

文章编号: 1674-599X(2021)01-0082-07

## 浅埋偏压双孔隧道开挖顺序优化研究

李扬<sup>1</sup>, 费维水<sup>1</sup>, 刘文连<sup>2</sup>, 肖南润<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学, 云南 昆明 650000;

2. 中国有色金属工业昆明勘察设计院有限公司, 云南 昆明 650000)

**摘 要:** 为研究先行洞优先原则与 CRD 法开挖顺序相结合对浅埋偏压双洞隧道围岩的影响, 提出合理的隧道开挖顺序。以重庆某隧道工程为依托, 采用 Midas/GTS 软件建立了二维有限元隧道模型, 分析了右洞先行且先开挖右侧、右洞先行且先开挖左侧、左洞先行且先开挖右侧、左洞先行且先开挖左侧等 4 种不同开挖方案的主应力分布情况。研究结果表明: 采用右洞先行且先开挖左侧的开挖顺序时隧道围岩的位移和应力最小, 该开挖方案最佳, 以为类似隧道施工提供借鉴。

**关键词:** 隧道工程; 浅埋偏压隧道; CRD 法; 数值模拟; 开挖顺序

中图分类号: U455

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.01.012

## Study on optimization of excavation sequence of shallow-buried bias pressure double-hole tunnel

LI Yang<sup>1</sup>, FEI Wei-shui<sup>1</sup>, LIU Wen-lian<sup>2</sup>, XIAO Nan-run<sup>1</sup>

(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650000, China;

2. China Nonferrous Metals Industry Kunming Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Kunming 650000, China)

**Abstract:** To study the influence of the first tunnel priority principle and the CRD excavation sequence on the surrounding rock of shallow-buried bias pressure double-tunnel tunnel, a reasonable tunnel excavation sequence was put forward. Based on a tunnel project in Chongqing, a two-dimensional finite element tunnel model was established by using Midas/GTS software, and the principal stress of four different excavation schemes, namely right hole with right first excavation, right hole with left first excavation, left hole with right first excavation, and left hole with left first excavation, were analyzed respectively. The results show that the excavation scheme of right hole with left first excavation minimizes the displacement and stress of surrounding rock, and the excavation scheme is the best. The results can provide references for similar tunnel construction.

**Key words:** tunnel engineering; shallow-buried bias tunnel; CRD method; numerical simulation; excavation sequence

隧道施工中, 不可避免地穿越一些特殊地形条件, 也会遇见各种复杂情况, 对隧道施工的安全性和隧道围岩的稳定产生极大影响, 如位于宁夏中卫市沙坡头区迎水桥镇孟家湾村的大湾沟隧道, 其所在地区的地形高低起伏大, 母岩成分为强、中风化砂岩, 隧道围岩属于 IV~V 级围岩, 岩石稳定性较

差, 开挖时极易产生坍方、脱层、掉块等问题<sup>[1]</sup>。为保证隧道施工的安全性, 需要对隧道施工工艺进行优化。浅埋偏压隧道因隧道左、右两侧上覆土体方量相差较大, 开挖过程将会打破原有的应力分布, 造成隧道结构两侧荷载不对称, 从而容易导致隧道左、右两侧围岩变形量及应力值不一致<sup>[2]</sup>, 而

收稿日期: 2018-03-07

作者简介: 李扬(1995-), 男, 昆明理工大学硕士生。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

开挖顺序的改变是减小开挖扰动造成围岩变形的一种有效手段,因此,相关学者对隧道开挖顺序的优化进行了许多理论分析和数值模拟研究。石熊<sup>[3]</sup>等人依托赣韶铁路上的良村隧道工程,通过现场监测与数值模拟相结合的方法,研究了不同开挖顺序时的围岩位移和应力变化情况,获得了大断面浅埋偏压隧道采用 CRD 法施工的合理顺序,应为先开挖埋深较浅部分。杨恢元<sup>[4]</sup>针对偏压情况下的大跨径软弱围岩隧道的开挖进行了数值仿真分析,得到了大跨径软弱围岩偏压隧道采用三台阶预留核心土法施工时,应先开挖埋深较浅一侧比较合理。周玉宏<sup>[5]</sup>等人采用考虑弹塑性非线性二维有限元模型,对云南元磨高速公路桥头隧道进行了模拟,通过模拟值与现场量测数据进行对比分析,得出了偏压连拱隧道施工时应先开挖埋深较浅一侧隧洞的结论。宋振华<sup>[6]</sup>采用有限元模型计算隧道左、右洞全部在滑坡体中,外洞在滑坡体中,内洞在滑坡体外及隧道左、右洞全部在滑坡体外的 4 种工况,得出了先行洞的优先原则。

不同开挖顺序对浅埋偏压隧道围岩变形与应力的影响显著,但多数研究为针对隧道位于承载能力较好的土体或岩体,先行洞优先原则与 CRD 法开挖顺序相结合对隧道围岩影响的研究鲜有。因此,作者以重庆某隧道施工为背景,拟采用右洞先行且先开挖右侧、右洞先行且先开挖左侧、左洞先行且先开挖右侧、左洞先行且先开挖左侧 4 种不同方案对隧道围岩的位移及应力进行研究。

## 1 工程概况

## 1.1 工程简介

该隧道工程位于重庆市城区, 全为地下线分离式双向隧道, 左线长 3.978 7 km, 右线长 3.948 km, 隧道内部净宽 13.25 m。隧道左线桩号为 ZK1+120~ZK5+110, 右线桩号为 YK0+690~YK4+649.478, 其中隧道入口段穿越Ⅵ级围岩素填土层。隧道埋深为 4.7~21.9 m, 该段属于浅埋偏压土层隧道。

## 1.2 隧道地质条件

隧道入口段主体围岩为Ⅵ级软弱围岩,主要由素填土构成,覆盖范围和土层堆积厚度较大。素填土的土质构成以粉质粘土、碎石和块石为主,结构

松散稍密，压缩性大，主要特征为强度低、易松动及发生变形。土层隧道的围岩自稳定性差，对控制隧道开挖变形有更高的技术要求。开挖过程中，若隧道侧壁及顶部不及时支护或支护(处理)不当，易产生较大规模的坍塌，侧壁土层结构稳定性相对较差。隧道围岩随着掘进逐渐变为中风化泥岩，岩层自稳能力相对较好，埋深较深，施工技术难度较低。岩土体弱富水性，开挖过程中可能存在小量的岩土滴水、渗水等现象。

### 1.3 隧道施工工艺

该隧道属于浅埋偏压土层隧道,存在埋深浅、偏压、小净距等复杂情况。因此,在隧道的初期施工时,采用预埋管棚及超前小口径导管法进行预加固。采用 CRD 法分段进行隧道开挖,在中台阶设置临时仰拱、临时中隔壁及临时仰拱处,采用喷锚+型钢拱架进行临时支护。初期支护采用 C25 喷射混凝土,内置双层  $\Phi 8$  钢筋网和工 25b 钢架,锁脚锚杆采用小型钢导管。二次衬砌结构采用双层 C35 钢筋混凝土。对于洞内隧道底部为土层的部分,采用直径 1 m 的高压旋喷桩进行基础加固,实施时间为初期支护成功闭环后。隧道的施工工艺示意如图 1 所示。

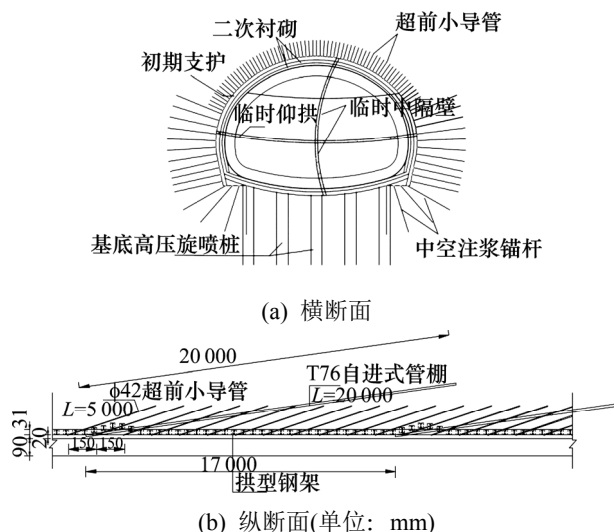


图 1 隧道施工工艺示意

**Fig. 1** Schematic diagram of tunnel construction process

## 2 模型概况

为研究浅埋偏压隧道合理开挖顺序, 利用 Midas/GTS 有限元软件, 选取隧道受浅埋偏压影响

最为明显的剖面作为计算剖面，然后对隧道进行建模。

2.1 模型设置

利用 Midas/GTS 软件模拟隧道施工过程。根据相关理论与实际应用经验，在均匀介质层与弹性层的无限域中，开挖一个圆形洞室。由于荷载释放，引起 5 倍洞径范围以外的洞室周围介质应力变化很小，其影响可以忽略不计。因此，模型尺寸设置为大于 5 倍隧道直径，可以消除边界效应带来的影响<sup>[7-9]</sup>。为尽量减小边界效应对隧道围岩的直接影响，设置计算模型范围为：水平方向取 360 m，垂直方向由隧道底部到模型底部边界取 72 m，向上按埋设取至地表。模型的土体由 10 653 个单元和 10 920 个节点连接组成。隧道由 4 473 个单元和 4 612 个节点连接组成。模型的左、右两侧均采用水平铰支座来控制模型水平方向的位移，底部采用固定支座来控制模型底部水平和竖直 2 个方向的位移。计算模型如图 2 所示。

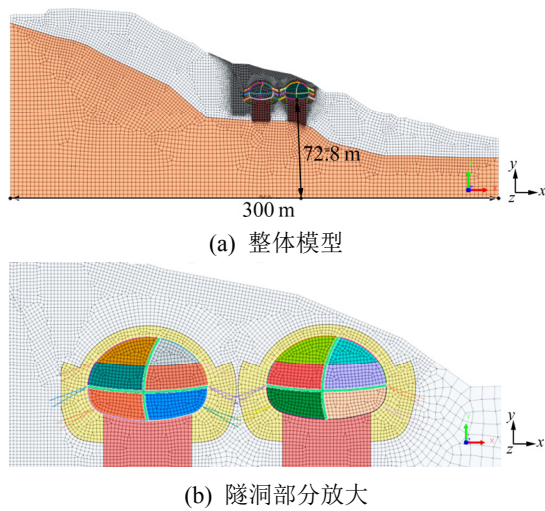


图 2 Schematic diagram of calculation model

2.2 土体本构模型及模型参数

为了减小数值模拟的计算量，对模型边界范围内的地层进行简化，主要研究填土层和中风化泥岩。岩土体的本构模型均采用摩尔库伦模型(M-C)，隧道初期支护与二次衬砌采用梁单元进行模拟。预加固、土体注浆及基底加固均采用等效的方法进行简化。模拟过程中，通过提高土体的参数来表现其作用。根据工程勘察报告及文献资料<sup>[10-11]</sup>，选取数值模拟计算的参数，模型所采用的具体物理力学参数见表 1。

隧道围岩位移观察点的选择参照《公路隧道施工技术规范(JTG/T3660—2020)》<sup>[12]</sup>中要求选取，所选观察点如图 3 所示。

表 1 计算参数表

Table 1 Calculation parameters					
材料	弹性模量/MPa	泊松比	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)
素填土	30	0.38	20.57	3	28.0
中等风化泥岩	1 169	0.32	25.20	473	30.6
小导管及管棚加固区	500	0.30	21.00	200	33.0
隧道基底加固	1 000	0.30	21.00	200	33.0
锁脚锚杆	200 000	0.30	78.50		
C25 喷层	23 000	0.20	23.00		
工 25b 钢架	200 000	0.30	78.50		
C35 二次衬砌	31 500	0.20	25.00		
临时仰拱	24 600	0.20	23.00		
横隔墙	24 600	0.20	23.00		

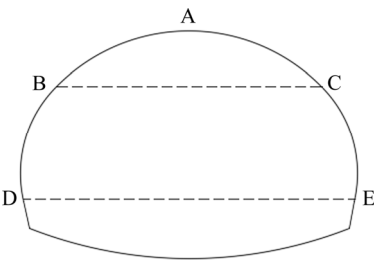


图 3 观察点布置示意

Fig. 3 Schematic diagram of monitoring point layout

2.3 计算方案

该双隧道存在浅埋偏压，采用 CRD 法进行开挖，设计了 4 种不同开挖施工工序的计算方案：①右洞先行且先开挖右侧；②右洞先行且先开挖左侧；③左洞先行且先开挖右侧；④左洞先行且先开挖左侧。其中，右洞为埋深较浅侧隧洞，左洞为埋深较深侧隧洞。CRD 法具体开挖顺序如图 4 所示。

3 数值计算结果分析

3.1 不同计算方案下隧道围岩位移分析

3.1.1 水平位移分析

运用 Midas/GTS 软件模拟 4 种设计方案进行隧道开挖后围岩的水平位移云图和围岩水平位移量对比图，如图 5、6 所示。从图 6 中可以看出，方案 2 最优、方案 1 次之、方案 4 再次之、方案 3 最差。

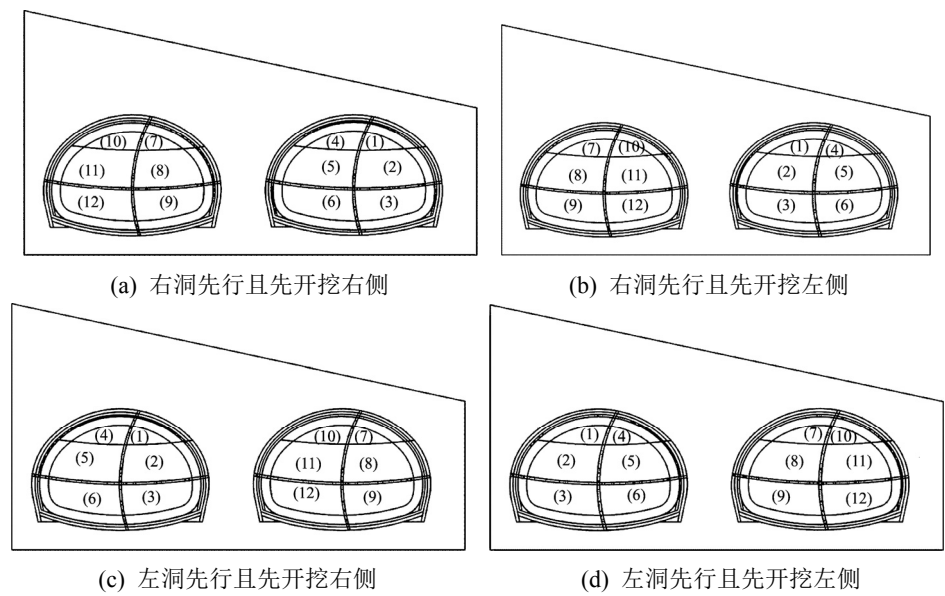


图 4 CRD 法开挖顺序示意

Fig. 4 Schematic diagram of CRD excavation sequence

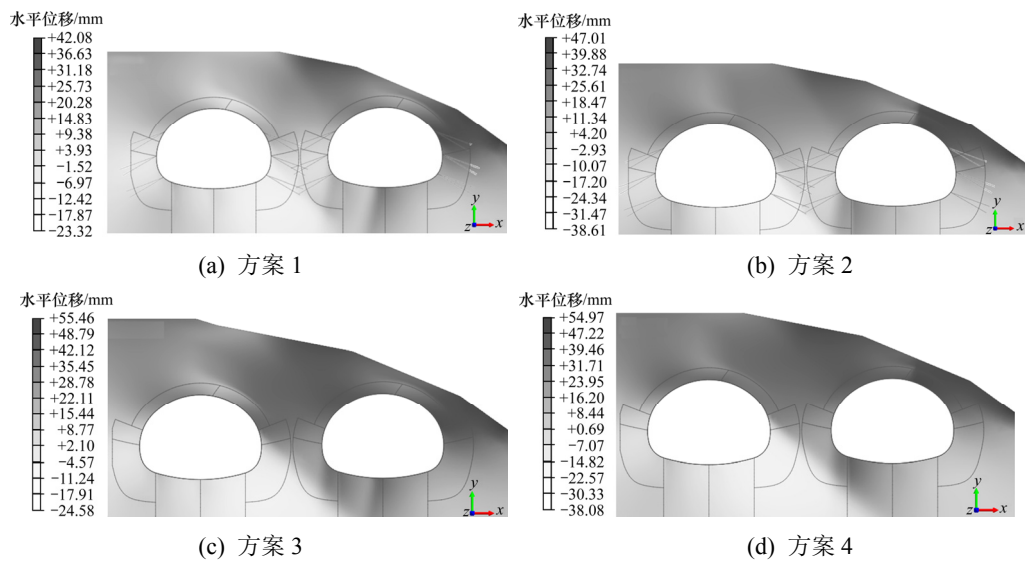


图 5 不同计算方案的隧洞围岩水平位移云图

Fig. 5 Horizontal displacement map of surrounding rock of tunnel under different calculation schemes

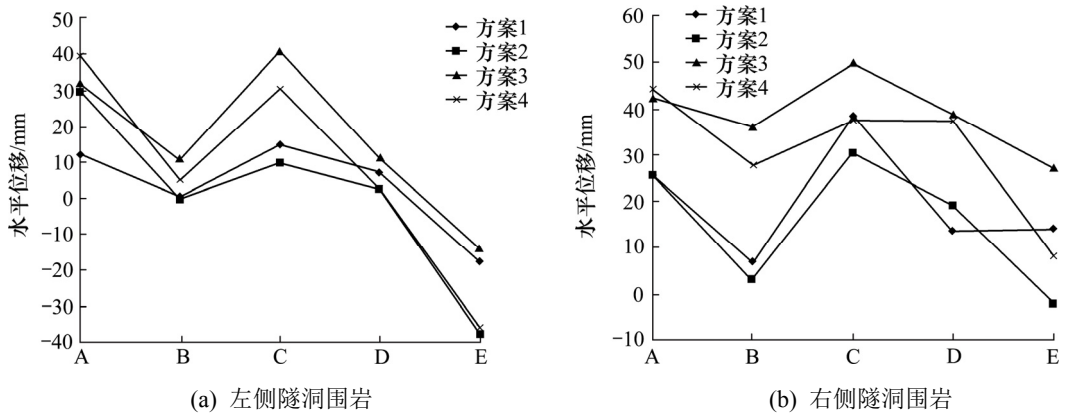


图 6 隧洞围岩水平位移量对比

Fig. 6 Comparison of horizontal displacement of surrounding rock of tunnel

采用方案 2 进行隧道开挖时,与方案 3 相比,左侧隧洞 A、B、C、D、E 5 个观察点的围岩水平位移值分别减小 2.4 mm、11.0 mm、31.5 mm、8.7 mm、23.7 mm。右侧隧洞 A、B、C、D、E 5 个观察点的围岩水平位移值分别减小了 16.7 mm、33 mm、19.6 mm、19.7 mm、29.1 mm。因此,合理的开挖顺序,能切实降低隧道开挖时围岩产生的水平位移。

### 3.1.2 水平收敛位移分析

依据隧道上、下拱腰处的围岩水平位移,可以进一步得出隧道围岩水平收敛的情况,按照 4 种方案进行隧道开挖后围岩水平收敛值的对比如图 7 所示。从图 7 中可以看出,左侧隧洞围岩的水平收敛规律不明显;上拱腰 BC 线的水平收敛最小值为 10.3 mm(方案 2),最大值为 51.8 mm(方案 3);下拱

腰 DE 线的水平收敛最小值为 25 mm(方案 1),最大值为 40.2 mm(方案 2)。右侧隧洞围岩的水平收敛规律较为明显,采用方案 2 开挖时,右侧隧洞的水平收敛值最小,与水平收敛值最大的方案 3 相比上拱腰 BC 线的差值为 52.6 mm,下拱腰 DE 线的差值为 45 mm。综合分析上、下拱腰的水平收敛,采用方案 2 开挖时,隧道水平收敛值最小,对隧道的受力最有利。

### 3.1.3 竖向位移分析

按照 4 种方案进行隧道开挖后的围岩竖向位移云图和围岩竖向位移量对比图如图 8、9 所示。从图 9 中可以看出,不同开挖方案对隧道围岩的竖向位移量影响不大,对围岩竖向变形没有明显改善。各种方案开挖后,隧道上大多数观察点的围岩竖向位

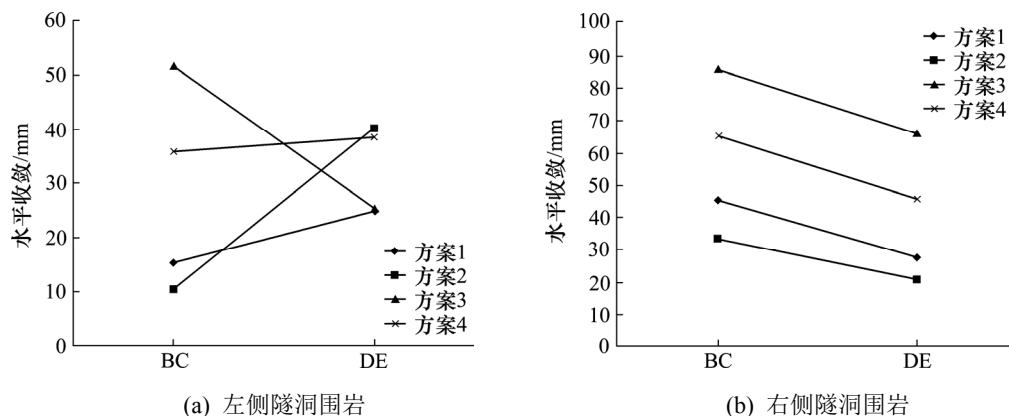


图 7 隧洞围岩水平位移收敛值对比图

Fig. 7 Comparison of horizontal displacement convergence values of surrounding rock of tunnel

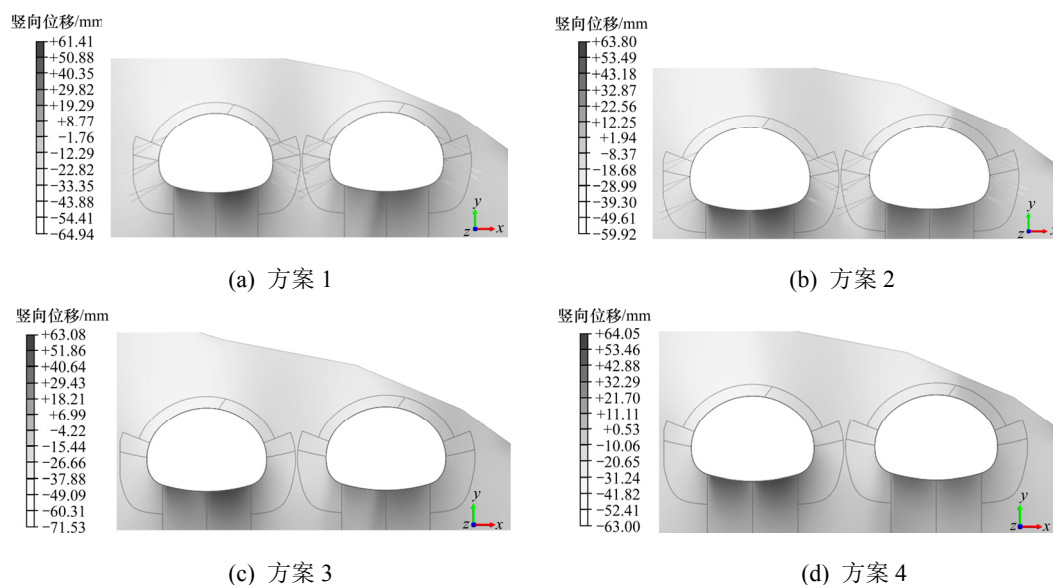


图 8 不同计算方案下隧洞围岩竖向位移云图

Fig. 8 The vertical displacement map of surrounding rock of tunnel under different calculation schemes



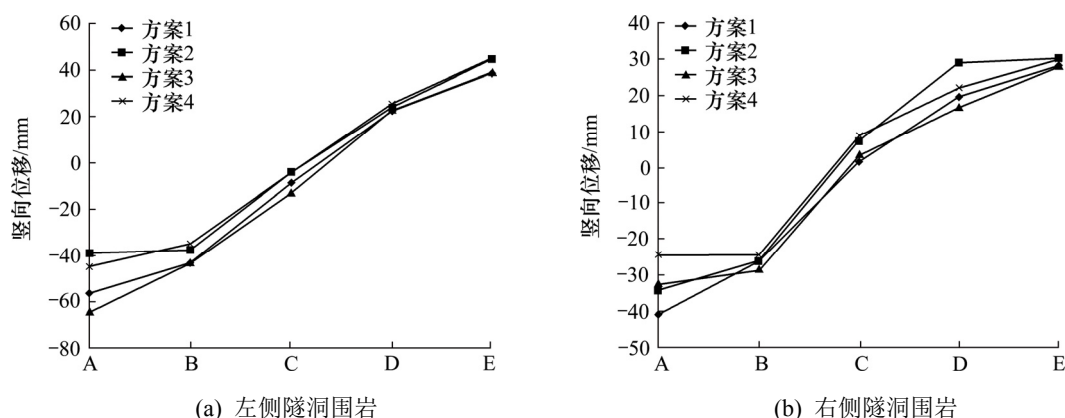


图 9 隧洞围岩竖向位移量对比图

Fig. 9 Comparison diagram of vertical displacement of surrounding rock of tunnel

移相差不大, 仅左洞 A 点在方案 2 和方案 3 下的差值为 16.5 mm, 右洞 A 点在方案 1 和方案 4 下的差值为 16.5 mm, 右洞 D 点在方案 2 和方案 3 下的差值为 12.2 mm, 其余情况的竖向位移量差值均小于 10 mm。

### 3.2 不同计算方案下隧道围岩应力分析

运用 Midas/GTS 模拟 4 种计算方案进行开挖后, 计算方案 1~4 隧道围岩最大主应力值  $f$  分别为 269.3, 233.8, 235.0, 248.0 kPa。采用不同方案进行开挖后, 得到围岩不同的最大主应力。隧道围岩的主应力采用方案 1 时最大, 采用方案 2 时最小, 两者最大主应力差值为 35.5 kPa。表明: 采用方案 2 开挖时, 隧道围岩的拉应力最小, 围岩更为稳定, 说明改变隧道的开挖顺序能够有效减小隧道围岩的不利受力, 从而使隧道更加安全。

## 4 结论

依托重庆某隧道工程, 基于 Midas/GTS 有限元分析软件建立了数值模型。在浅埋偏压条件下, 采用 CRD 法进行开挖, 通过计算分析隧道围岩的位移和应力, 得出结论为:

1) 开挖顺序为右洞先行且先开挖左侧时, 隧道左、右洞围岩的水平位移量最小。与其他方案相比, 左侧隧洞水平位移量最大减小了 31.5 mm, 右侧隧洞水平位移量最大减小了 33 mm。在右侧隧洞上, 拱腰处水平收敛值的降幅最大, 为 52.6 mm。合理的开挖顺序, 能切实降低隧道开挖时围岩产生的水平位移。

2) 不同开挖方案对隧道围岩的竖向位移量影

响有限, 所以从隧道围岩竖向变形难以判断各种开挖方案的优劣性。

3) 开挖结束后, 采用右洞先行且先开挖左侧的开挖方案时, 能最大幅度的减小隧洞围岩所受的拉应力。隧道围岩主应力最大为右洞先行且先开挖右侧方案, 最大主应力为 269.3 kPa。其次是采用左洞先行且先开挖左侧方案, 其最大主应力为 248.0 kPa, 2 种方案得到的围岩主应力相差不大。

4) 与其他方案相比, 采用右洞先行且先开挖左侧的开挖方案能使隧道围岩水平位移及最大主应力更小, 对隧道施工更有利。对于此类浅埋偏压隧道, 采用 CRD 法开挖时, 该方案更为合理。

### 参考文献(References):

- [1] 雷刚. 大湾沟隧道开挖顺序 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟研究[J]. 土工基础, 2014, 28(3): 81-83. (LEI Gang. Numerical simulation of dawangou tunnel excavation sequence by FLAC<sup>3D</sup>[J]. Soil Engineering and Foundation, 2014, 28(3): 81-83. (in Chinese))
- [2] 高攀科, 徐林生, 吴恒滨. 隧道洞口浅埋偏压段施工性态数值模拟分析[J]. 公路, 2013, 58(7): 263-267. (GAO Pan-ke, XU Lin-sheng, WU Heng-bin. Numerical analysis of construction behavior of a shallow and unsymmetrical loading portal in tunnel with weak rockmass[J]. Highway, 2013, 58(7): 263-267. (in Chinese))
- [3] 石熊, 张家生, 刘宝琛. 大断面浅埋偏压隧道 CRD 法施工工序研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(3): 193-199. (SHI Xiong, ZHANG Jia-sheng, LIU Bao-chen. A study of the construction sequences of a large-section shallow-buried unsymmetrical loading tunnel by the CRD method[J].

- Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(3): 193–199. (in Chinese))
- [4] 杨恢元. 大跨软岩偏压隧道开挖顺序优化研究[J]. 贵州大学学报: 自然科学版, 2015, 32(4): 118–121. (YANG Hui-yuan. Investigation into optimization of excavation sequence under bias tunnel with soft rock and big span[J]. Journal of Guizhou University: Natural Sciences, 2015, 32(4): 118–121. (in Chinese))
- [5] 周玉宏, 赵燕明, 程崇国. 偏压连拱隧道施工过程的优化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 679–683. (ZHOU Yu-hong, ZHAO Yan-ming, CHENG Chong-guo. Optimum analysis on the construction process for joint arch tunnels in partial pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(5): 679–683. (in Chinese))
- [6] 宋振华. 偏压地形隧道开挖顺序及支护结构优化研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(S1): 1398–1402. (SONG Zhen-hua. Research of bias tunnel excavation sequence and supporting structure optimization[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(S1): 1398–1402. (in Chinese))
- [7] 黄维新, 吴寒, 王杰, 等. 偏压软弱围岩隧道开挖顺序比较研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(2): 277–285. (HUANG Wei-xin, WU Han, WANG Jie, et al. A comparison study on excavation sequence of unsymmetrical loading tunnel in weak surrounding rock[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(2): 277–285. (in Chinese))
- [8] 王红伟. 新奥法理论分析及工程应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2004. (WANG Hong-wei. NATM theoretical analysis and applied research in project[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. (in Chinese))
- [9] 鲍先凯, 杨东伟, 段东明, 等. 施工工法对浅埋软岩小净距隧道地表沉降和围岩稳定的影响研究[J]. 公路工程, 2019, 44(4): 22–29. (BAO Xian-kai, YANG Dong-wei, DUAN Dong-ming, et al. Influence of construction methods on surface subsidence and surrounding rock stability of shallow buried soft rock with small-distance tunnel[J]. Highway Engineering, 2019, 44(4): 22–29. (in Chinese))
- [10] 王洁, 郑玉元. 素填土地基  $f_a$  的确定[J]. 地下水, 2012, 34(5): 129–130, 132. (WANG Jie, ZHENG Yu-yuan. Determination of  $f_a$  for land reclamation[J]. Ground Water, 2012, 34(5): 129–130, 132. (in Chinese))
- [11] 贾剑青, 刘杰, 赖远明, 等. 高压旋喷桩复合地基承载力研究[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(6): 1–7. (JIA Jian-qing, LIU Jie, LAI Yuan-ming, et al. Bearing capacity of composite foundation of high pressure jet grouting pile[J]. China Railway Science, 2018, 39(6): 1–7. (in Chinese))
- [12] 中交一公局集团有限公司. JTG/T3660—2020, 公路隧道施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020. (CCCC First Highway Engineering Group Co., Ltd. JTG/T3660—2020, Technical specification for construction of highway tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2020. (in Chinese))