

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021081523081997

文章编号:1674-599X(2023)04-0088-10

引用格式:张妞,刘昶,刘辉,软弱围岩浅埋偏压连拱隧道施工方案优化研究[J].交通科学与工程,2023,39(4):88-97.

Citation: ZHANG Niu, LIU Chang, LIU Hui, et al. Study on construction scheme optimization of shallow buried eccentric pressure multi-arch tunnel in weak surrounding rock[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(4): 88-97.

## 软弱围岩浅埋偏压连拱隧道施工方案优化研究

张妞<sup>1,2</sup>, 刘昶<sup>3</sup>, 刘辉<sup>1</sup>

- (1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114;
2. 华油惠博普科技股份有限公司, 湖南 长沙 410114;
3. 深圳宏业基岩土科技股份有限公司, 广东 深圳 518057)

**摘 要:** 针对软弱围岩浅埋偏压隧道围岩的稳定性和开挖方案选取问题,以湖南省安慈高速公路的樟树垭连拱隧道为工程背景,采用Midas GTS NX有限元软件,分别对其采用中导洞-单侧导坑法和三导洞法的施工过程进行数值模拟,分析和对比在这两种开挖方案下围岩应力与变形、支护结构应力及中隔壁应力的分布情况。研究表明:这两种开挖方案均能满足施工的安全要求。综合该隧道的实际情况,三导洞法能较好地控制隧道的拱顶沉降变形;采用中导洞-单侧导坑法进行开挖的围岩应力情况则更好,该法不仅能更好地保证隧道收敛,还能更有效地减少在浅埋侧开挖过程中深埋侧中隔壁墙腰开裂现象的发生,且其浅埋侧无需内支撑施工,可加速支护结构闭合,加快施工进度。因此,中导洞-单侧导坑法是更适合该隧道的施工方案。该研究结果可为其他类似工程提供参考。

**关键词:** 地层偏压;连拱隧道;开挖方案;数值模拟

中图分类号:U451

文献标志码:A

## Study on construction scheme optimization of shallow buried eccentric pressure multi-arch tunnel in weak surrounding rock

ZHANG Niu<sup>1,2</sup>, LIU Chang<sup>3</sup>, LIU Hui<sup>1</sup>

- (1.College of Civil Engineering, Changsha University of Sciences & Technology, Changsha 410114, China;
- 2.China Oil HBP Group, Changsha 410114, China;
3. Shenzhen Hongyeji Geotechnical Science & Technology Co., Ltd., Shenzhen 518057, China)

**Abstract:** Aiming at the stability of surrounding rock and the selection of excavation scheme of shallow buried eccentric pressure tunnel in soft surrounding rock, Midas GTS NX was used to numerically simulate the construction process of Zhangshuya tunnel of Hunan Anci Expressway by middle pilot tunnel single side pilot tunnel method and three pilot tunnel method respectively. The stress and deformation of surrounding rock, the stress distribution of supporting structure and the stress of middle partition wall under different excavation schemes are analyzed. The results show that the two excavation schemes can meet the construction safety requirements. According to the actual situation of the tunnel, although the three pilot tunnel method can better control the settlement and deformation of the tunnel vault, the middle pilot tunnel single side pilot pit method is suitable for the construction scheme and its surrounding rock stress is excellent, which can better ensure the tunnel convergence and can effectively reduce the cracking of the middle partition wall waist on the deep buried side during the excavation of the shallow buried side. Moreover, the shallow buried side does not need internal support, which can accelerate the closure of the support structure and speed up the construction progress. Therefore, the method of middle guide tunnel and single side guide tunnel is a more suitable construction scheme for the tunnel. The research results can provide reference for other similar projects.

收稿日期:2021-08-15

作者简介:张妞(1997—),女,长沙理工大学硕士生。

**Key words:** geological eccentric compression; double-arch tunnel; excavation scheme; numerical simulation

目前,中国高速公路主干网的建设正处于网络化的关键阶段<sup>[1]</sup>。在高速公路的建设中,工程将不可避免地遇到复杂地形,需建立隧道。连拱隧道因接线方便、线形流畅、可避免路基分幅等优点,成为常用的隧道类型之一。但连拱隧道施工工序复杂、对施工技术要求高。且当存在地形偏压时,连拱隧道的空间效应明显,地层应力变化与其衬砌结构的荷载转换十分复杂。因此,在偏压地形下,连拱隧道施工方案逐渐成为研究人员关注的重点。

许多学者对偏压连拱隧道进行了研究。但多数学者的研究集中在偏压隧道在施工过程中围岩、中隔墙、支护结构的受力变形等方面,以期得到偏压隧道主洞的合理开挖顺序、施工方案及中隔墙形式<sup>[2-9]</sup>。耿招等<sup>[10]</sup>采用FLAC<sup>3D</sup>软件对双侧壁导洞法和三台阶法的开挖过程进行了数值模拟,并将模拟结果与监测数据进行了分析和对比,发现相对于三台阶法,双侧壁导洞法能更有效地降低偏压荷载对隧道围岩造成的不利影响。王道远等<sup>[11]</sup>通过数值建模,比较了多种浅埋软弱围岩隧道施工方案在控制围岩变形和支护受力方面的优劣,并对三台阶七步法提出了在控制好稳定性基础上的快速进洞方案。贾永刚等<sup>[12]</sup>分别对采用两导洞法和三导洞法进行施工的隧道的洞周位移、初期支护内力及其安全系数进行了分析,发现两导洞法在工期和经济指标上表现更好,三导洞法则在安全性上表现更佳。这些研究主要对双侧壁导洞法、三台阶法、三台阶七步法、两导洞法等施工方案进行了研究和对比。鲜有研究提出在浅埋偏压软弱地层下,既能加快施工进度,又能降低施工成本的新开挖方案。

本研究以湖南省安慈高速樟树垭连拱隧道为工程背景,该隧道采用中导洞-台阶法和三导洞法进行施工。针对该隧道浅埋偏压的特殊地形情况,本文创新性地提出了中导洞-单侧导坑法,并采用有限元软件Midas GTS NX软件,分析和对比在中导洞-单侧导坑法和三导洞法两种开挖方案下,中隧道围岩的变形与支护结构的应力变化规律,以期在偏压地形下的连拱隧道的开挖提供参考。

## 1 工程背景与软弱围岩开挖方案

### 1.1 工程背景

本研究以隶属于湖南省安乡至慈利高速公路土建第8合同段的樟树垭连拱隧道为研究背景。该隧道全长为220 m,埋深最深处为53 m。该隧道位于低山丘陵,地形起伏较大,山体自然坡度 $20^{\circ} \sim 35^{\circ}$ ,地层主要为强风化和中风化砂质页岩,围岩分级为IV、V级围岩,其中V级围岩约占全部隧道的71.8%。

### 1.2 软弱围岩开挖方案

按照围岩等级,湖南省安慈高速公路樟树垭隧道的开挖方案可分为两种,V级围岩段采用三导洞法施工,如图1所示,施工顺序为1-Ⅱ-3-4-5-6-7-Ⅷ-Ⅸ-10-11-12-13-14-XV-XVI;IV级围岩段采用中导洞-台阶法施工,如图2所示,施工顺序为1-Ⅱ-3-4-5-VI-VII-8-9-10-XI-XII。在图1~2中,阿拉伯数字代表各部分开挖和初期支护,罗马数字代表二次衬砌和中隔墙施工。在偏压连拱隧道中,先开挖隧洞的衬砌产生支护作用,该作用可有效减低偏压施加在浅埋侧的不利影响。因此,采用先浅后深的施工顺序。在施工过程中,常采用中导洞先行、中隔墙紧跟、主洞开挖随后的施工方法。

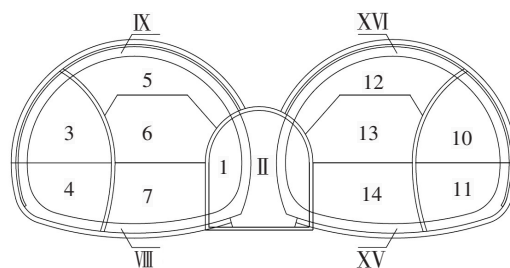


图1 隧道V级围岩段施工步骤

Fig. 1 Schematic diagram of construction steps of tunnel grade V surrounding rock section

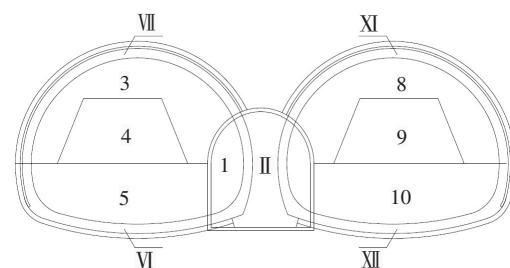


图2 隧道IV级围岩段施工步骤

Fig. 2 Schematic diagram of construction steps of tunnel grade IV surrounding rock section

## 2 优化方案确定及施工方案模拟

### 2.1 优化方案

由于存在地形偏压作用,在连拱隧道施工过程中,左右洞所产生的变形也存在较大差异,深埋侧隧道的变形通常比浅埋侧隧道的大。若按传统的连拱隧道施工方法进行开挖,深埋侧与浅埋侧主洞的开挖均采用同一种开挖支护方案。

为更好地适应偏压地形,综合V级围岩段的三导洞法和Ⅳ级围岩段的中导洞-台阶法,针对偏压连拱隧道的浅埋侧围岩压力较小的特征,本研究提出在浅埋偏压连拱隧道的V级围岩段采取中导洞-单侧导坑法进行施工,即在隧道浅埋侧采用台阶法开挖,深埋侧采用侧壁导坑法开挖,如图3所示。在图3中,左侧为浅埋侧,右侧为深埋侧,施工顺序为1-Ⅱ-3-4-5-VI-Ⅶ-8-9-10-11-12-XIII-XIV。使用Midas GTS NX有限元软件,分析和对比在V级围岩和偏压条件下,三导洞法和中导洞-单侧导坑法隧道施工方案在围岩及支护结构的应力变形方面的异同。

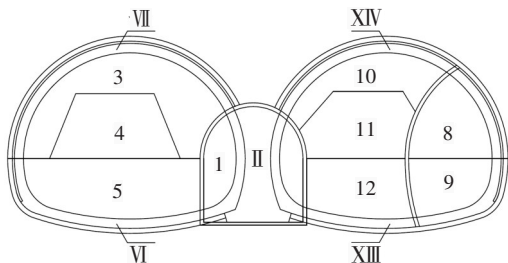


图3 中导洞-单侧导坑法隧道施工步骤

Fig. 3 Schematic diagram of middle pilot tunnel single side pilot construction steps

中导洞-单侧导坑法的开挖步骤为:

- 1) 开挖中导洞,开展初期支护,浇筑中墙;
- 2) 在左侧主洞拱部进行小导管超前支护;在左侧主洞上台阶进行弧形开挖,开展初期支护;
- 3) 开挖左侧主洞核心土和下台阶,开展初期支护,中墙临时支撑;
- 4) 在右洞侧导洞进行小导管超前支护,开挖侧洞上台阶、开展初期支护;
- 5) 开挖右洞侧导洞下台阶,开展初期支护;
- 6) 在右侧主洞拱部进行小导管超前支护;右侧主洞上台阶弧形开挖,开展初期支护;
- 7) 开挖右侧主洞核心土;

- 8) 开挖右侧主洞下台阶,开展初期支护;
- 9) 拆除右侧主洞侧导坑的临时支护;
- 10) 拆除中墙右侧的临时支撑;
- 11) 浇筑仰拱,铺设土工布、防水板;
- 12) 采用模板台车在全断面进行一次模筑、二次衬砌。

### 2.2 有限元计算模型

本模型以湖南省安慈高速公路樟树垭隧道K115+610~K115+640段为背景,该隧道属于V级围岩,左洞埋深为20.9 m,右洞埋深为36.7 m,采用三导洞法进行施工,隧道衬砌采用LS-Va型衬砌。采用Midas GTS NX有限元软件模拟其开挖过程。该模型深度为35.0 m,左、右边界宽度均为46.5 m,隧道纵向长度为30.0 m,模型总宽度为120.0 m,左边界高为40.6 m,右边界高为102.8 m。模型左、右侧分别为浅埋侧、深埋侧。隧道变形在二次衬砌施工时已基本稳定,故该模型忽略二次衬砌,仅考虑开挖和初期支护。

该模型整体结构和隧道初期整体模型分别如图4~5所示,该模型所选用的材料物理力学参数见表1。

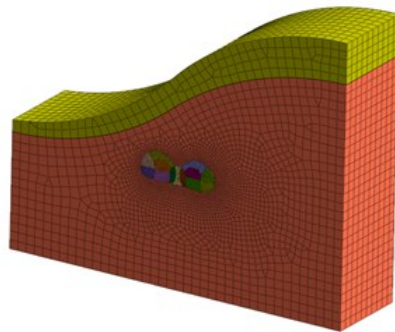


图4 整体模型

Fig. 4 Schematic diagram of overall model

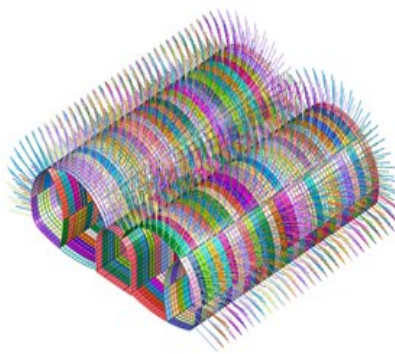


图5 模型隧道

Fig. 5 Schematic diagram of model tunnel

表 1 应力分析材料信息表

Table 1 Stress analysis material information sheet							
材料类别	本构	单元类型	弹性模量/GPa	泊松比	容重/(kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
强风化页岩	D-P本构	实体	0.65	0.32	23	35	23
中风化页岩	D-P本构	实体	1.20	0.30	26	200	25
喷射混凝土	线弹性	板	28.00	0.20	25		
中隔墙	线弹性	实体	32.50	0.20	25		
锚杆	线弹性	植入式桁架	210.00	0.30	79		
钢拱架	线弹性	梁	6.00				

2.3 隧道监测断面及监测点的选取

取模型进尺深度为 9 m 的断面为监测断面,取断面拱顶 *a* 点及其左、右各 2.5 m 处的 *b*、*c* 点为拱顶沉降监控点,在边墙(*f*点至 *g* 点)和拱腰(*d*、*e* 点)处进行水平变形监测。拱顶沉降和水平变形测点设置如图 6 所示。

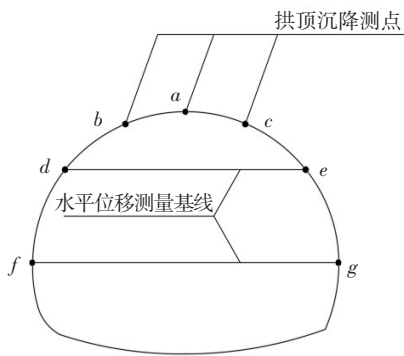


图 6 隧道变形量测基线

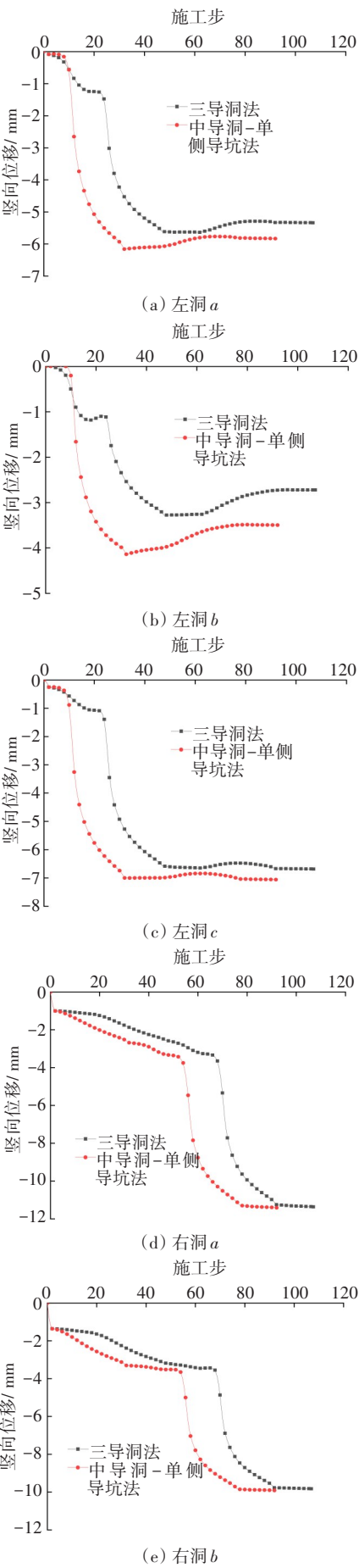
Fig. 6 Baseline diagram of tunnel deformation measurement

3 结果分析

3.1 围岩位移

3.1.1 拱顶沉降

这两种开挖方案的左右洞拱顶沉降与施工步的关系曲线如图 7 所示,累积竖向沉降见表 2。





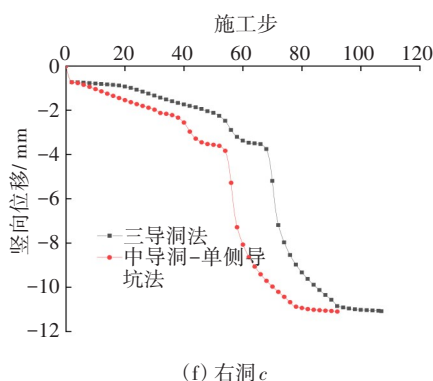


图7 隧道拱顶沉降曲线

Fig. 7 Settlement curve of tunnel vault

表2 隧道拱顶累计沉降量

Table 2 Cumulative settlement of tunnel vault mm

开挖方案	累计沉降量					
	左洞a	左洞b	左洞c	右洞a	右洞b	右洞c
三导洞法	-5.339	-2.724	-6.687	-11.373	-9.829	-11.084
中导洞-单侧导坑法	-5.829	-3.495	-7.056	-11.410	-9.910	-11.092

由图7及表2,可知:

1) 在这两种开挖方案中,浅埋侧的拱顶沉降比深埋侧的小。浅埋侧隧道拱顶沉降随埋深的减小而逐渐减小,拱右的沉降约为拱左的两倍。深埋侧拱顶最小沉降出现在拱左,拱顶最大沉降出现在右洞a点处。

2) 在左洞a、b、c与右洞a、b、c这6个测点上,采用三导洞法开挖的累计竖向位移分别是采用中导洞-单侧导坑法开挖的累计竖向位移的91.59%、77.94%、94.78%、99.68%、99.18%、99.93%。其中,在左洞拱顶b点处,这两种开挖方案产生的累计竖向位移差值最大;而在其他各监测点,这两种开挖方案产生的累计竖向位移区别不大。这表明在主洞开挖时,内支撑的设置在一定程度上降低了该侧隧道拱顶的竖向位移,而浅埋侧的开挖方式主要影响本洞围岩的竖向位移,对深埋侧隧道的影响较小。

尽管采用三导洞法开挖方案的各测点的竖向位移均小于采用中导洞-单侧导坑法开挖方案的各测点的竖向位移,但两方案的各监测点的竖向位移

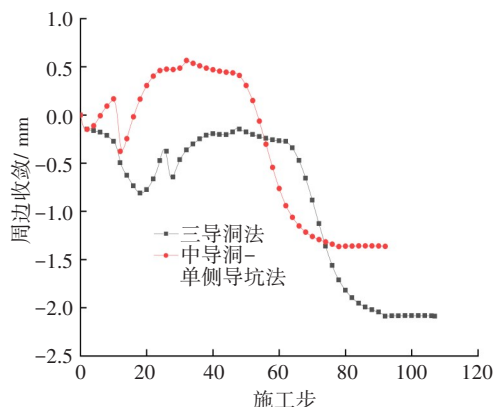
均符合《公路隧道施工技术规范》(JTG/T 3660—2020)的要求。且浅埋侧的台阶法减少了内支撑施工,可加快施工进度,加速隧道支护结构闭合的形成,在一定程度上降低了施工成本。因此,从施工成本角度来看,采用中导洞-单侧导坑法比采用三导洞法进行开挖更合理。

### 3.1.2 水平收敛

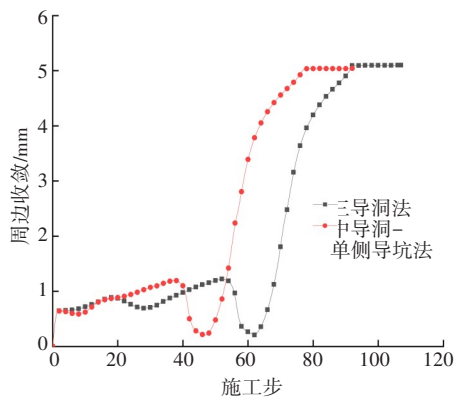
为更清楚地对比在三导洞法、中导洞-单侧导坑法两种开挖方案下隧道的水平收敛情况,提取在这两种开挖方案下左、右洞拱顶各监测点的水平位移。这两种开挖方案的左、右洞的各监测点的洞周收敛曲线如图8所示,左、右洞累计水平收敛参数统计见表3~4。

由图8与表3~4可知,在三导洞法、中导洞-单侧导坑法这两种开挖方案中,浅埋侧各监测点水平位移的变化规律稍有不同。其中,按三导洞法和中导洞-单侧导坑法开挖方案施工的左洞d-e测线的最终累计水平收敛值分别为-2.088、-1.362 mm,两者相差0.726 mm;按三导洞法和中导洞-单侧导坑法开挖方案施工的左洞f-g测线的最终累计水平收敛值分别为-0.328、-0.839 mm,两者相差0.511 mm。

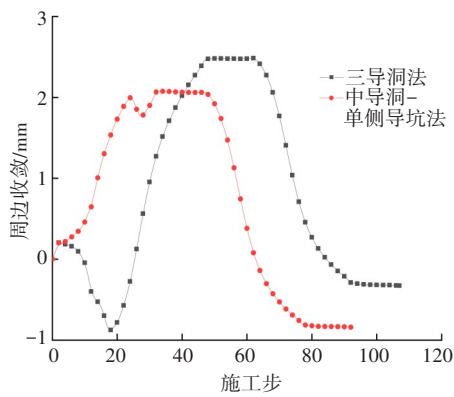
采用中导洞-单侧导坑法的开挖方案可在一定程度上减少浅埋侧的洞周收敛,但这两种开挖方案在深埋侧各监测点水平位移基本一致,最终累计水平收敛值也相差无几,且深埋侧测点f和浅埋侧测点g的水平位移值基本一致。这表明采用两种开挖方案施工都不会导致中隔墙的偏心荷载增大。因此,从洞周收敛角度考虑,中导洞-单侧导坑法的开挖方案更合理。



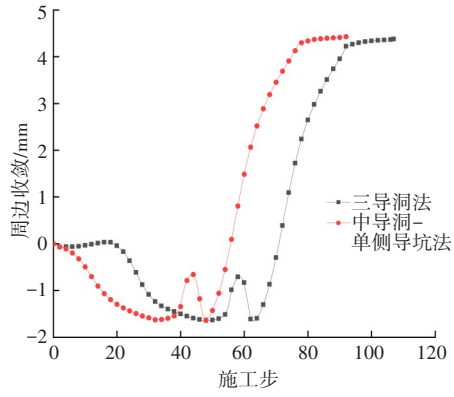
(a) 左洞d-e测线



(b) 右洞 d-e 测线



(c) 左洞 f-g 测线



(d) 右洞 f-g 测线

图8 隧道周边收敛曲线对比

Fig. 8 Comparison of convergence curves around tunnel

表3 左洞累计收敛表

Table 3 Left hole cumulative convergence table mm

开挖方案	累计收敛值					
	左洞测点 d	左洞测点 e	左洞测线 d-e	左洞测点 f	左洞测点 g	左洞测线 f-g
三导洞法	-4.681	-6.769	-2.088	-2.091	-2.419	-0.328
中导洞-单侧导坑法	-5.031	-6.393	-1.362	-1.596	-2.435	-0.839

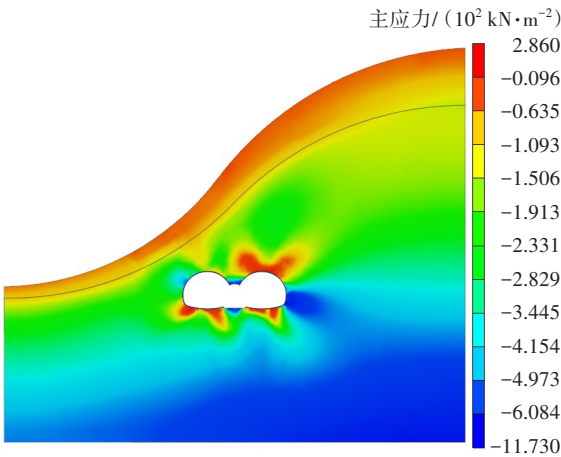
表4 右洞累计收敛表

Table 4 Right hole cumulative convergence table mm

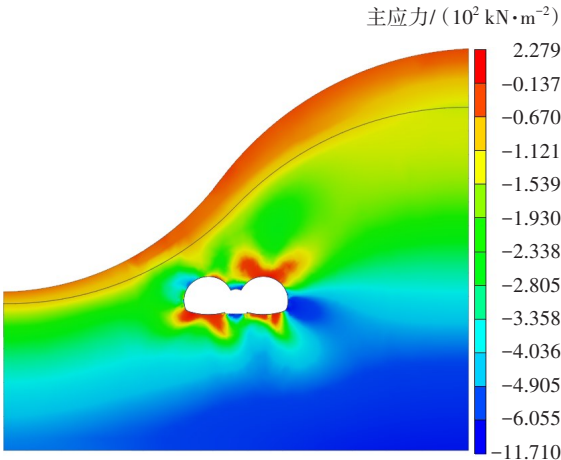
开挖方案	累计收敛值					
	右洞测点 d	右洞测点 e	右洞测线 d-e	右洞测点 f	右洞测点 g	右洞测线 f-g
三导洞法	-6.156	-1.055	5.101	-2.346	2.030	4.376
中导洞-单侧导坑法	-6.012	-0.968	5.044	-2.361	2.068	4.430

3.2 围岩应力

采用三导洞法、中导洞-单侧导坑法这两种方案开挖的隧道最终阶段围岩主应力如图9所示,采用三导洞法、中导洞-单侧导坑法这两种开挖方案的左、右洞各位置的最大主应力见表5。



(a) 三导洞法



(b) 中导洞-单侧导坑法

图9 两种开挖方案主应力云图

Fig. 9 Nephogram of maximum principal stress of two schemes

表5 最大主应力表

Table 5 Maximum principal stress table

MPa

开挖方案	左洞					右洞				
	拱顶	左拱脚	右拱脚	左边墙	左墙角	拱顶	左拱脚	右拱脚	右边墙	右墙角
三导洞法	-0.149	-0.476	-0.318	-0.196	-0.071	0.045	-0.370	-0.074	-0.542	-0.974
中导洞-单侧导坑法	-0.098	-0.431	-0.254	-0.122	-0.031	0.043	-0.364	-0.078	-0.543	-0.966

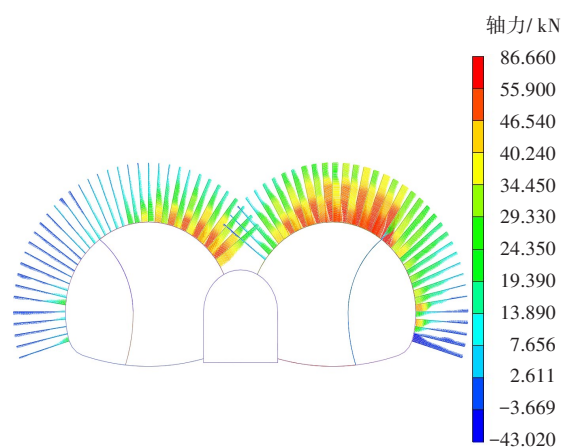
由图9及表5可知,在三导洞法和中导洞-单侧导坑法两种开挖方案中,隧道最大围岩应力的大小及分布区域均相差无几;围岩压应力区均位于右洞右墙角及左洞边墙外,拉应力区均位于右洞顶部及隧洞底部,而在中隔墙左下方也均出现了较为明显的压应力区。两种方案的拉应力区均大致呈X形分布,左洞顶部均无明显拉应力区,但左洞的左墙角处均出现了明显的拉应力集中现象。这两种开挖方案的右洞的应力值大小也基本一致,主要区别体现在左洞各测点的应力值上。中导洞-单侧导坑开挖方案的左洞各测点的最大主应力平均值比三导洞法开挖方案的最大主应力平均值偏小0.055 MPa。

### 3.3 锚杆轴力

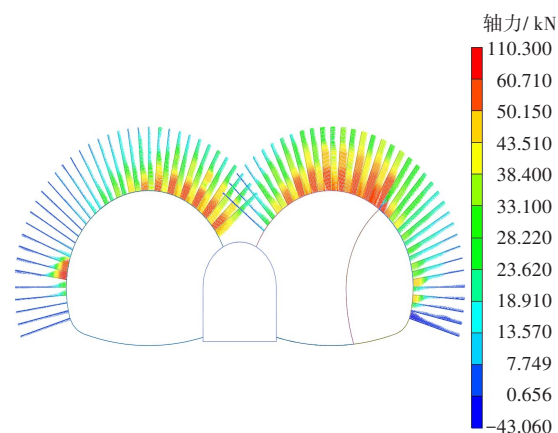
以模型进尺深度为9 m的隧道断面为研究对象,对这两种开挖方案进行锚杆轴力分析。最终阶段锚杆轴力分布情况如图10所示。

从图10中可以看出,地形的偏压导致隧道锚杆轴力并不呈左右对称的均匀分布。浅埋侧的轴力普遍小于深埋侧的,而同一根锚杆锚头和底端的轴力也存在较大差异。一般认为锚杆轴力沿杆身呈线性分布,锚杆底端的轴力远小于锚头的,甚至在部分锚杆出现了底端受压、锚头受拉的情况。

通过对比分析发现,中导洞-单侧导坑开挖方案的左边墙附近支护结构变形明显大于三导洞法开挖方案的。三导洞法、中导洞-单侧导坑法两种开挖方案的左墙锚杆最大轴力分别为22.96、110.26 kN。采用中导洞-单侧导坑开挖的左洞墙的锚杆轴力明显大于采用三导洞开挖的。这是因为在中导洞-单侧导坑法的开挖方案中,左洞采用了台阶法施工,施工时洞内无内支撑,致使左洞的锚杆轴力和结构变形增大。故采用台阶法施工应加固导坑侧边墙的围岩,以避免应力集中现象的发生。



(a) 三导洞法



(b) 中导洞-单侧导坑法

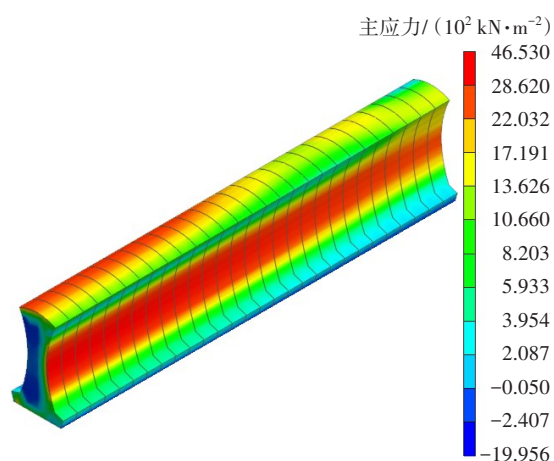
图10 模型进尺深度为9 m隧道断面处的锚杆轴力云图

Fig. 10 Nephogram of axial force of anchor bolt at  $y = 9$  section of tunnel

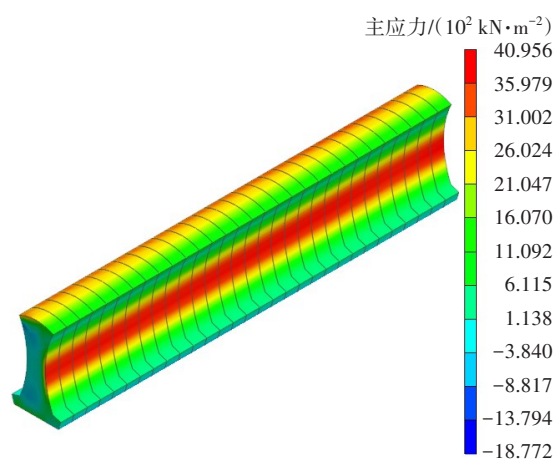
尽管采用中导洞-单侧导坑开挖的左洞锚杆轴力大于采用三导洞法开挖的,但其轴力增加幅度仍在可接受范围内,该轴力并没有超出设计抗拉强度。因此,采用中导洞-单侧导坑法进行开挖也是可行的,但要注意对台阶法施工侧的边墙进行加固处理。

### 3.4 中隔墙应力

选取浅埋侧、深埋侧主洞上台阶环形开挖及初支完成时与浅埋侧、深埋侧主洞开挖完成4个施工阶段进行中隔墙应力分析,这4个阶段的中隔墙主应力分别如图11~14所示。



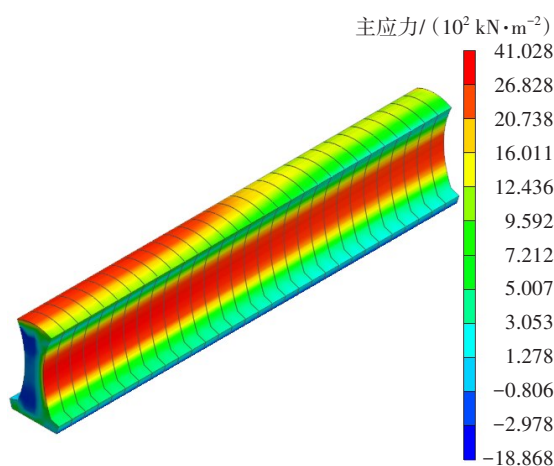
(a) 三导洞法



(b) 中导洞-单侧导坑法

图12 浅埋侧主洞开挖完成时中隔墙应力云图

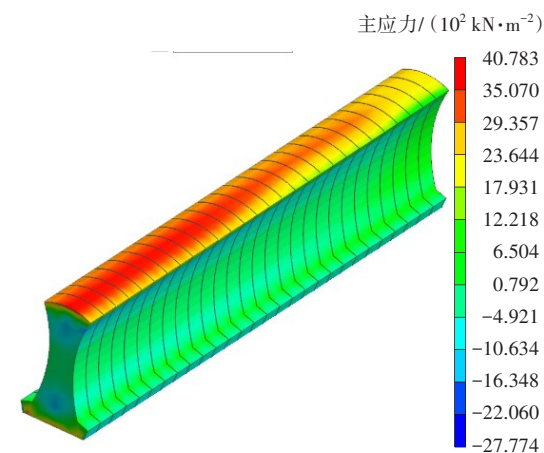
Fig. 12 Nephogram of stress of middle partition wall when the excavation of the main tunnel at the shallow buried side is completed



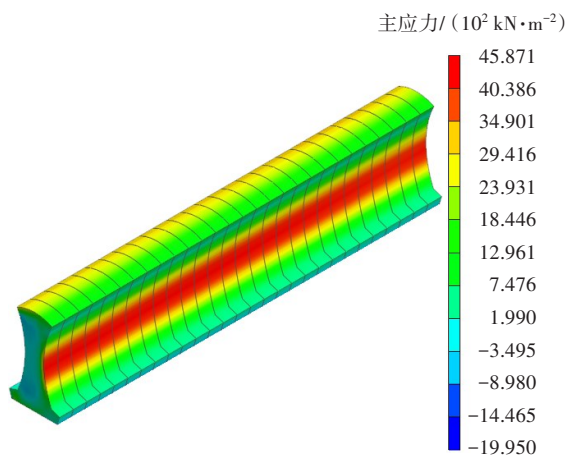
(b) 中导洞-单侧导坑法

图11 浅埋侧主洞上台阶环形开挖完成中隔墙应力云图

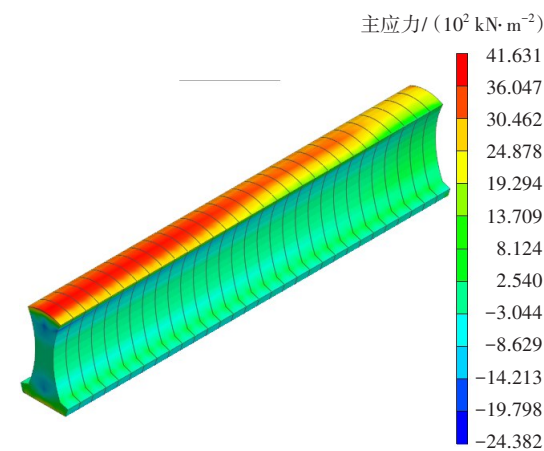
Fig. 11 Nephogram of stress of middle partition wall after circular excavation of upper steps of main tunnel at shallow buried side



(a) 三导洞法



(a) 三导洞法



(b) 中导洞-单侧导坑法

图13 深埋侧主洞上台阶环形开挖完成中隔墙应力云图

Fig. 13 Nephogram of the stress of the middle partition wall when the circular excavation of the upper step of the main tunnel at the deep buried side is completed



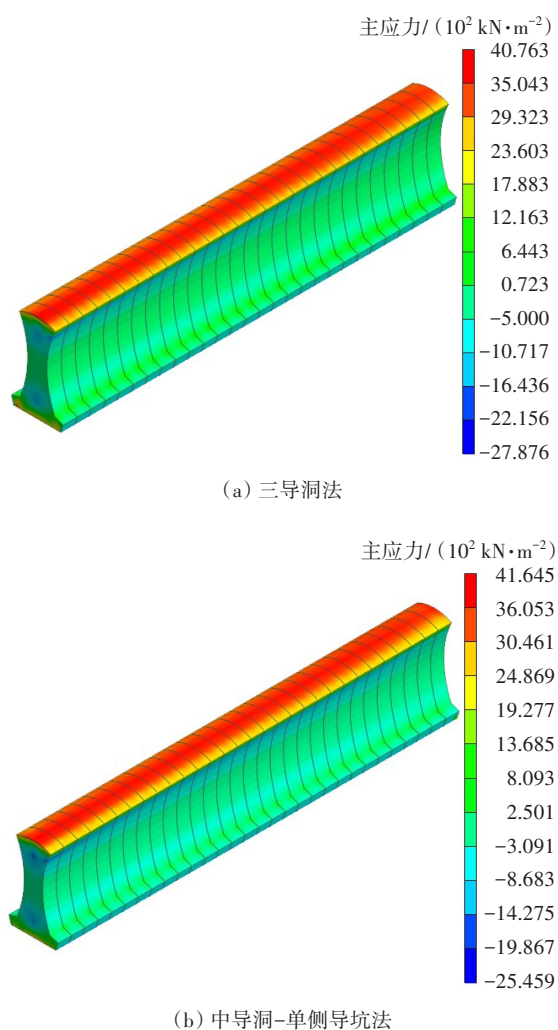


图14 隧道开挖完成时中隔墙应力云图

Fig. 14 Nephogram of stress of middle partition wall after tunnel excavation

从图11~14可以看出,在浅埋侧开挖过程中,由于受到地形偏压的作用,深埋侧中隔墙墙腰处产生了应力集中现象。当浅埋侧主洞上台阶环形开挖结束时,采用三导洞法、中导洞-单侧导坑法开挖的最大应力值分别为4.65、4.10 MPa;当浅埋侧主洞开挖贯通时,采用三导洞法、中导洞-单侧导坑法开挖的深埋侧中隔墙墙腰处的最大应力值分别为4.587、4.096 MPa。因此,在浅埋侧开挖过程中,采用中导洞-单侧导坑法能更有效地降低中隔墙应力集中现象,防止墙腰裂缝的产生。

随着深埋侧开挖的进行,中隔墙的应力集中主要发生在拱顶处。当深埋侧主洞上台阶环形开挖结束时,采用三导洞法、中导洞-单侧导坑法开挖方案施工的最大应力值分别为4.078、4.163

MPa;当隧道全面贯通时,采用三导洞法、中导洞-单侧导坑法开挖的最大应力值分别为4.076、4.165 MPa。这两种开挖方案的应力集中位置基本一致,最大应力值也基本相当。

中隔墙应力集中是产生裂缝的重要原因。当分别采用三导洞法和中导洞-单侧导坑法在浅埋侧进行施工时,中隔墙深埋侧的拱腰处均出现了明显的应力集中现象。深埋侧从开挖开始至开挖结束,应力集中现象主要发生在中隔墙墙拱处。因此,采用中导洞-单侧导坑法开挖能更有效地控制在浅埋侧开挖时深埋侧墙腰处的开裂现象。无论采用哪一种开挖方案,在隧道的营运过程中,均要注意防止防护墙墙拱开裂现象的产生。

## 4 结论

本研究以湖南省安慈高速公路樟树垭连拱隧道为工程背景,通过建立三维数值模型,对在偏压地形下的三导洞法和中导洞-单侧导坑法两种开挖方案的开挖过程进行模拟,分析这两种开挖方案下隧道的变形和力学特性,得出以下结论:

1) 数值模拟结果表明,对于V级围岩段浅埋偏压隧道,采用三导洞法或中导洞-单侧导坑法的开挖方案均能保证施工安全;

2) 相较于三导洞法,中导洞-单侧导坑法在浅埋侧是采用台阶法施工的,其对浅埋侧主洞的受力变形有一定影响,但其对深埋侧的影响则很小,可忽略不计;

3) 在控制围岩竖向变形以及锚杆轴力方面,三导洞法优于中导洞-单侧导坑法;在围岩水平收敛与围岩应力方面,中导洞-单侧导坑法优于三导洞法。这两种开挖方案均在不同程度上会受到偏压地形的影响,它们在深埋侧的围岩竖向变形与水平收敛均大于各自在浅埋侧的。

4) 相较于三导洞法,中导洞-单侧导坑法可加速隧道支护结构的闭合,加快整体施工进度,且由于其浅埋侧无内支撑,故可一定程度上降低施工成本。若实际工程存在工期较紧情况,可优先考虑采用中导洞-单侧导坑法。

5) 相较于三导洞法,中导洞-单侧导坑法能更好地减少浅埋侧开挖时中隔墙深埋侧墙腰开裂现

象的发生。

### 参考文献(References):

- [1] 张美意, 陈佳维. 湖南省综合交通枢纽城市体系研究[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(1): 107-111. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2019.01.018.  
ZHANG Meiyi, CHEN Jiawei. Study on the urban transportation hub city system in Hunan Province [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(1): 107-111. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2019.01.018.
- [2] 周新志. 浅埋偏压连拱隧道施工过程数值模拟分析[J]. 工程建设与设计, 2017(4): 89-91. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2017.02.136.  
ZHOU Xinzhi. Numerical analysis on construction sequence of shallow buried multi-arch tunnel under unsymmetrical pressure [J]. Construction & Design for Engineering, 2017(4): 89-91. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2017.02.136.
- [3] 朱正国, 乔春生, 高保彬. 浅埋偏压连拱隧道的施工优化及支护受力特征分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2747-2752, 2758. DOI: 10.16285/j.rsm.2008.10.013.  
ZHU Zhengguo, QIAO Chunsheng, GAO Baobin. Analysis of construction optimization and supporting structure under load of shallow multi-arch tunnel under unsymmetrical pressure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2747-2752, 2758. DOI: 10.16285/j.rsm.2008.10.013.
- [4] 张志强, 何川. 偏压连拱隧道优化施工的研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 723-727, 732. DOI: 10.16285/j.rsm.2007.04.017.  
ZHANG Zhiqiang, HE Chuan. Research on optimized construction procedure for double-arched tunnel in unsymmetrical pressure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(4): 723-727, 732. DOI: 10.16285/j.rsm.2007.04.017.
- [5] 许崇帮, 夏才初, 王华牢. 特大断面连拱隧道中墙偏压机制及施工影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊1): 2819-2826.  
XU Chongbang, XIA Caichu, WANG Hualao. Analysis of mechanism of mid-partition eccentric compression and construction effect on super-large section multi-arch tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(sup 1): 2819-2826.
- [6] 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. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017-503.  
HUANG Weixin, 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. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017-503.
- [7] 李辉, 杜莎芳, 李恒, 等. 奔龙坪偏压连拱隧道施工方案比选及监测分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(4): 485-491. DOI: 10.15986/j.1006-7930.2017.04.004.  
LI Hui, DU Shafang, LI Heng, et al. Construction sequence comparison and numerical analysis of Benlongping shallow and unsymmetrical pressure multi arch tunnel [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2017, 49(4): 485-491. DOI: 10.15986/j.1006-7930.2017.04.004.
- [8] 赵金鹏, 王秀英, 谭忠盛, 等. 软弱围岩偏压连拱隧道正洞合理施工布局研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增刊2): 66-74. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2017.s2.011.  
ZHAO Jinpeng, WANG Xiuying, TAN Zhongsheng, et al. Study on the reasonable construction layout of main tunnel in unsymmetrical loading multi-arch tunnel with weak rock [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(sup 2): 66-74. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2017.s2.011.
- [9] 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: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.03.008.  
LIU Chang, LIU Hui, DENG Xiaozhao, et al. Study on construction mechanical characteristics of unsymmetrical widdle wall in biased double-arch tunnel [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(3): 50-57, 77. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.03.008.
- [10] 耿招, 张彬, 李伟瀚, 等. 不同开挖方法偏压大跨隧道围岩稳定性对比分析[J]. 工程地质学报, 2018, 26(4): 866-873. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017-332.  
GENG Zhao, ZHANG Bin, LI Weihan, et al. Comparison and analysis on surrounding rock stability of bias large span tunnel with different excavation methods [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(4): 866-873. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017-332.
- [11] 王道远, 袁金秀, 王记平, 等. 浅埋软弱围岩隧道快速进洞方法及稳定性控制技术研究[J]. 现代隧道技术, (下转第104页)

- [10] 秦会来, 周予启, 黄茂松, 等. 基于上限理论的预留土支护基坑极限抗力分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1101-1107. DOI: 10.11779/CJGE202006014.  
QIN Huilai, ZHOU Yuqi, HUANG Maosong, et al. Passive earth pressure analysis of berm-retained excavation by upper bound method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(6): 1101-1107. DOI: 10.11779/CJGE202006014.
- [11] 梁冠亭, 陈昌富, 朱剑锋, 等. 基于M-P法的抗滑桩支护边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 451-456, 469. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.02.021.  
LIANG Guanting, CHEN Changfu, ZHU Jianfeng, et al. Stability analysis of pile stabilized slope based on Morgenstern-Price method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 451-456, 469. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.02.021.
- [12] 刘杰. 不同位移模式下挡墙和抗滑桩稳定性上限分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2015. LIU Jie. Upper bound analysis of stability of retaining wall and anti slide pile with different displacement modes [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [13] 陈惠发. 极限分析与土体塑性[M]. 詹世斌, 译. 北京: 人民交通出版社, 1995.  
Chen Huifa. Limit analysis and soil plasticity [M]. Zhan, S. B. Translation.. Beijing: China Communications Press, 1995.  
(责任编辑: 罗容; 校对: 欧兆虎; 英文编辑: 杜雪明)

(上接第97页)

- 2018, 55(4): 178-185. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2018.04.024.  
WANG Daoyuan, YUAN Jinxiu, WANG Jiping, et al. Fast entrance excavation method and stability control techniques for a shallow tunnel with uneven rock pressure and a weak rock mass [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(4): 178-185. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2018.04.024.
- [12] 贾永刚, 王明年, 邓敦毅. 双连拱隧道两种工法的施工力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊2): 5727-5732.  
JIA Yonggang, WANG Mingnian, DENG Dunyi. Study on construction mechanics of two kinds of construction methods for double-arch tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(sup 2): 5727-5732.  
(责任编辑: 李脉; 校对: 罗容; 英文编辑: 杜雪明)