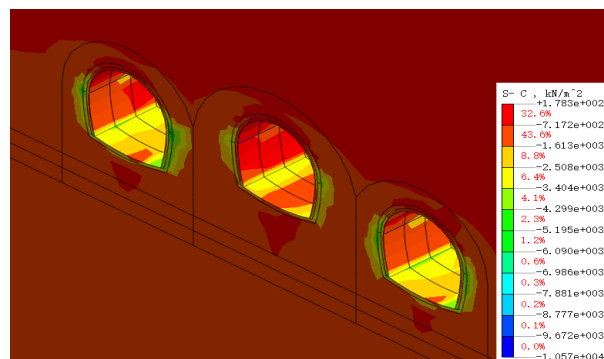
为了对隧道群开挖后围岩的稳定性进行评价，需要分析隧道群的应力情况及其演变规律。与位移分析的施工步相对应，隧道群对应施工步的最大主应力云图如图 5 所示。



(a) 左隧首次二次衬砌完成后最大主应力云图(kPa)



(b) 右隧首次二次衬砌完成后最大主应力云图(kPa)



(c) 中隧首次二次衬砌完成后最大主应力云图(kPa)

**Figure 5.** The maximum principal stress of surrounding rock during tunnel group construction

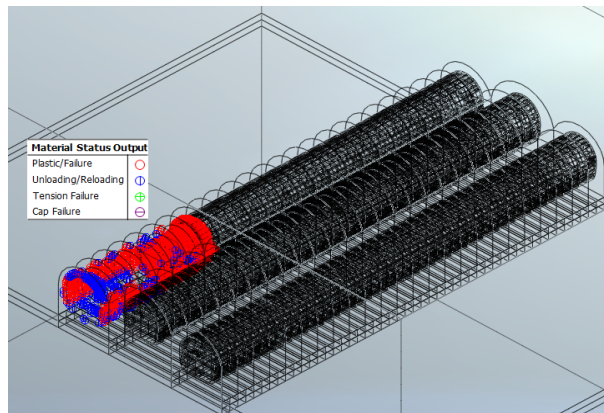
**图 5.** 隧道群施工过程中围岩最大主应力云图



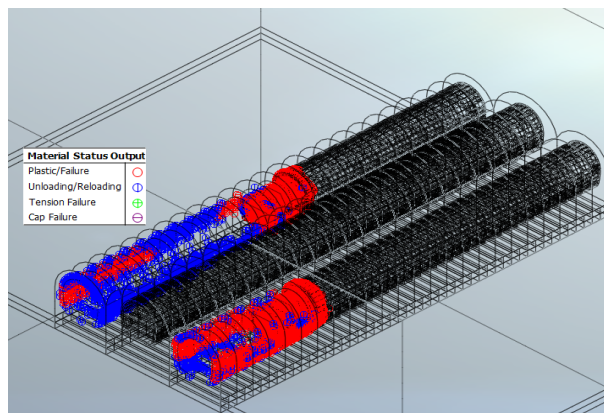
由图 5 可以看出，隧道群对应 20、39 和 58 施工步的最大主应力(压应力)分别为 8.0 MPa、9.46 MPa 和 9.67 MPa，其分布主要集中在二次衬砌，皆小于钢筋混凝土的抗压强度。

### 4.3. 隧道围岩塑性区

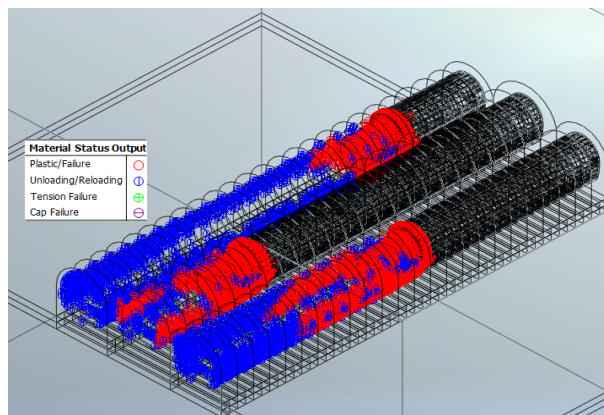
隧道群施工过程中，围岩的塑性区和卸荷区随隧道群施工进度的演化发展如下图 6 所示。



(a) 左隧首次二次衬砌完成后围岩塑性区



(b) 右隧首次二次衬砌完成后围岩塑性区



(c) 中隧首次二次衬砌完成后围岩塑性区

**Figure 6.** Plastic zone of surrounding rock during construction of tunnel group

**图 6.** 隧道群施工过程中围岩塑性区



由图 6 可以看出，隧道群在施工过程中，对应 20、39 和 58 施工步的塑性区分布特征为：当左隧道首次二次衬砌完成后，围岩塑性区主要集中在隧道左、右边墙和隧道掌子面前方土体。当右隧道首次二次衬砌完成后，左隧道围岩塑性区的范围减小，但其掌子面前方土体塑性区仍较明显；右隧道围岩塑性区主要分布在左、右边墙和掌子面前方土体。当中隧道首次二次衬砌完成后，左隧道围岩塑性区主要分布在隧道掌子面前方土体；右隧道围岩塑性区的范围减小，但其掌子面前方土体塑性区仍较明显；中隧道围岩塑性区主要分布在二次衬砌范围右边墙围岩和掌子面前方土体。从围岩塑性区的纵向影响范围来看，约为 10 m，与单模二次衬砌的长度相当。

### 5. 隧道群支护结构力学行为

#### 5.1. 初期支护应力

隧道群施工过程中，隧道初期支护最大主应力特征如图 7 所示。

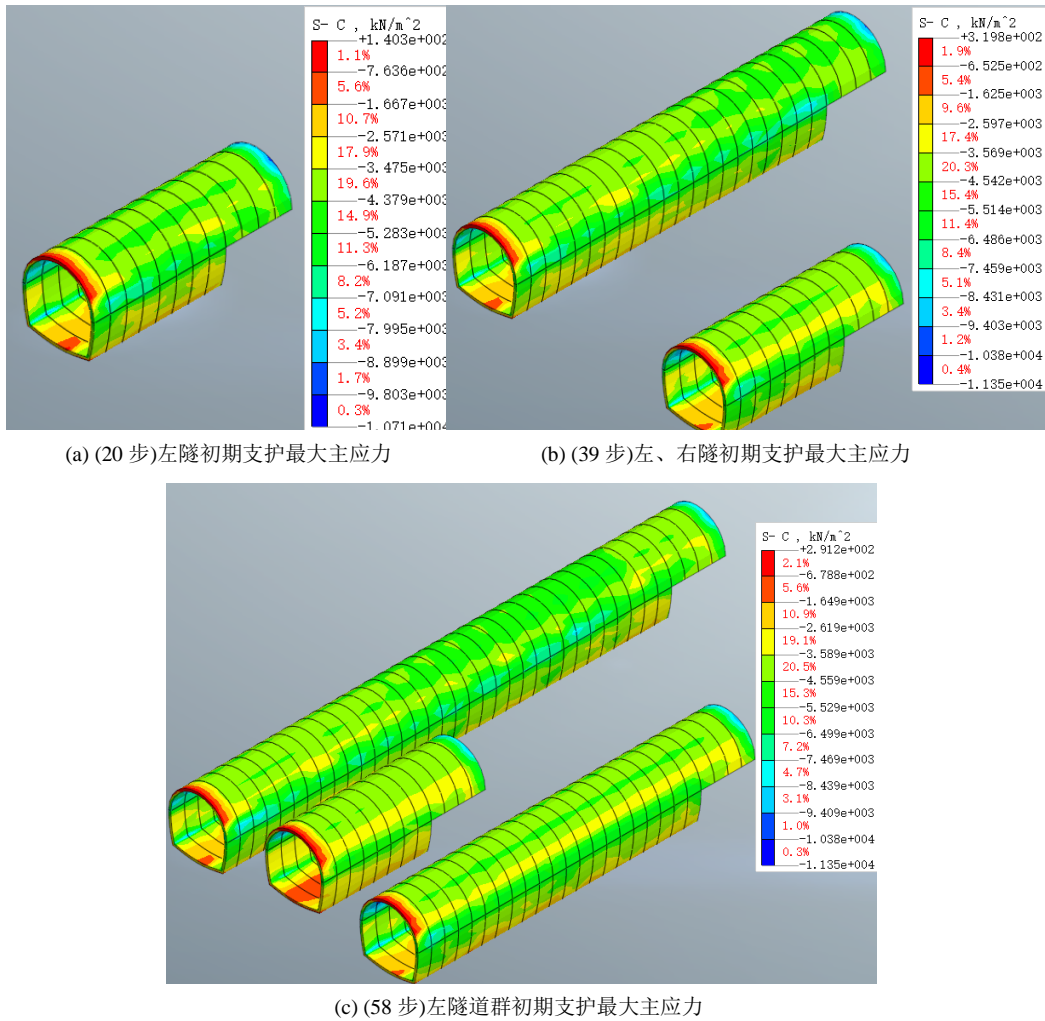


Figure 7. The maximum principal stress of initial support during tunnel group construction  
图 7. 隧道群施工过程中初期支护最大主应力云图

由图 7 可以看出，第(20 步)左隧初期支护最大主应力(压应力)为 10.7 MPa，第(39 步)隧道初期支护最大主应力(压应力)为 11.35 MPa，第(58 步)隧道初期支护最大主应力(压应力)也为 11.35 MPa。中间隧道的

施工对先建隧道(左右隧道)初期支护的最大主应力没有什么影响,说明先建隧道的二次衬砌起到了很好地约束和承载作用。

## 5.2. 二次衬砌内力

隧道群施工完成后,二次衬砌中部主主应力和最大剪应力特征如图8和图9所示。

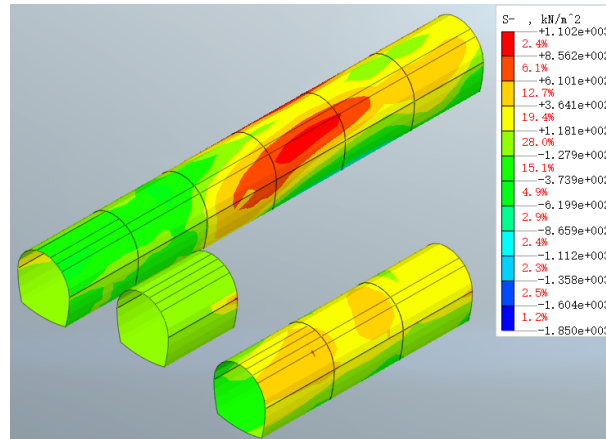


Figure 8. Principal stress cloud diagram in the middle of lining  
图8. 二次衬砌中部主主应力云图

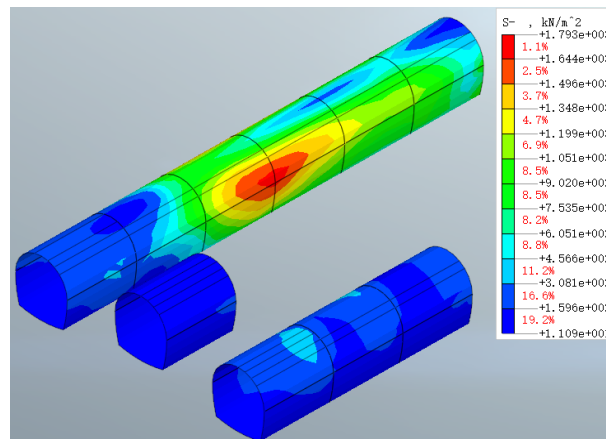


Figure 9. Cloud diagram of maximum shear stress in the middle of lining  
图9. 二次衬砌中部最大剪应力云图

## 6. 结论和建议

土石混合回填土区小净距隧道群的施工力学分析表明,隧道初期支护的最大主应力(压应力)在初期支护混凝土的容许范围之内,二次衬砌中部的主主应力和最大剪应力皆在二次衬砌钢筋混凝土的容许应力范围之内。后行隧道的施工对先行隧道初期支护的最大主应力影响较小,先行隧道的二次衬砌起到了很好地约束和承载作用。可见,在重庆轨道交通十号线二期兰花路站~南湖路站回填土区间隧道群采用暗挖法施工的开挖顺序、施工和支护步序较为合理,本文的分析结果对施工过程控制具有很好的指导意义。得出的主要结论如下:

- 1) 隧道群中各分隧道的围岩拱顶竖向位移及洞群围岩拱顶竖向位移最终值均未超过洞群开挖过程

中设计规定的围岩拱顶最大竖向位移 20 mm 的限值；地表沉降最大竖向位移值也未超过洞群开挖过程中设计规定的地表最大沉降量 30 mm 的限值。

2) 隧道群施工过程中,隧道最大主应力(压应力)主要集中在二次衬砌,小于钢筋混凝土的抗压强度。

3) 隧道群施工过程中,各隧道围岩塑性区主要集中在隧道左、右边墙和隧道掌子面前方土体;后行隧道的施工使先行隧道的左、右边墙塑性区范围减小;隧道围岩塑性区的纵向影响范围约为 10 m,与单模二次衬砌的长度相当。

4) 施工过程必须严格按设计施工,后行隧道必须在先行隧道完成单次二次衬砌后进行。

## 基金项目

本文研究获中铁二十一局集团第五工程有限公司科技计划项目资助。

## 参考文献

- [1] 徐文杰,胡瑞林.土石混合回填土概念、分类及意义[J].水文地质工程地质,2009,36(4):50-56.
- [2] 曹光棚,徐明,宋二祥.土石混合料的力学特性[J].华南理工大学学报:自然科学版,2010,38(11):32-39.
- [3] 王新,丁秀丽.含石量对土石混合回填土力学特性影响的数值试验[J].水运工程,2010(10):93-99.
- [4] 刘新荣,涂义亮,王鹏,钟祖良,唐文斌,杜立兵.基于大型直剪试验的土石混合回填土颗粒破碎特征研究[J].岩土工程学报,2017,39(8):1425-1434.
- [5] 刘新荣,涂义亮,王林枫,冯昊,钟祖良,雷晓丹,等.土石混合体的剪切面分形特征及强度产生机制[J].岩石力学与工程学报,2017,36(9):2260-2274.
- [6] 武明.土石混合非均质填料力学特性试验研究[J].公路,1997(1):40-42,49.
- [7] 李晓,廖秋林,赫建明,陈剑.土石混合回填土力学特性的原位试验研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(12):2378-2384.
- [8] 徐文杰,胡瑞林,谭儒蛟,曾如意,于火青.虎跳峡龙蟠右岸土石混合体野外试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(6):1270-1277.
- [9] 舒志乐,刘新荣,刘保县,郭子红.基于分形理论的土石混合体强度特征研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(S1):2651-2656.
- [10] 王宇,李晓.土石混合回填土细观分形特征与力学性质研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(S1):3397-3407.
- [11] 王江营,曹文贵,张超,汪辉平.基于正交设计的复杂环境下土石混填体大型直剪试验研究[J].岩土工程学报,2013,35(10):1850-1856.
- [12] 田湖南,焦玉勇,王浩,马江锋.土石混合回填土力学特性的颗粒离散元双轴试验模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(z1):3564-3573.
- [13] 独莎莎.土石混合回填土的强度、变形特征与土-石相互作用研究[D]:[硕士学位论文].南京:南京大学,2014.
- [14] 刘海涛,程晓辉.粗粒土尺寸效应的离散元分析[J].岩土力学,2009,30(z1):287-292.
- [15] 徐扬,高谦,李欣,李俊华,贾云喜.土石混合体渗透性现场试坑试验研究[J].岩土力学,2009,30(3):855-858.
- [16] 徐文杰,王永刚.土石混合体细观结构渗流数值试验研究[J].岩土工程学报,2010,32(4):542-550.
- [17] 沈辉,罗先启,毕金锋.土石混合体渗透侵蚀特性数值模拟研究[J].岩土力学,2017,38(5):1497-1502,1509.
- [18] 钟祖良,别聪颖,胡伦,涂义亮.基于 Forchheimer 渗流的土石混合回填土单向固结模型研究[J].地下空间与工程学报,2019,15(2):473-480,488.
- [19] 薛亚东,岳磊,李硕标.含水率对土石混合回填土力学特性影响的试验研究[J].工程地质学报,2015,23(1):21-29.
- [20] 万涛,林刚,习淑娟.超小净距地铁三洞隧道群施工动态数值模拟[J].铁道工程学报,2016,33(12):93-98.
- [21] 陈国良,汤珍兰,罗平山.工程地质的剖析在云桂铁路隧道群施工中的指导及应用[J].现代隧道技术,2016,53(2):213-216.
- [22] 王亚君.浅埋大跨变截面地铁隧道群施工力学效应研究[D]:[硕士学位论文].济南:山东大学,2018.

- 
- [23] 李小华. 新建小净距隧道群支洞施工对主洞的影响研究[J]. 建材与装饰, 2019(1): 283-284.
- [24] 崔光耀, 王明年, 喻波. 地铁车站隧道群施工相互影响范围及应用研究[J]. 工程勘察, 2011, 39(11): 5-10.
- [25] 吴波, 高波, 蒋正华. 地铁隧道复杂洞群施工性态三维数值模拟分析[J]. 地质与勘探, 2003, 39(z2): 140-144.
- [26] 巫裕斌. 薄层破碎硬质岩隧道(群)施工方法及支护方式研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [27] 万涛, 林刚, 刁淑娟. 超小净距地铁三洞隧道群施工动态数值模拟[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(12): 93-98.
- [28] 闵书. 隧道超前小导管注浆预加固数值分析[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [29] 王伟锋. 软岩偏压双连拱隧道管棚预支护参数研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2006.
- [30] 晏启祥, 何川, 姚勇, 邓刚. 小净距隧道施工小导管注浆效果的数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(z2): 239-242.
- [31] 国家铁路局. TB10003-2016. 铁路隧道设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
- [32] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50010-2010. 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.