

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202209262024101998

文章编号: 1674-599X(2024)05-0099-10

引用格式: 李如坚, 刘辉, 邓小钊, 等. 连拱隧道双向施工力学行为特征研究[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(5): 99-108.

Citation: LI Rujian, LIU Hui, DENG Xiaozhao, et al. Characteristics of mechanical behavior of two-way construction of multi-arch tunnel[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2024, 40(5): 99-108.

## 连拱隧道双向施工力学行为特征研究

李如坚<sup>1</sup>, 刘辉<sup>1</sup>, 邓小钊<sup>2</sup>, 陈沅江<sup>3</sup>

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙拓正交通科技有限公司, 湖南 长沙 410008;  
3. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘 要:** 为研究连拱隧道双向单洞开挖施工过程中的力学行为特征, 以湖南省安慈高速雷家台连拱隧道为研究对象, 采用有限元软件Midas GTS/NX建立三维数值模型, 模拟连拱隧道双向单洞开挖过程与传统工况下的单向双洞开挖过程, 对比分析连拱隧道中隔墙的应力应变、隧道围岩压力及围岩位移。研究结果表明: 双向单洞开挖工期约为单向双洞开挖工期的2/3; 双向单洞开挖与传统工法的单向双洞开挖所产生的隧道围岩压力和围岩位移在数值上相差不大; 施工结束后, 两种施工方案的中隔墙应力大小相差无几, 但在施工过程中, 双向单洞开挖时中隔墙会产生扭矩力, 应对中隔墙抗扭做出相应的有效支护; 双向单洞开挖时中隔墙的两端均出现向开挖段横向偏移的情况, 在后续中隔墙的优化中应着重考虑。

**关键词:** 连拱隧道; 双向施工; 中隔墙; 数值模拟

中图分类号: U451

文献标志码: A

## Characteristics of mechanical behavior of two-way construction of multi-arch tunnel

LI Rujian<sup>1</sup>, LIU Hui<sup>1</sup>, DENG Xiaozhao<sup>2</sup>, CHEN Yuanjiang<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;  
2. Changsha Tuo Zheng Transportation Technology Co., Ltd., Changsha 410008, China;  
3. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** To study the characteristics of mechanical behavior of the multi-arch tunnel in the process of two-way single-hole excavation, the Leijiatai multi-arch tunnel of Anxiang-Cili Expressway in Hunan Province is taken as the engineering background. A three-dimensional numerical model is established by using the finite element software Midas GTS/NX. The stress and strain of the middle partition wall, surrounding rock pressure, and surrounding rock displacement are analyzed by comparing the actual two-way single-hole excavation process with the traditional one-way double-hole excavation process. The results show that the construction period of two-way single-hole excavation is about 2/3 times that of normal excavation. The two-way single-hole excavation scheme and the normal excavation scheme do not produce largely different surrounding rock pressure and surrounding rock displacement in values. After the construction, the stress of the middle partition wall in the two schemes is almost the same. However, during the construction process, the two-way single-hole excavation causes torque

收稿日期: 2022-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979293)

通信作者: 刘辉(1963—), 男, 副教授, 主要从事公路与隧道工程方面的研究工作。E-mail: 691183683@qq.com

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

force in the middle partition wall. Thus, corresponding effective support should be made for the torsion resistance in the two-way single-hole excavation scheme. In the two-way single-hole excavation, both ends of the middle partition wall have lateral offset to the excavated section, which should be considered in the design optimization of middle partition wall in the future.

**Key words:** multi-arch tunnel; two-way construction; middle partition wall; numerical simulation

连拱隧道相较于其他类型的隧道有着轴线间距小、占地少、洞口位置选择及洞外连接线的自由度大、综合造价相对较低等优势<sup>[1]</sup>,在我国得到了广泛的应用。因围岩条件、施工顺序等存在差异,连拱隧道施工分为很多种工法,但施工方向均为由隧道一端向其另一端。在如今隧道开挖基数多且环境复杂的情况下,双向单洞施工为隧道开挖提供了一个新的施工方案。

彭定超等<sup>[2]</sup>针对连拱隧道的单向和双向施工进行了专题讨论,提出了中隔墙受力状态的一般规律。林刚等<sup>[3]</sup>进行了室内模型试验,研究不同的围岩等级和不同的施工方法下连拱隧道的力学特性。胡庆安等<sup>[4]</sup>、夏永旭等<sup>[5]</sup>采用数值模拟研究了双连拱隧道左、右洞施工过程中的相互影响、中隔墙变形与控制等问题,提出了两洞施工时开挖面应当保持的安全间距及中隔墙的变形控制等建议。徐波等<sup>[6]</sup>针对中洞法连拱隧道暗挖施工的稳定性问题,分析了隧道各项指标的动态响应特征,总结出不同参数下隧道变形规律。DO等<sup>[7]</sup>使用有限元软件FLAC<sup>3D</sup>研究软土地基中两个隧道之间的施工影响,得出了隧道中产生的结构抗力和周围地面位移的变化规律。上述研究对隧道开挖的围岩应力和应变、施工工艺、开挖顺序及中隔墙的力学行为分析得比较透彻,但这些研究的方向主要集中于连拱隧道单向双洞开挖上,对双向单洞开挖的相应内容研究较少。另外,作为连拱隧道最重要的受力结构之一,中隔墙是连拱隧道设计和施工的重点,其稳定性直接决定了施工阶段的结构安全和隧道后期运营阶段的安全<sup>[8]</sup>,中隔墙毋庸置疑也应是连拱隧道双向单洞施工研究的重点。

因此,本文以湖南省安慈高速雷家台连拱隧道为研究对象,采用有限元软件Midas GTS/NX模拟连拱隧道双向单洞开挖过程与传统工法的单向双洞开挖过程,对比分析这两种方案的围岩压力、围岩位移及中隔墙的应力应变规律,为类似背景下的隧道工程提供更多的工法参考。

## 1 工程背景

雷家台隧道为连拱隧道,设计长度235 m,最大埋深约54 m。雷家台隧址区域属低山丘陵地貌,地形起伏较大,山体自然坡度 $20^{\circ} \sim 35^{\circ}$ ,植被发育较好。隧道进、出口均位于山前斜坡地带,山坡处于基本稳定状态。两端洞口附近仅有狭窄山路通过,通行条件较差。

雷家台隧道因安慈高速开工后变更路线延误了一年工期;2020年初新冠疫情暴发,且劳务人员多为湖北籍,导致人员筹备用时较多;另外,该隧道所在的石门县是全省“县县通高速”目标实现的最后一个县,安慈高速雷家台连拱隧道通车意义重大。故项目必须在安全的前提下进行工期压缩。为如期完成项目,在进行风险评估及专家评审后,决定采用双向单洞同时开挖工法对隧道进行施工。

隧址区域地层岩性主要为强风化砂质页岩和中风化砂质页岩。围岩等级主要为IV级、V级,其中V级围岩长190 m,占隧道全长的80.9%;IV级围岩长45 m,占隧道全长的19.1%。隧址区域无明显偏压,故隧道的中隔墙采用对称式复合曲中墙,隧道开挖采用交叉中隔墙法(CRD法),隧道纵向开挖顺序如图1所示,隧道断面开挖顺序如图2所示。

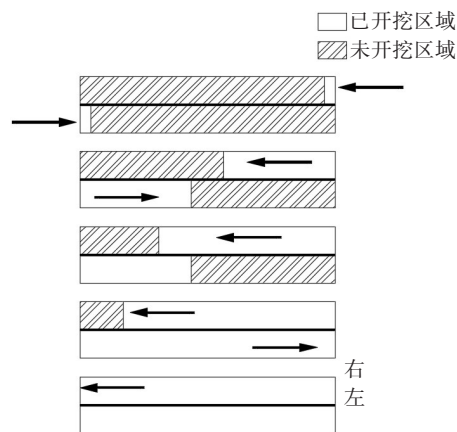


图1 隧道纵向开挖顺序示意图

Fig. 1 Sequence diagram of longitudinal excavation of tunnel

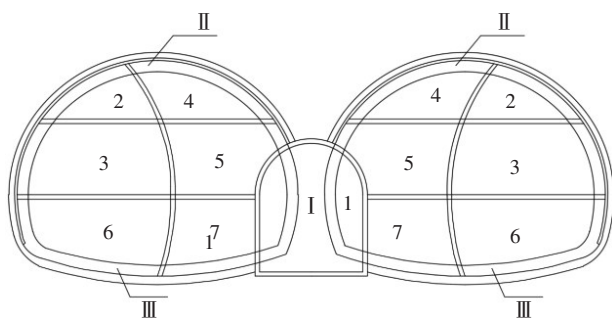


图2 隧道断面开挖顺序示意图

Fig. 2 Schematic diagram of excavation sequence on tunnel section

## 2 连拱隧道中隔墙力学特性

### 2.1 连拱隧道的受力机理

在施工过程中,连拱隧道的受力机理<sup>[9-10]</sup>如图3所示。图3中: $q'_1$ 为中隔墙墙顶附加均布荷载; $q'_2$ 为松散围岩荷载; $q'_3$ 为基本松散荷载; $e_1$ 、 $e_2$ 为外侧隧道水平荷载; $e'_1$ 、 $e'_2$ 为内侧隧道水平荷载。

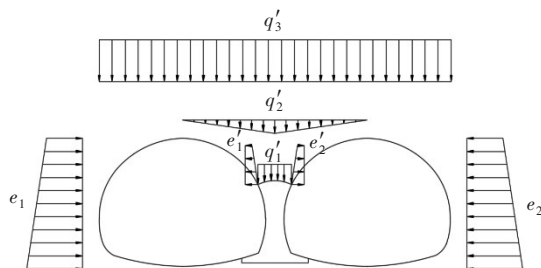


图3 连拱隧道荷载示意图

Fig. 3 Load diagram of multi-arch tunnel

### 2.2 中隔墙受力分析

在一般情况下,连拱隧道在施工过程中,作用于中隔墙上的荷载主要包括竖向均布荷载和开挖间距段后行洞未开挖部分对中隔墙的水平压力。隧道左、右两洞均已开挖段与两洞均未开挖段的中隔墙所受的水平压力对称分布,合力不明显。

采用单向双洞开挖工法施工的情况下,中隔墙所受水平压力如图4所示,图中 $q_1$ 为未开挖部分围岩对中隔墙的水平应力。

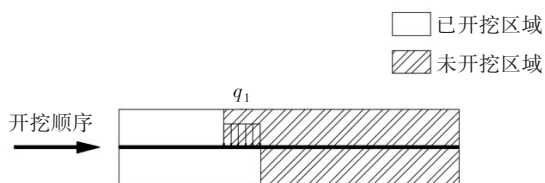


图4 单向双洞开挖间距段受力

Fig. 4 Stress of spacing section of one-way double-hole excavation

采用双向单洞开挖工法施工的情况下,中隔墙受到开挖间距段后行洞未开挖部分的水平压力,且中隔墙两端的压力方向相反,这将使得中隔墙存在扭矩力。中隔墙所受水平压力如图5所示,图中 $q_2$ 、 $q_3$ 分别为对应未开挖段围岩对中隔墙的水平应力。

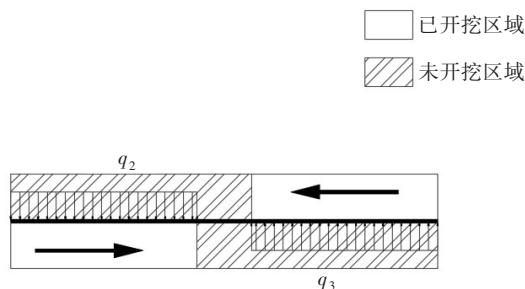


图5 双向单洞开挖间距段受力

Fig. 5 Stress of spacing section of two-way single-hole excavation

## 3 数值模拟

### 3.1 模拟方案

为更加直观地分析双向单洞开挖与单向双洞开挖下连拱隧道的围岩压力、围岩位移及中隔墙的应力与应变情况,本文分别对雷家台连拱隧道进行单向双洞施工与双向单洞施工数值模拟,设置开挖纵向间距为30 m。

### 3.2 有限元模型的建立

根据雷家台连拱隧道的实际情况,采用 Midas GTS/NX 有限元软件对隧道的 K112+640 ~ K112+760 段进行建模。设置模型总宽为120 m、总高为100 m、纵向为120 m。隧道左、右洞最大埋深为54.00 m、隧道净宽为11.77 m、净高为8.80 m、中隔墙墙厚为1.20 m。地层围岩为强、中风化砂质页岩,其中强风化砂质页岩层厚为10.30 m。模型四周边界均设置边界约束。考虑到二次衬砌施作时,隧道的应力应变已基本趋于稳定,故本模型仅考虑隧道的开挖与初期支护,不考虑二次衬砌。模型所采用的材料及其参数见表1。

采用有限元软件对雷家台连拱隧道施工(双向单洞)进行建模,模拟的主要施工过程及步骤为:

- 1) 中导洞一次性开挖120 m,中导洞初期支护120 m;
- 2) 中隔墙一次性浇筑120 m,中隔墙左、右两边喷射混凝土120 m;

表1 应力分析材料信息

Table 1 Information of material for stress analysis

材料类别	本构模型	单元类型	弹性模量/ GPa	泊松比	重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	内聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )
强风化砂质页岩	莫尔-库伦	实体单元	0.506	0.32	23.0	35	23
中风化砂质页岩	莫尔-库伦	实体单元	1.000	0.37	19.0	250	30
中隔墙	线弹性	实体单元	32.500	0.20	25.0		
喷射混凝土	线弹性	板单元	28.000	0.20	25.0		
钢拱架	线弹性	梁单元	210.000	0.25	78.5		
锚杆	线弹性	植入式桁架单元	210.000	0.30	79.0		

3) 中隔墙施作完毕后,左、右两洞从两个方向分别开挖掘进,开挖完毕后进行初期支护,断面内开挖顺序(顺序2~7)如图2所示,每步循环进尺3 m,每个断面全部开挖完毕后拆除临时支撑和临时喷混;

4) 当两洞开挖断面相距30 m时,左洞停止开挖,右洞继续开挖,并加强对左、右两洞的力学行为特征的监测;

5) 当两洞开挖断面再次间距30 m时,左洞、右洞再次同时开挖,直至两洞贯通。

隧道建模效果图如图6所示。



(c) 双向单洞(方案二)局部开挖示意图

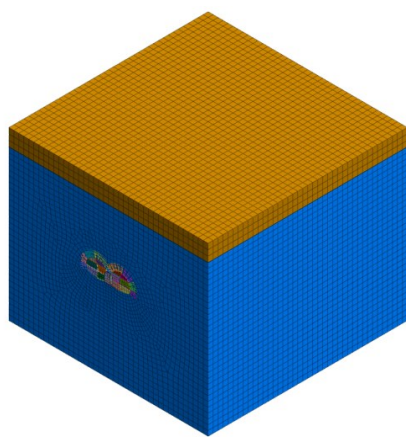
图6 隧道模型效果图

Fig. 6 Overall model rendering of tunnel

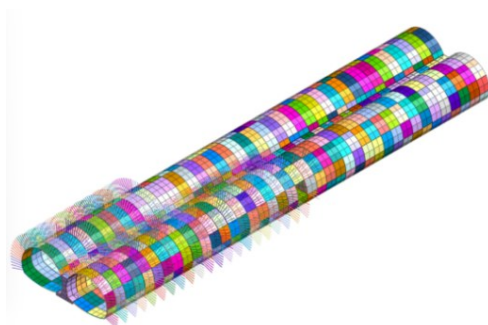
## 4 模拟结果分析

### 4.1 中隔墙位移

由于本文隧道开挖工法的特殊性,设置隧道模型拱顶沉降和水平位移监测断面位于K112+640( $y=0$  m)处。中隔墙位移监测点如图7所示,A、 $C_1$ 和 $C_2$ 点位于 $y=0$  m断面上,B点位于 $y=120$  m断面上。选择A、B点为中隔墙横向位移监测点, $C_1$ 、 $C_2$ 点为竖向位移监测点。



(a) 隧道模型整体效果图



(b) 单向双洞(方案一)局部开挖示意图

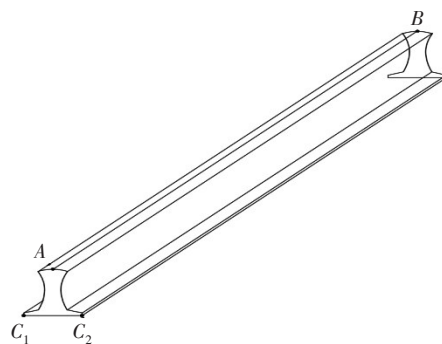


图7 中隔墙位移监测点

Fig. 7 Displacement monitoring points of middle partition wall

#### 4.1.1 中隔墙横向位移

在双向单洞开挖施工中,随施工天数的变化,



中隔墙横向位移监测点A、B的实测横向位移如图9所示,横向位移向左侧偏移为正。

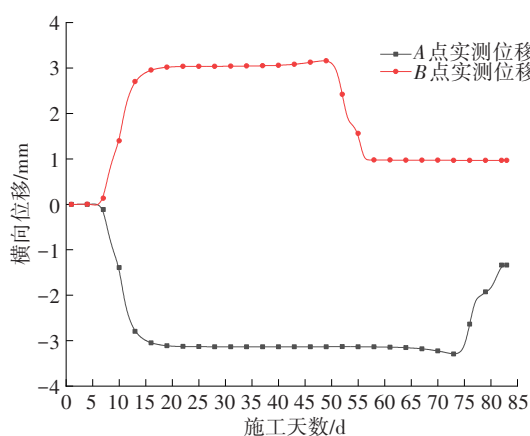


图8 中隔墙横向位移实测值

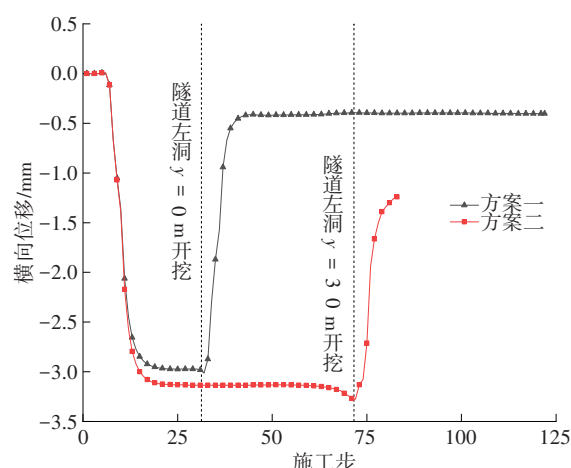
Fig. 8 Measured lateral displacement of middle partition wall

方案一与方案二中,A点、B点及A-B线的横向位移随施工步推进而变化的曲线分别如图9(a)、图9(b)和图9(c)所示。由图9可知,数值模拟结果中A、B点的横向位移与其实测值较为接近;双向单洞开挖(方案二)的施工步数为81步,单向双洞开挖(方案一)的施工步数为122步,双向单洞开挖比单向双洞开挖的施工步数少了41步。因此,在只考虑开挖及初期支护的情况下,双向单洞施工的工期约为单向双洞施工工期的2/3。

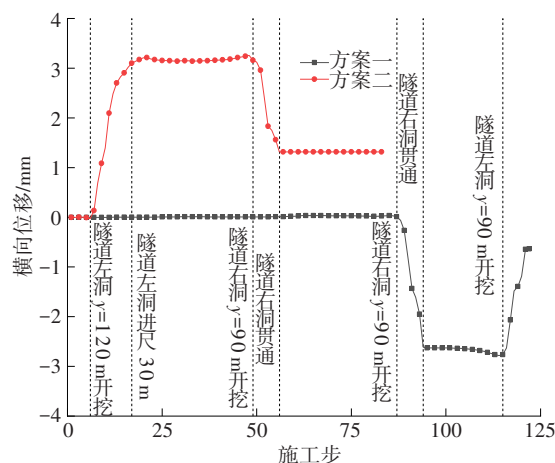
由图9可知,方案二中A点位移和B点位移大小接近、方向相反,导致A-B线横向位移较大,这主要由双向单洞开挖工法所致。

如图9(a)所示,右洞首先开挖,两个方案的A点横向位移随之向右偏移,右洞继续开挖进尺到30 m时,两个方案的A点横向位移趋于稳定。随后,方案一在隧道右洞进尺60 m后开始左洞开挖(施工步32),此时A点横向位移开始向左偏移,在左洞进尺30 m后(施工步44),A点横向位移趋于稳定;方案二中A点的横向位移基本不变,直到左洞开挖至距离左洞洞口30 m时A点开始向左偏移且变化明显。

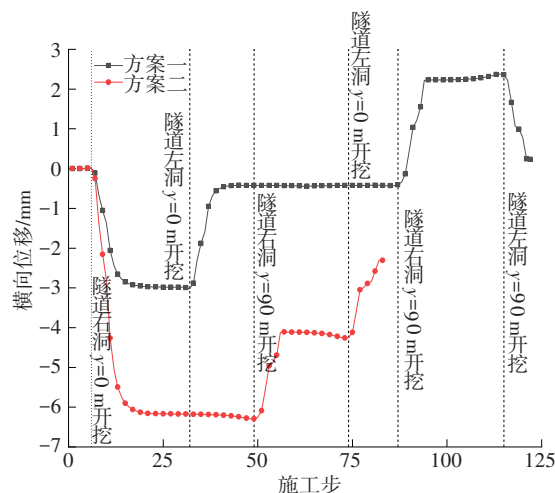
B点的横向位移如图9(b)所示,由于B点所在位置接近尾端洞口,在方案一中右洞开挖至距离尾端洞口断面30 m时(施工步87),B点的横向位移才发生明显偏移。B点先是向右偏移,随后在隧道右洞贯通时(施工步94)趋于稳定,最后随着左洞的开挖(施工步115),B点横向位移向左偏移。由此可以得知,开挖断面距离监测断面30 m以内,B点的横向位移会发生明显变化;开挖断面距离监测断面30 m以上时,对监测断面基本无影响。



(a) A点



(b) B点



(c) A-B线

图9 中隔墙横向位移变化

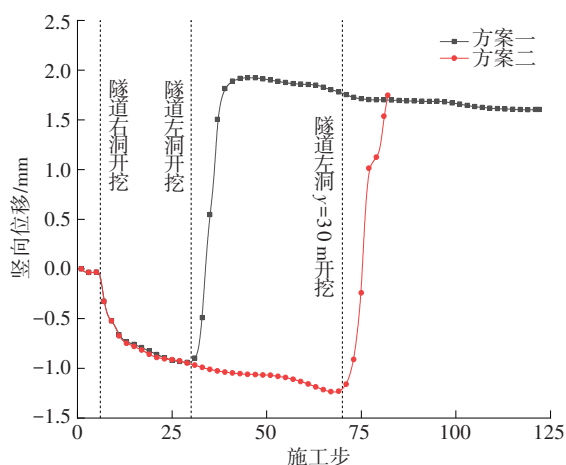
Fig. 9 Lateral displacement change of middle partition wall

由图9(c)可知,方案一的中隔墙所产生的最大横向位移为-2.992 mm,方案二的中隔墙所产生的最大横向位移为-6.293 mm;整条隧道贯通后,方案一的中隔墙的横向位移为0.233 mm,方案二的中隔墙的横向位移为-2.308 mm。结果表明:相较于单

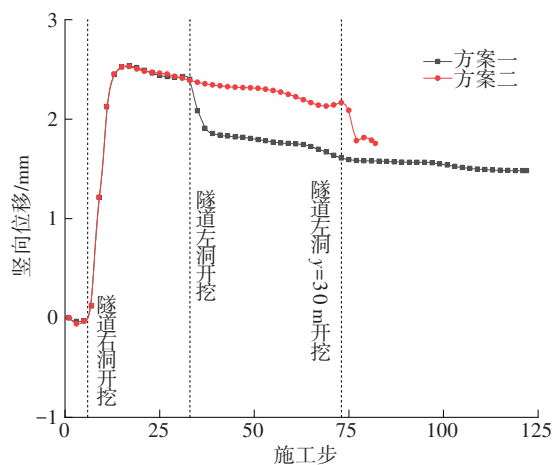
向双洞开挖,双向单洞开挖时中隔墙的位移更大,在施工中必须引起重视,加强对中隔墙的支持。

#### 4.1.2 中隔墙竖向位移

两种方案的中隔墙下墙角  $C_1$  点和  $C_2$  点随施工步的推进所发生的竖向位移变化分别如图 10(a) 和 10(b) 所示。



(a)  $C_1$  点竖向位移



(b)  $C_2$  点竖向位移

图 10 中隔墙竖向位移变化

Fig. 10 Vertical displacement change of middle partition wall

由图 10 可知,方案一中  $C_1$  点的最大竖向位移为 1.920 mm,方案二中  $C_1$  点的最大竖向位移为 1.751 mm;  $C_2$  点的最大竖向位移在两个方案中都为 2.532 mm(施工步 17)。施工结束时,方案一与方案二中  $C_1$  点的最终竖向位移分别为 1.600、1.751 mm,  $C_2$  点的最终竖向位移分别为 1.482、1.750 mm,两种方案的竖向位移值比较接近,说明两种开挖方案对中隔墙的竖向位移的影响差别不大。

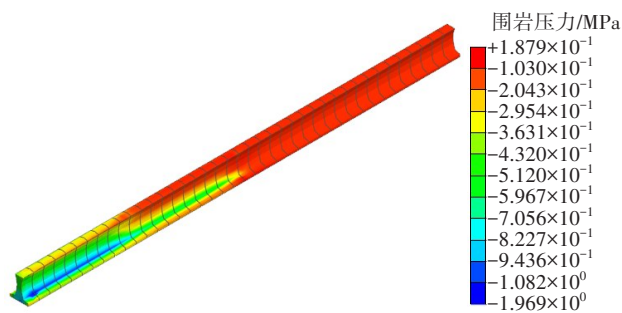
另外,由图 10 可知,在施工结束时,  $C_1$ 、 $C_2$  点的竖向位移方向均为向上,这说明在施工过程中和结

束时中隔墙的墙角存在上拱现象,因此,在施工过程中必须针对这一现象及时对墙角进行支护。

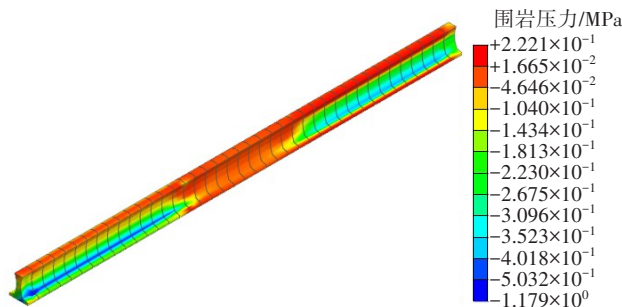
#### 4.2 中隔墙的应力

由于连拱隧道两洞的开挖间距为 30 m,在整个单向双洞开挖过程中,左、右洞的间距不会小于 30 m。为了更好地表现出中隔墙的应力情况,在方案一中选择左洞进尺 30 m、右洞进尺 60 m 时隧道的施工状态来分析单向双洞开挖过程中的中隔墙的应力,中隔墙应力云图如图 11(a) 所示。

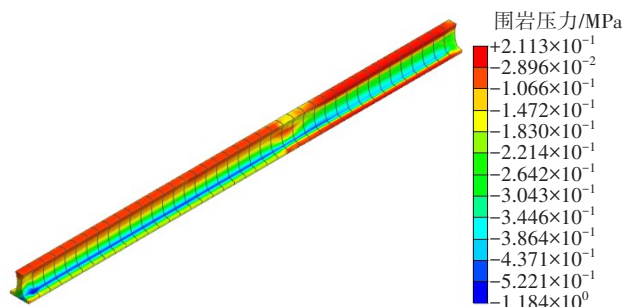
在方案二中,随着两开挖断面的不断接近,中隔墙的受力越来越大,选择左、右洞开挖断面相距 30 m 时和左、右洞开挖断面在同一平面上时这两种状态来分析双向单洞开挖过程中中隔墙的应力,中隔墙应力云图如图 11(b)、11(c) 所示。两种方案施工结束时中隔墙的应力云图如图 12 所示。



(a) 左洞进尺 30 m、右洞进尺 60 m(方案一)



(b) 左、右两洞开挖断面相距 30 m(方案二)



(c) 左、右洞开挖断面在同一平面上(方案二)

图 11 施工时中隔墙应力云图

Fig. 11 Stress cloud of middle partition wall during construction process

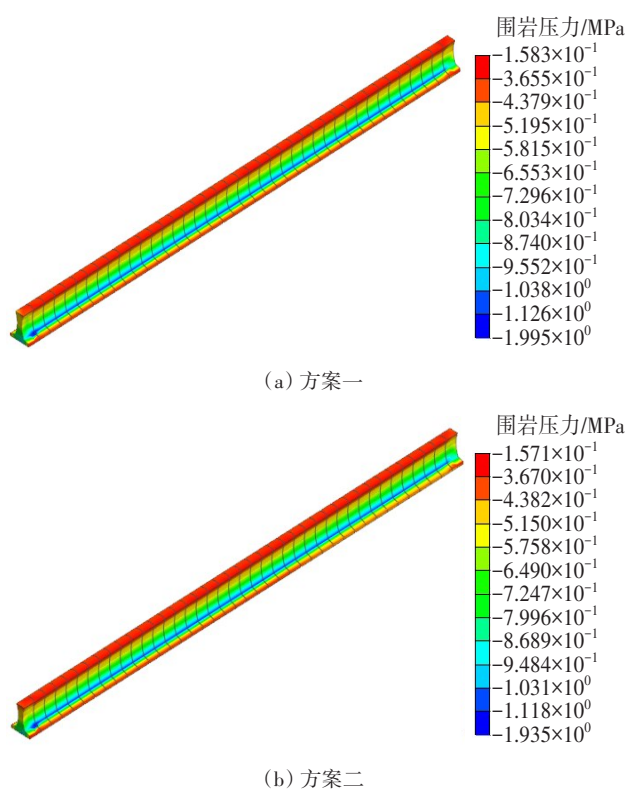


图12 施工结束时中隔墙应力云图

Fig. 12 Stress cloud of middle partition wall at the end of construction

由图11可知,在开挖过程中,两种方案的中隔墙由于受到未开挖部分的水平压力的作用,中隔墙的墙角出现了应力集中。在方案一中,当左洞进尺30 m、右洞进尺60 m时,中隔墙墙角最大应力为1.969 MPa。在方案二中,当左、右两洞开挖至间距30 m时,中隔墙墙角最大应力为1.179 MPa,但是在两端处应力方向相反,此时中隔墙的扭矩力为2.500 MPa,故需关注中隔墙的纵向扭动情况,同时加强应力应变监测,不断优化中隔墙方案;当左、右两洞开挖至间距30 m时,左洞保持不动,右洞继续开挖,随着左、右洞两断面的不断接近,中隔墙的扭动也越来越大,在断面重合处扭矩力大小为2.921 MPa,因此在此过程中应着重加强和优化中隔墙的抗扭能力。

由图12可知,随着隧道贯通,中隔墙的应力集中出现在了墙脚和拱顶。方案一与方案二的中隔墙墙角最大应力分别为1.995、1.935 MPa,两个方案的应力集中位置基本一致,应力大小相差无几。

#### 4.3 围岩应力

方案一、方案二两种开挖方案下的最终围岩主应力云图分别如图13(a)、13(b)所示。

由图13可知,方案一中左、右洞拱顶围岩主应力分别为0.246、0.294 MPa;左、右墙角的围岩主应力分别为0.635、0.695 MPa;左、右洞仰拱处围岩主应力分别为0.143、0.137 MPa。方案二中左、右洞拱顶围岩主应力分别为0.318、0.289 MPa,对比方案一,分别增大了0.072 MPa和减小了0.005 MPa;左、右墙角的围岩主应力分别为0.419、0.487 MPa,对比方案一,分别减小了0.216 MPa和0.208 MPa;左、右洞仰拱处围岩主应力分别为0.151、0.128 MPa,对比方案一,分别增大了0.008 MPa和减小了0.009 MPa。

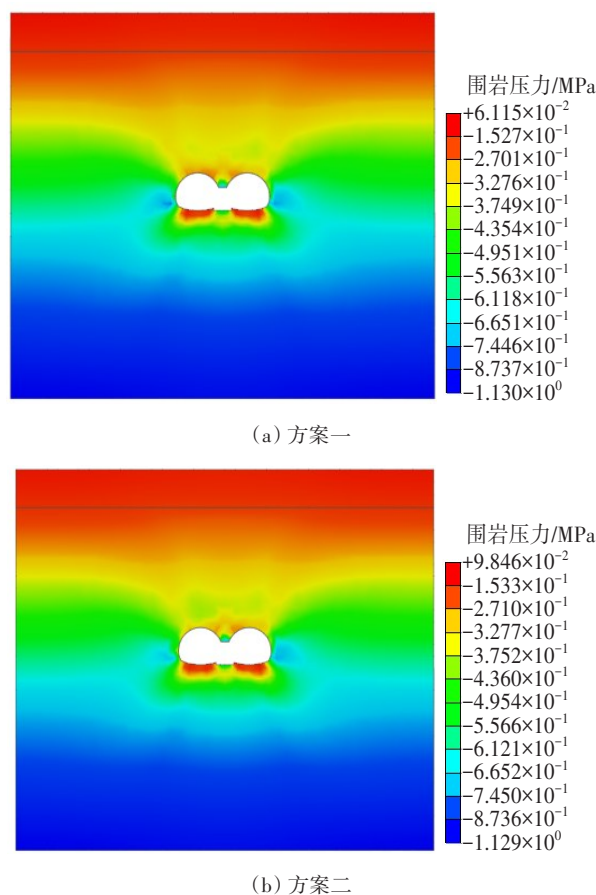


图13 两种方案最终主应力云图

Fig. 13 Final main stress clouds of two schemes

图13及以上数据表明:两种方案的隧道围岩主应力分布区域和大小相差不大。相较于方案一,方案二的左、右墙角的围岩主应力更小,更有利于隧道稳定。

#### 4.4 围岩位移

在隧道模型监测断面( $y=0$  m)上,选取拱顶D点和该点左右各2.5 m处的E、F点为拱顶沉降监测点,选取边墙I-J线和拱脚G-H线进行水平收敛监测,隧道拱顶沉降和水平收敛监测点布置如图14所示。

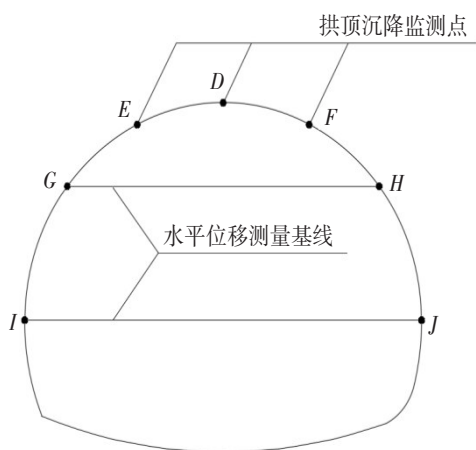


图14 监测点布置图

Fig. 14 Layout of monitoring points

## 4.4.1 拱顶沉降

图15为实际工程中K112+640( $y=0$  m)断面处左、右两洞拱顶的实测沉降曲线。

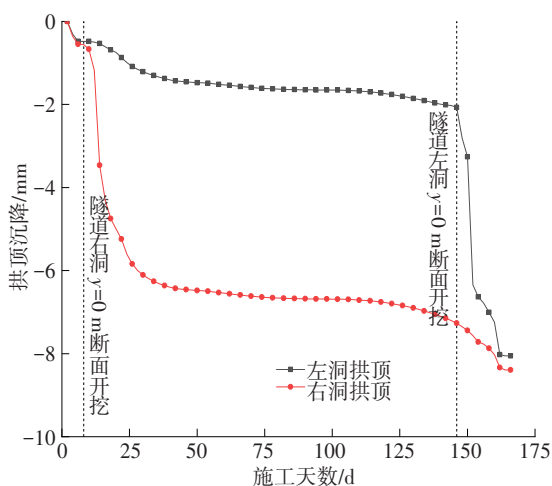
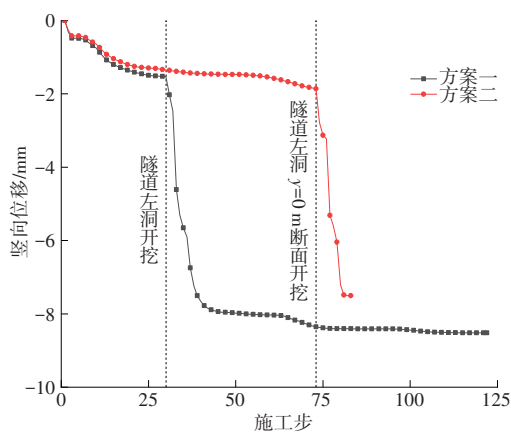


图15 K112+640断面拱顶实测沉降曲线

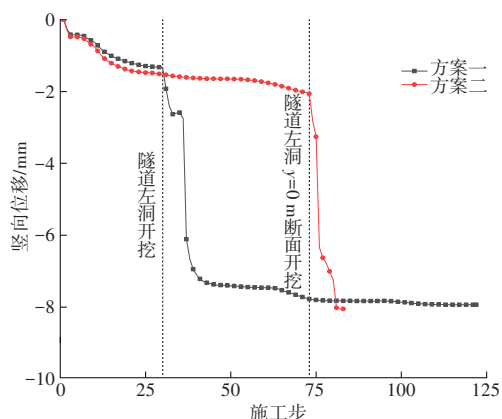
Fig. 15 Measured vault settlement curves of K112 + 640 section

两种开挖方案下左、右洞拱顶的沉降变化如图16所示。由图16可知,两种方案的隧道右洞拱顶沉降相差无几,右洞拱顶各监测点在隧道左洞开挖时数据有明显变化。

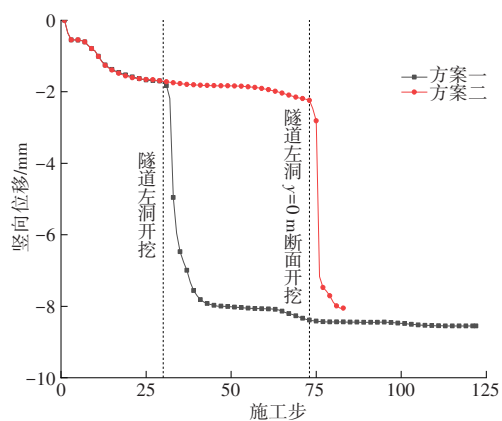
隧道拱顶各监测点累积沉降值见表2,比较两种方案下左、右洞各监测点的沉降值,左洞F点在两种方案下沉降值相差最大,差值为0.499 mm;右洞D点在两种方案下沉降值相差最小,差值为0.005 mm。模拟结果表明,双向单洞开挖方案相较于传统的单向双洞开挖方案,隧道拱顶沉降变化不大,在工程工期非常紧迫的情况下,双向单洞开挖方案显然更为合理。



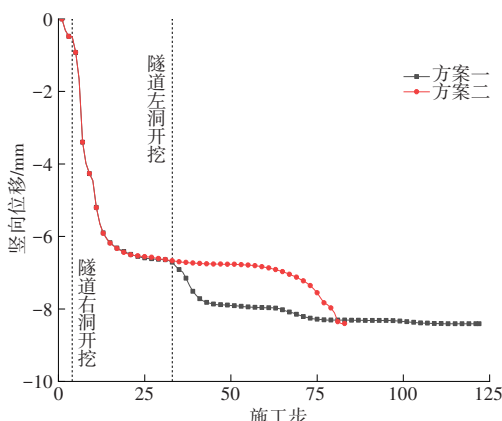
(a) 左洞D点



(b) 左洞E点

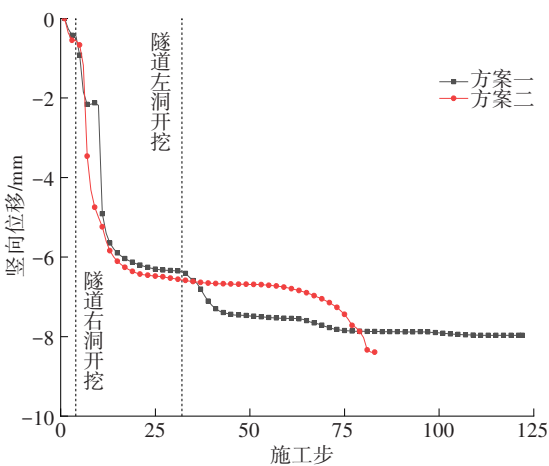


(c) 左洞F点

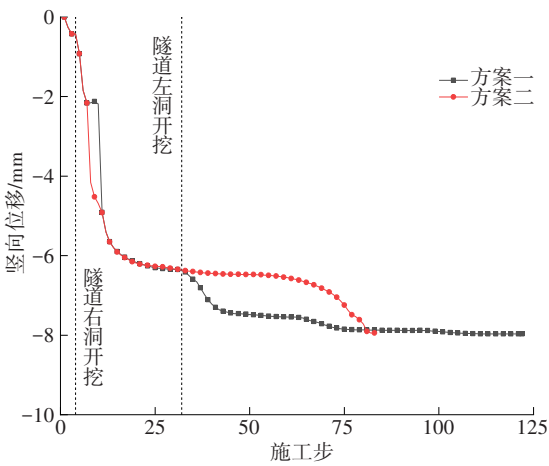


(d) 右洞D点





(e) 右洞E点



(f) 右洞F点

图 16 隧道拱顶沉降变化

Fig. 16 Variation of tunnel vault settlement

表 2 隧道拱顶各点累积沉降值

Table 2 Cumulative settlement value of each point of tunnel vault

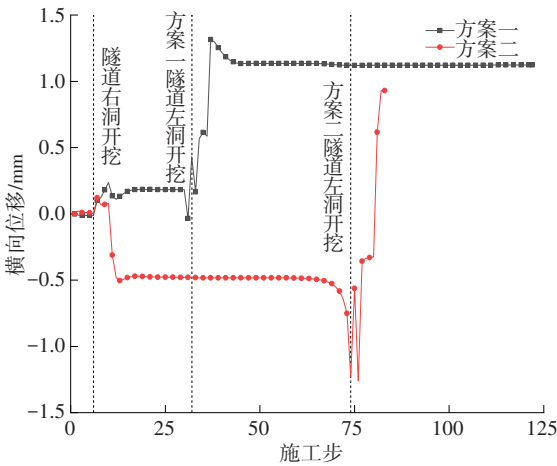
开挖方案	累积沉降值/mm					
	左洞			右洞		
	D点	E点	F点	D点	E点	F点
方案一	8.515	7.935	8.550	8.407	7.967	7.967
方案二	8.503	8.055	8.051	8.402	8.390	7.943

4.4.2 水平收敛

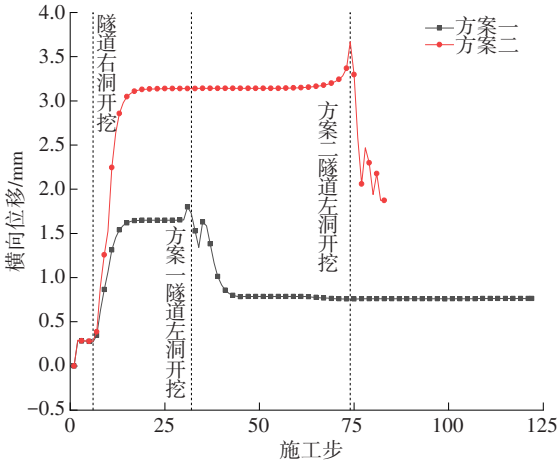
为更加清晰地对比分析两种方案下隧道左、右洞的水平收敛情况,分别计算了两种方案下左、右洞的水平位移测量基线的水平位移,其水平位移随施工步的推进而变化的情况如图 17 所示,累积水平位移见表 3。

由图 17 和表 3 综合分析可知,两种方案下左、右两洞的水平收敛情况在开挖初期规律一致;在右洞开挖时,方案二的 G-H 测线和 I-J 测线的横向位移

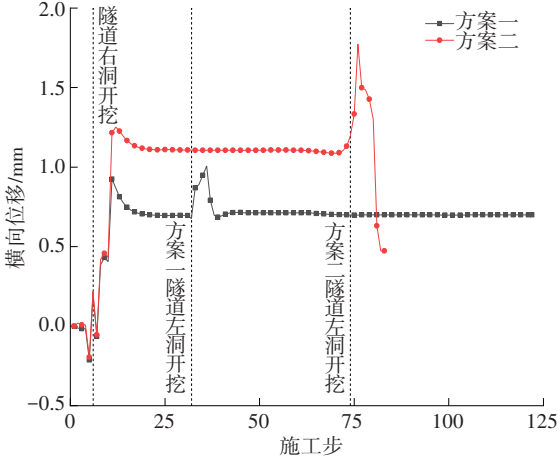
绝对值均大于方案一的相应测线的横向位移绝对值,表明双向开挖产生的水平收敛大于单向开挖所产生的水平收敛;相比于单向开挖方案,双向开挖方案对上半洞室的影响较小,对下半洞室的影响较大。若实际工程的工期比较紧,在优先采用方案二进行施工时,应加强对下半洞室的监测,确保监测中各数值无异常。



(a) 左洞 G-H 测线



(b) 左洞 I-J 测线



(c) 右洞 G-H 测线

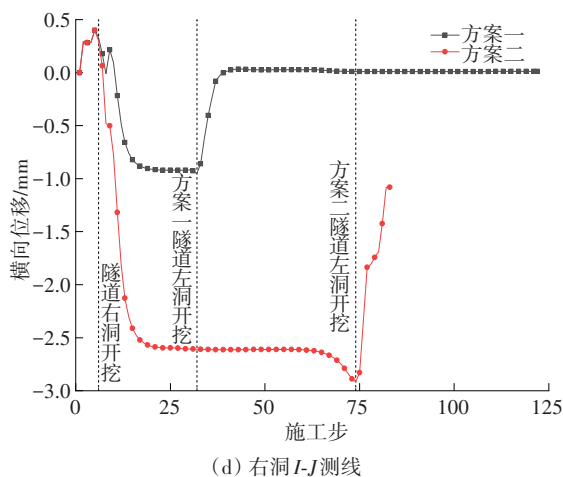


图17 隧道水平收敛曲线对比图

Fig. 17 Comparison of the horizontal convergence curves of tunnel

表3 隧道累积水平收敛值

Table 3 Cumulative horizontal convergence values of tunnel

开挖方案	累积收敛值/mm			
	左洞		右洞	
	G-H测线	I-J测线	G-H测线	I-J测线
方案一	1.123	0.763	0.700	0.012
方案二	0.929	1.874	0.473	-1.081

## 5 结论

本文以湖南省安慈高速雷家台连拱隧道为研究对象,采用有限元软件Midas GTS/NX建立三维数值模型,对比双向单洞方案和单向双洞方案在开挖过程中及施工结束后中隔墙的力学行为特征,分析围岩压力与围岩位移,得出以下结论:

1) 在双向单洞开挖施工过程中,左、右洞分两个方向同时进行,工期约为单向双洞施工工期的2/3,为工期紧张的工况提供了一种新的施工技术方案。

2) 双向单洞开挖方案与传统单向双洞开挖方案相比,两种方案产生的隧道围岩压力与围岩位移相差不大,双向单洞开挖方案可采用与传统单向双洞开挖方案相同的措施进行支护。

3) 施工结束后,两种方案的中隔墙在应力方面的大小相差无几,但在施工过程中,双向单洞开挖方案的中隔墙会产生扭矩力,应对双向单洞开挖过程中的中隔墙扭动做出相应的有效支护。

4) 在施工过程中,双向单洞开挖方案的中隔墙横向位移与单向双洞方案的相差较大,中隔墙两端均有向已开挖段偏移的情况,在后续的改进中,应

着重考虑中隔墙的优化。

## 参考文献(References):

- [1] 李志厚, 雷华, 陈树汪, 等. 云南省公路连拱隧道的技术进步[J]. 公路, 2008, 53(5): 220-226. DOI: 10.3969/j.issn.1672-741X.2007.z2.045.  
LI Zhihou, LEI Hua, CHEN Shuwang, et al. Technical progress of highway multi-arch tunnels in Yunnan Province[J]. Highway, 2008, 53(5): 220-226. DOI: 10.3969/j.issn.1672-741X.2007.z2.045.
- [2] 彭定超, 袁勇, 章勇武. 开挖施工方式对连拱隧道中墙影响的空间分析[J]. 现代隧道技术, 2002, 39(1): 47-53. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2002.01.014.  
PENG Dingchao, YUAN Yong, ZHANG Yongwu. Spatial effects on mid-partition due to excavation of adouble-arched tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2002, 39(1): 47-53. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2002.01.014.
- [3] 林刚, 何川. 连拱公路隧道施工方法模型试验研究[J]. 现代隧道技术, 2003, 40(6): 1-6. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2003.06.001.  
LIN Gang, HE Chuan. Study on the reasonable construction method for a double-arch road tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2003, 40(6): 1-6. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2003.06.001.
- [4] 胡庆安, 夏永旭, 王文正. 双连拱隧道施工过程的三维数值模拟[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2005, 25(1): 48-50, 76. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2005.01.012.  
HU Qingan, XIA Yongxu, WANG Wenzheng. 3D numerical simulation on double-arch tunnel's construction process[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2005, 25(1): 48-50, 76. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2005.01.012.
- [5] 夏永旭, 王文正, 胡庆安. 围岩应力释放率对双联拱隧道施工影响研究[J]. 现代隧道技术, 2005, 42(3): 1-4. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2005.03.001.  
XIA Yongxu, WANG Wenzheng, HU Qingan. A study on the effect of the rate of stress relieving of surrounding-rocks on the construction of a double arch tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2005, 42(3): 1-4. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2005.03.001.
- [6] 徐波, 杨旺兴, 李加加, 等. 中洞法连拱隧道施工稳定性分析及优化[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(2): 812-820. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2022.02.049.  
XU Bo, YANG Wangxing, LI Jiajia, et al. Stability analysis and optimization of double-arch tunnel constructed by center drift method [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(2): 812-820. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2022.02.049.
- [7] DO N A, DIAS D, ORESTE P, et al. Three-dimensional numerical simulation of a mechanized twin (下转第119页)

- Engineering, 2019, 2019: 7520549. DOI: 10.1155/2019/7520549.
- [18] TAN K H, SAHA M K. Cracking characteristics of RC beams strengthened with FRP system [J]. Journal of Composites for Construction, 2008, 12 (5): 513-521. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12: 5(513).
- [19] WANG W W, LI G. Experimental study and analysis of RC beams strengthened with CFRP laminates under sustaining load [J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43 (6): 1372-1387. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2005.03.076.
- [20] SHENG J, YIN S P, YUE J H, et al. Bending performance of ECC-RC composite beam reinforced with textile [J]. Construction and Building Materials, 2021, 287: 123079. DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2021. 123079.
- [21] SUN X J, GAO Z, CAO P, et al. Mechanical properties tests and multiscale numerical simulations for basalt fiber reinforced concrete [J]. Construction and Building Materials, 2019, 202: 58-72. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.018.
- [22] 关宏信, 于凯辉, 徐英杰, 等. 不同纤维及沥青复合改性BK-10混合料路用性能[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20 (5): 76-83. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20220401003.
- GUAN Hongxin, YU Kaihui, XU Yingjie, et al. Pavement performance of BK-10 mixtures modified with different fibers and asphalts [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2023, 20 (5): 76-83. DOI: 10.19951/j.cnki. 1672-9331.20220401003.
- [23] 曹宇, 何赏璐, 陈新. 面向人车路环境的视频检测技术应用研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(3): 98-109. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20210907003.
- CAO Yu, HE Shanglu, CHEN Xin. Human-vehicle-road-environment-oriented study on the application of video detection technology [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39(3): 98-109. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20210907003.
- [24] 刘龙武, 龚德峰, 李俊, 等. 基于静态图像法的镍铁渣粒度分析及剪切试验[J]. 交通科学与工程, 2020, 36 (2): 1-6. DOI: 10.16544/j.cnki. cn43-1494/u. 2020. 02.001.
- LIU Longwu, GONG Defeng, LI Jun, et al. Particle size analysis and shear test of ferronickel slag based on the static image method [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36 (2): 1-6. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.02.001.

(责任编辑:熊怡)

(上接第108页)

- tunnels in soft ground [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 42: 40-51. DOI: 10.1016/j.tust.2014.02.001.
- [8] 张妞, 刘辉, 刘昶, 等. 非对称连拱隧道非对称中隔墙施工力学行为研究[J]. 公路, 2022, 67(3): 343-349. ZHANG Niu, LIU Hui, LIU Chang, et al. Research on mechanical behavior of asymmetric middle wall in asymmetric multi-arch tunnels [J]. Highway, 2022, 67 (3): 343-349.
- [9] 李鸿博, 郭小红. 公路连拱隧道土压力荷载的计算方法研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3429-3434. DOI: 10.16285/j.rsm.2009.11.012.
- LI Hongbo, GUO Xiaohong. Research on calculation methods of earth pressure on multi-arch tunnel for highway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3429-3434. DOI: 10.16285/j.rsm.2009.11.012.
- [10] 刘昶, 刘辉, 邓小钊, 等. 偏压连拱隧道非对称中隔墙施工力学特性研究[J]. 交通科学与工程, 2021, 37 (3): 50-57, 77. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2021.03.008.
- LIU Chang, LIU Hui, DENG Xiaozhao, et al. Study on construction mechanical characteristics of unsymmetrical middle wall in biased double-arch tunnel [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(3): 50-57, 77. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2021.03.008.

(责任编辑:熊怡)