

# Study on Deformation and Pressure Characteristics of Surrounding Rock at the Cross Section of Weak Surrounding Rock

Shibin Hu

Chongqing Rail Transit Group Co., Ltd., Chongqing  
Email: chn.sunny@qq.com

Received: Mar. 18<sup>th</sup>, 2020; accepted: Apr. 14<sup>th</sup>, 2020; published: Apr. 21<sup>st</sup>, 2020

---

## Abstract

In order to reveal the deformation and pressure characteristics of the surrounding rock at the intersection of the deep tunnel and the cross channel, and to provide a basis for the design and construction control of the supporting structure at the intersection of the deep tunnel. The on-site monitoring and numerical simulation methods were used to analyze the surrounding rock displacement, pressure and stress characteristics at the crossing section of the deep buried tunnel. The results show that the excavation of the horizontal tunnel of the deep tunnel has a significant impact on the displacement and pressure of the surrounding rock of the intersection, and causes the surrounding rock of the intersection to be biased. The deformation of surrounding rock and the pressure of surrounding rock at the intersection have the characteristics of large initial deformation, rapid deformation development and long deformation duration. The excavation of the transverse hole has a greater impact on the maximum principal stress and shear stress of the main tunnel at the intersection, and has a smaller effect on the minimum principal stress. The analysis conclusions are of reference value for the design and construction of deep-buried tunnel crossing sections.

## Keywords

Cross Section of Deep Buried Tunnel, Surrounding Rock Deformation, Surrounding Rock Pressure, Monitoring, Numerical Simulation

---

# 深埋隧道软弱围岩交叉段围岩变形和压力特征分析

胡世斌

重庆市轨道交通集团有限公司, 重庆

## 摘要

为了揭示深埋隧道主洞与横通道交叉段围岩的变形和压力特征, 为深埋隧道交叉段支护结构设计和施工控制提供依据, 采用现场监测和数值模拟方法对深埋隧道交叉段围岩位移和压力及初期支护应力进行了分析。结果表明, 深埋隧道横通道的开挖对交叉段的围岩位移和压力产生了显著的影响, 并使得交叉段的围岩产生偏压; 交叉段水平收敛和拱顶下沉表现为初期变形量大, 变形发展快, 变形持续时间长; 围岩压力表现为初期来压快、压力大、持续时间长; 横洞的开挖对交叉段主洞最大主应力和剪应力的影响较大, 对最小主应力影响较小。分析结论对深埋隧道交叉段的设计和施工具有参考价值。

## 关键词

深埋隧道交叉段, 围岩变形, 围岩压力, 监测, 数值模拟

Copyright © 2020 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

近年来, 关于地铁及浅埋交叉隧道的研究比较多[1] [2] [3] [4] [5], 对深埋隧道交叉段围岩变形和压力的研究也有一些[6] [7] [8], 但对深埋隧道交叉段围岩荷载的确定及支护结构设计仍缺乏充分的依据。本文依托山岭重丘一级越岭公路隧道对深埋隧道软弱围岩主隧道与横通道交叉段围岩变形和压力特征进行监测资料的分析和开挖过程的数值模拟研究, 对交叉段围岩变形和压力随时间和隧道施工步的变化进行深入的研究。依托隧道为分离式深埋隧道, 两平行主洞间共设有 18 条人行横洞, 8 条车行横洞。分离式隧道之间的人行和车型横通道开挖, 引起主隧道围岩和支护结构的应力释放与重分布, 尤其使交叉段岩体与支护结构力学行为发生复杂变化, 对交叉段围岩的力学和变形行为有很大的影响。特别是在软弱围岩段, 横通道的开挖, 往往会造成围岩的大变形和塑性破坏。该深埋隧道横通道大多处于 IV 级软弱围岩段, 岩体受地质构造影响较重, 岩质软弱, 稳定性差。施工开挖后, 交叉段曾发生较大变形, 严重影响施工进度。

## 2. 软弱围岩交叉段变形和压力监测分析

隧道主洞与横通道交叉段地层岩性属志留系页、泥岩夹泥质砂岩、粉砂岩, 岩层节理较发育, 层间结合差 - 很差, 岩体较破碎, 受地质构造影响较重, 属 IV 级围岩。为了深入分析交叉段的围岩变形特征, 通过与软弱围岩普通段(不受交叉开挖的影响)的监测位移进行对比分析。

### 2.1. 围岩变形特征

从软弱围岩交叉段与普通段水平收敛 - 时间关系曲线(图 1)可以看出, 软弱围岩交叉段与普通段有以下不同: 1) 软弱围岩交叉段的水平收敛值(110.1 mm)远远大于普通段的收敛值(3.2 mm), 前者是后者的 34.4 倍;

2) 普通段收敛所需时间为一个月左右, 而软弱围岩交叉段的变形在开挖 80 天后还未收敛; 3) 普通段围岩最大水平收敛速度为 1.24 mm/d, 平均收敛速度为 0.076 mm/d; 软弱围岩交叉段最大收敛速度为 5.9 mm/d, 平均收敛速度为 1.38 mm/d, 分别为普通段的 4.75 倍和 18.13 倍。

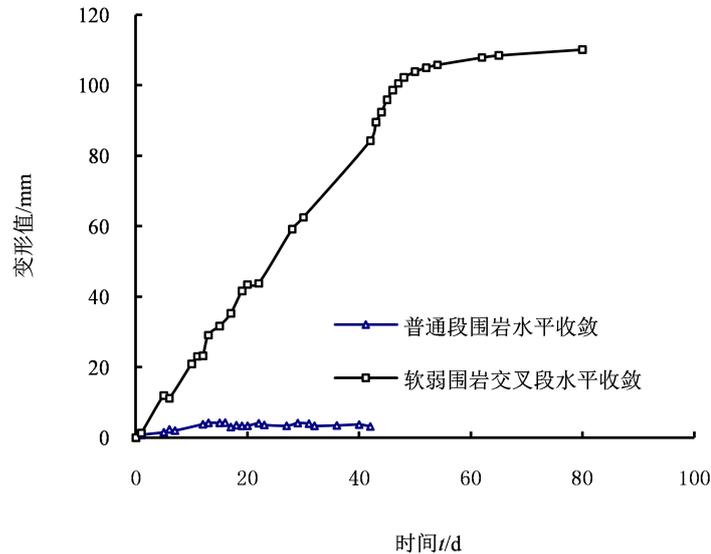


Figure 1. Horizontal convergence-time relation curve  
图 1. 水平收敛 - 时间关系曲线

从软弱围岩交叉段与普通段拱顶下沉 - 时间关系曲线(图 2)可以看出, 二者拱顶下沉随时间变化特征的区别是: 1) 软弱围岩交叉段的拱顶下沉值(60.3 mm)远远大于普通段的拱顶下沉值(7.2 mm), 是普通段的 8.38 倍; 2) 普通段下沉趋于稳定的时间为一个月左右, 而软弱围岩交叉段大于 60 天; 3) 普通段围岩最大拱顶下沉速度为 5.1 mm/d, 平均变形速度为 0.025 mm/d; 较硬岩交叉段最大变形速度为 8.26 mm/d, 平均变形速度为 1.0 mm/d, 是普通段的 40 倍。虽然普通段围岩初期变形速度也很大, 但最终的变形值不大; 软弱围岩交叉段的变形速度基本上是正的, 总的变形量大。

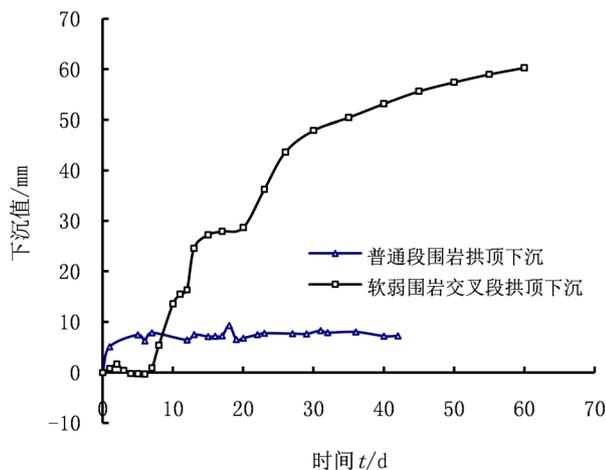


Figure 2. Subsidence displacement-time curves  
图 2. 拱顶下沉 - 时间关系曲线

## 2.2. 围岩压力特征

软弱围岩交叉段与普通段初期支护与围岩之间的压力-时间特征曲线分别如图3和图4所示,交叉段拱顶围岩压力增长很快,受横通道的开挖影响大;左、右拱肩的围岩压力变化特征差别较大,左拱肩围岩压力值明显大于右拱肩,且持续增长时间较长,持续40天左右。普通段围岩压力发生在拱顶位置,最大压力也只有0.10 MPa左右,明显小于交叉段拱顶的围岩压力(0.34 MPa);左、右侧拱肩围岩压力很小,且进入稳定期后二者相差也很小。

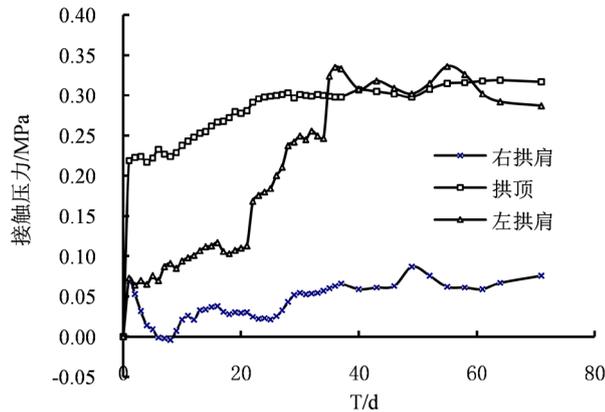


Figure 3. Surrounding rock pressure-time curve in cross section of weak surrounding rock

图3. 软弱围岩交叉段围岩压力-时间曲线

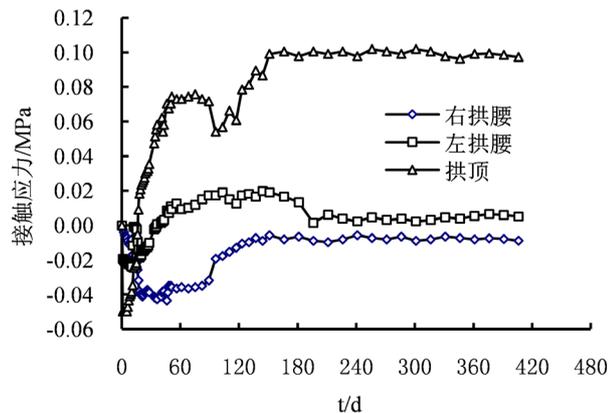


Figure 4. Surrounding rock pressure-time curve in ordinary segment

图4. 普通段围岩压力-时间曲线

## 3. 交叉段横通道开挖过程数值模拟研究

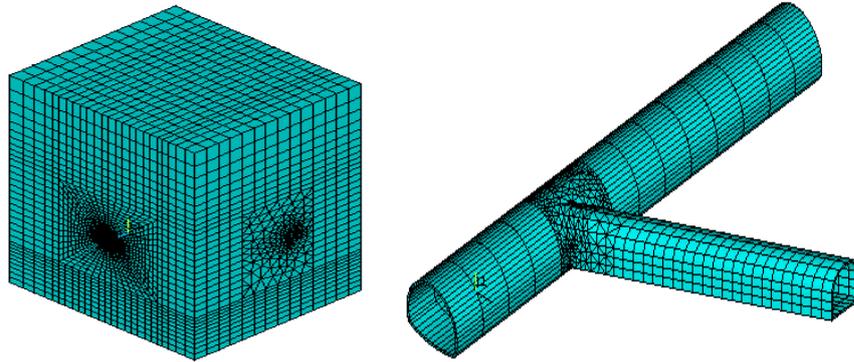
### 3.1. 模型的建立

#### 1) 边界条件及参数选取

对于隧道工程,数值计算模型的范围一般取隧道开挖断面3~5倍最大洞径(或最大跨度),上部用地层压力(重力)来代替。根据隧道软弱围岩主隧道与横通道交叉断面所处地层的地质特征,建立如图5所示的计算分析模型。隧道埋深400 m,主隧道断面为曲墙拱形,车行横洞断面为直墙拱形,主隧道开挖断

面宽度  $B = 12.0 \text{ m}$ ，洞高  $H = 10.0 \text{ m}$ ；横通道开挖断面宽度  $B = 5.8 \text{ m}$ ，洞高  $H = 7.2 \text{ m}$ 。

在模型中围岩材料假设为均质各向同性，不考虑地下水的影响。围岩材料应力 - 应变关系为完全弹性，选用 D-P 模型。数值分析计算范围  $xyz = 95 \text{ m} \times 125 \text{ m} \times 84 \text{ m}$  ( $X$  方向为垂直主隧道中心线方向， $Y$  方向为重力方向， $Z$  方向为主隧道中心线方向)，满足有限元分析要求。主隧道与横通道呈“人”字形斜交。模型划分单元 62686，节点 32269。模型边界  $Z$  方向位移面约束， $Y$  负方向底部边界位移面约束， $Y$  正方向上覆地层厚度  $400 \text{ m}$  的荷载压力 ( $8.8 \text{ MPa}$ )；根据工程地质勘察报告， $X$  方向施加  $7.1 \text{ MPa}$  的侧向压力。



**Figure 5.** Finite element analysis model in cross section  
**图 5.** 交叉段有限元分析模型

根据设计资料，数值模拟采用围岩材料参数如表 1 所列。

**Table 1.** Physical and mechanical parameters of surrounding rock  
**表 1.** 围岩物理力学参数

| $E/10^6 \text{ kPa}$ | $\mu$ | $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ | $c/\text{kPa}$ | $\phi/^\circ$ |
|----------------------|-------|--------------------------------------|----------------|---------------|
| 3.6                  | 0.32  | 22.0                                 | 800            | 35            |

初期支护结构喷射混凝土参数为：弹性模量  $E = 3 \times 10^7 \text{ kPa}$ ，泊松比  $\mu = 0.2$ 。粘聚力  $c = 2 \times 10^3 \text{ kPa}$ ，内摩擦角  $\phi = 40^\circ$ ，重度  $\gamma = 27.0 \text{ kN/m}^3$ 。在计算时未采用锚杆单元，而是采用提高锚杆加固体围岩参数的办法来模拟锚杆的作用。

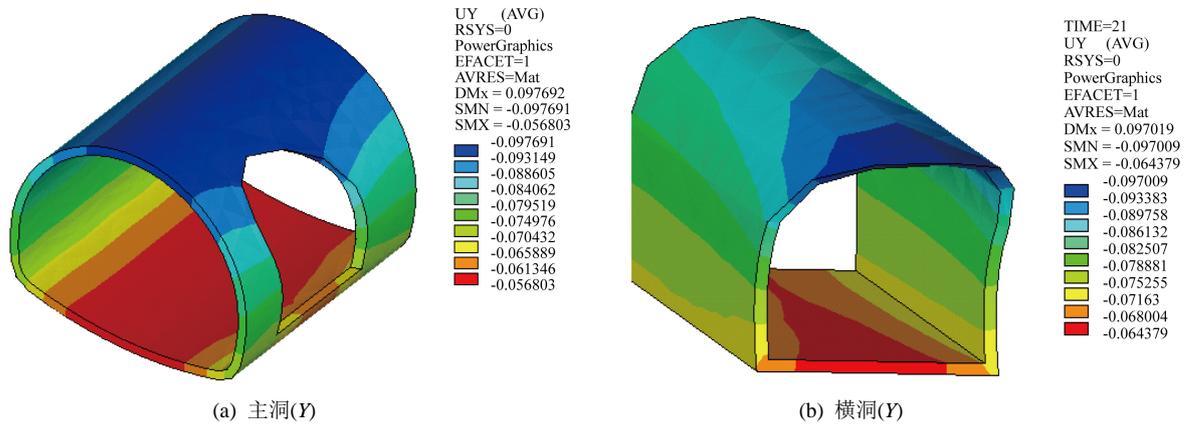
## 2) 施工过程控制

为了简化计算，假定主隧道和车行横通道皆采用全断面开挖，主隧道每一轮开挖进尺  $6.0 \text{ m}$ 。主隧道开挖完成后进行横通道开挖，分为 12 个施工步。横通道开挖方案：从主隧道交叉处开始，向另一主隧道开挖，每一轮开挖进尺  $4 \text{ m}$ ，共 9 个施工步。为了简化计算，只计算横通道与一条主隧道交叉的情况。

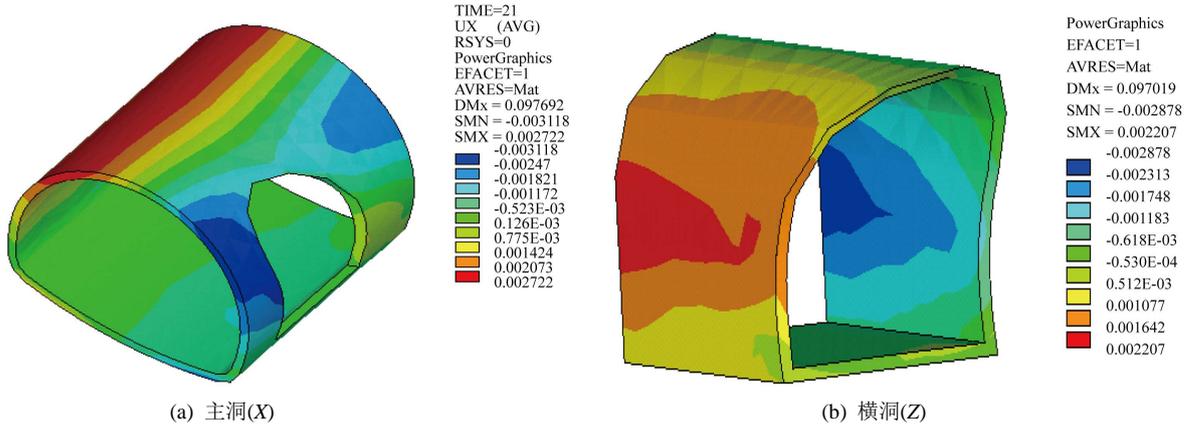
隧道的支护只考虑喷射混凝土初期支护，以体单元进行仿真。喷射混凝土厚度  $30 \text{ cm}$ ，假设为弹塑性材料。因隧道开挖后，应力即开始释放，但是考虑到交叉段受力的复杂性，初期支护立即施作，即本轮开挖的同时进行本轮喷射混凝土初期支护。

## 3.2. 交叉口围岩位移特征

交叉口处隧道主洞和横洞的竖向位移 ( $Y$  方向)、水平位移 ( $X$ 、 $Z$  方向) 云图 (含初始值) 如图 6 和图 7 所示。



**Figure 6.** Vertical displacement characteristics at the intersection (unit: m)  
**图 6.** 交叉口处竖向位移特征(单位: m)



**Figure 7.** Horizontal displacement characteristics at the intersection (unit: m)  
**图 7.** 交叉口处水平位移特征(单位: m)

从图 6、图 7 位移云图中可以看出:

- 1) 隧道开挖完成后, 主洞交叉口沿 Y 方向的最大下沉位移为 98 mm, 横洞交叉口沿 Y 方向的最大下沉位移为 97 mm, 与交叉口监测拱顶竖向位移比较接近;
- 2) 隧道开挖完成后, 主洞交叉口沿 X 方向的最大水平位移为 98 mm, 横洞交叉口沿 Z 方向的最大水平位移为 97 mm, 与交叉口监测水平收敛位移最大值也比较接近。

### 3.3. 交叉段围岩应力特征

交叉段主洞围岩应力特征如图 8 所示, 可以看出:

- 1) 交叉口附近主洞围岩最大主应力  $\sigma_1$  (S3)全部为压应力, 主要分布在拱脚和拱腰, 最大值为 17 MPa, 拱底最小, 分布在拱底中间, 最小值为 3.33 MPa, 拱顶  $\sigma_1$  值为 6.04 MPa。总的来看, 横洞的开挖对  $\sigma_1$  的影响较大, 拱底、拱顶和拱腰处的最大主应力相对普通段分别增大了 8%、48%和 22.3%。交叉口附近主洞的  $\sigma_1$  分区明显, 比普通段的分布杂乱一些。
- 2) 交叉口附近主洞围岩最小主应力  $\sigma_3$  (S1)全部为压应力, 在主洞拱腰处最大, 最大值为 7.3 MPa, 拱底压应力最小, 分布在拱脚附近, 最小值为 0.08 MPa, 拱顶值为 1.8 MPa。总的来看, 横洞的开挖对  $\sigma_3$  没有太大的影响, 只是对分布范围有较大的影响,  $\sigma_3$  分区不明显, 并且连在一起。

3) 交叉口附近主洞围岩  $XY$  平面剪应力  $\tau_{xy}$  在左拱脚和右拱肩最大, 最大值为 5.0 MPa, 横洞的开挖对  $\tau_{xy}$  影响较大, 普通段主洞围岩  $\tau_{xy}$  的分布和交叉口附近主洞围岩  $\tau_{xy}$  分布完全相反。 $YZ$  平面剪应力  $\tau_{yz}$  在右拱脚处为 -1.0 MPa, 左拱脚和拱顶靠近交叉口处为 0.8 MPa, 横洞的开挖对  $\tau_{yz}$  影响较大。

4) 交叉口附近主洞围岩应力和初期支护与围岩之间的监测压力相比显然偏大, 这与监测点埋设的滞后有关。

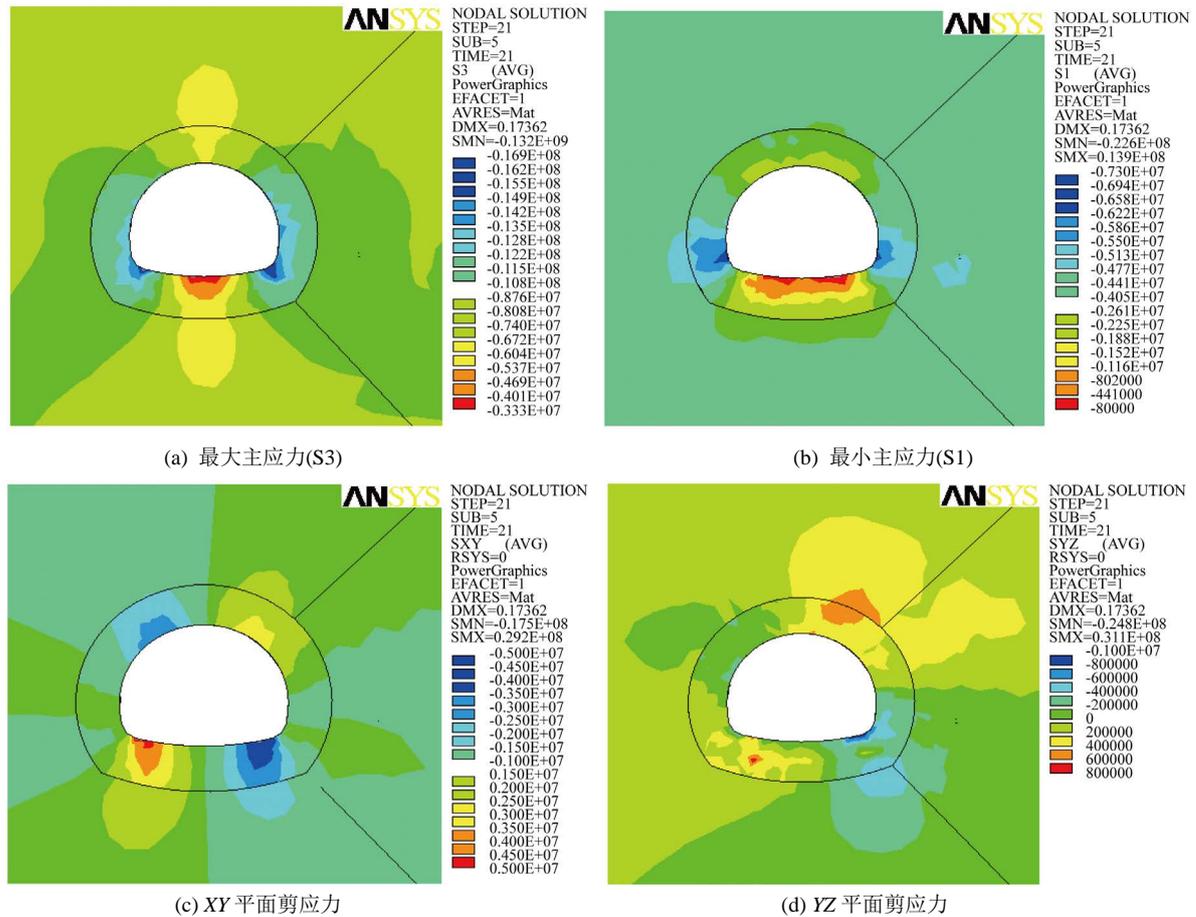


Figure 8. Stress characteristics of surrounding rock of the main tunnel at the intersection (unit: Pa)

图 8. 交叉段主洞围岩应力特征(单位: Pa)

#### 4. 结论和讨论

1) 深埋隧道软弱围岩横通道的施工对交叉段的围岩变形有很大的影响。交叉段水平收敛和拱顶下沉表现为初期变形量大, 变形发展快, 变形持续时间长的特点。

2) 隧道交叉段主洞初期支护围岩压力表现为初期来压快、压力大、持续时间长的特点, 随着横通道的开挖, 交叉段围岩压力呈现偏压的特点, 靠近交叉段一侧的压力约为对侧的 2 倍。

3) 横洞的开挖对交叉段主洞最大主应力的影响较大; 对最小主应力没有太大的影响, 只是对分布范围有较大的影响; 对  $XY$  平面剪应力和  $YZ$  平面剪应力影响都较大。

#### 参考文献

- [1] 陈鑫. 城市地铁隧道交叉段稳定性分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2017.

- [2] 麦家儿. 广州地铁 3 号线支线与主线交叉重叠段的设计与施工[J]. 城市轨道交通, 2005(5): 63-67.
- [3] 姜雪峰. 地铁交叉隧道施工围岩变形及稳定性研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连交通大学, 2018.
- [4] 张建强. 特大断面超浅埋立体换乘车站交叉段暗挖施工技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [5] 段宝福, 李磊. 地铁暗挖区间重叠交叉隧道施工与监测[J]. 施工技术, 2012, 41(368): 77-81.
- [6] 张俊. 公路隧道与辅助通道交叉结构稳定性分析[J]. 路基工程, 2018(6): 167-171.
- [7] 李玉峰, 彭立敏, 雷明锋. 交叉隧道工程设计施工技术研究进展[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(1): 67-73.
- [8] 邓稀, 周亭秀. 山岭隧道主洞与联络道交叉段稳定性分析[J]. 四川建材, 2017, 43(4): 70-72.