

文章编号: 0451-0712(2017)11-0296-05

中图分类号: U457.3

文献标识码: A

# 基于新意法原理的 隧道全断面预加固效果研究

唐勇三<sup>1</sup>, 林剑飞<sup>2</sup>, 叶飞<sup>3</sup>, 宋京<sup>3</sup>, 赵汝亮<sup>3</sup>

(1. 福建省高速公路建设总指挥部 福州市 350001; 2. 莆田湄渝高速公路有限责任公司 莆田市 351100;  
3. 长安大学公路学院 西安市 710064)

**摘要:** 基于新意法基本理论,以湄渝高速岐山隧道为依托,采用有限差分程序模拟玻璃纤维锚杆超前预加固隧道核心土下的全断面开挖,通过对比预加固开挖与传统工法下挤出变形、收敛变形及超前核心土应力分布情况对预加固效果进行了验证。结果显示,预加固措施可以在一定范围内减小挤出变形,但对掌子面前方扰动范围的影响甚微;两工况掌子面挤出位移均在中心位置达到最大,预加固在掌子面中心处对挤出位移的减小效果最为明显;两工况下掌子面前方预收敛的分布特征与挤出位移基本一致,但掌子面通过后预加固对方后收敛的发展不再起控制作用;两工况下掌子面前方拱效应形成位置基本一致,而预加固措施能够有效加强前方拱效应。

**关键词:** 新意法; 全断面预加固; 超前核心土; 数值模拟; 研究

## 1 研究背景

新奥法经过半个多世纪的发展,已经成为我国隧道施工方法的基础理论,指导了我国绝大多数隧道工程的设计和施工<sup>[1]</sup>。然而,以控制爆破、柔性支护和监控量测三大要点为支撑的新奥法在面对现已成为常态的大断面软弱围岩隧道时逐渐暴露出其局限性和缺点:分部开挖对围岩扰动大、造价高且工序繁琐,而通过监控量测指导施工的方式只能根据围岩的变形反应被动地调整支护措施,且对前方围岩的变形情况也无法先觉。随着我国公路和铁路交通路网不断向崇山峻岭、离岸深水延伸,隧道工程将面临前所未有的复杂环境,传统的结构形式也在不断被突破,亟需发展新材料、新工艺、新方法和新技术,为未来几十年隧道工程建设的持续发展提供重要的技术支撑<sup>[2]</sup>。

新意法<sup>[3]</sup>是意大利著名学者 Pietro Lunardi 及其团队在研究隧道围岩成拱效应的同时在新奥法的理论基础上发展起来的隧道工程设计、施工新方法,其通过对隧道施工过程中围岩应力—应变反应的深入研究,特别是对掌子面及其前方核心土而不仅仅是洞室的变化状态予以关注。如图 1 所示,为更好地描述变形反应,新意法定义了新的专业术语:(1)超

前核心土,隧道掌子面前方一定体积的土体,断面大致与隧道轮廓相同;(2)掌子面—超前核心土挤出变形,主要发生在超前核心土内,沿隧道水平轴线向掌子面后方发展,大概呈轴对称;(3)隧道预收敛,隧道前方理论轮廓线的收敛变形。

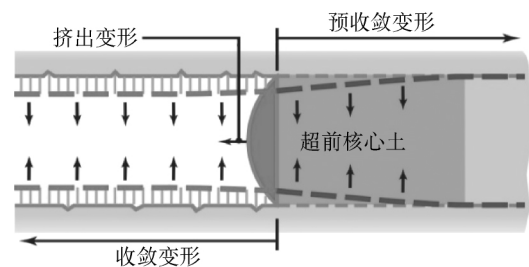


图 1 隧道变形分类

基于理论分析,新意法认为掌子面—超前核心土体系的稳定是隧道开挖能否安全进行的决定性因素,主张各种超前工法(预加固和预约束)前提下的全断面开挖方法,并提出了两种最基本的保证超前核心土强度和稳定性的措施:(1)保护性干预措施(预约束):即在超前核心土周围,通过一系列措施(近水平旋喷桩技术、机械预切槽技术等)保护超前核心土原有的强度和变形特性,使成拱效应靠近洞

收稿日期:2017-03-14

壁周围产生;(2)加固性干预措施(预加固):通过适当的加固技术(玻璃纤维结构件加固超前核心土等)直接作用于超前核心土,改善其强度和稳定性。

过去的20多年间,新意法在国外得到了广泛的工程应用与理论研究<sup>[4-7]</sup>,并被纳入了意大利隧道设计规范中。而我国只是近年来在极少数隧道中对新意法进行了尝试性应用<sup>[8,9]</sup>,对其理论研究鲜有报道。

基于新意法基本理论,以福建省岐山隧道为依托,采用有限差分程序FLAC3D模拟玻璃纤维锚杆预加固隧道超前核心土下的全断面开挖,并通过对比传统工法与预加固工法下开挖后的超前核心土变形及应力分布情况对其加固效果进行了验证与分析。

## 2 依托工程概况

依托工程岐山隧道位于湄洲湾~重庆高速公路莆田段,隧道左线长8 039 m,右线长8 044 m,为目前全国最长的双向六车道高速公路隧道,也是所在标段的重点控制性工程。隧道最大开挖断面约184 m<sup>2</sup>,最大开挖宽度约19 m,隧址区发育有18条断层,根据地质勘察资料和试验前已施工的情况来看,隧道地质情况变化反复,预计IV、V级软弱围岩占隧道全长将超过30%。拟研究段位于隧道左线F215构造破碎带及构造影响带附近,埋深约500 m。

## 3 模型建立与工况设置

### 3.1 模型建立

为消除边界效应,同时考虑计算效率,建立的模型长度取152 m,高度取100 m,纵向长度取100 m,为获得更加合理的结果,对模型掌子面处的网格进行了细化,最终建立的模型共包括18 600个单元,195 334个节点,初支与二衬采用实体单元模拟并按照刚度相等的原则将钢拱架强度折算到初期支护中,最终模型如图2所示。

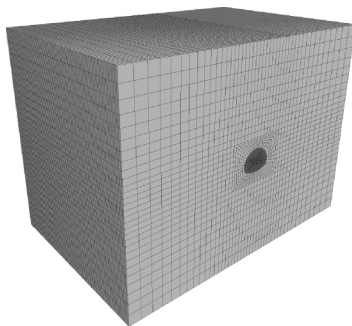


图2 模型网格

### 3.2 材料参数与边界条件

数值模型采用摩尔-库仑模型(Mohr-Coulomb)模拟围岩材料,采用弹性模型(Elastic)模拟支护结构,采用空模型(Null)单元模拟开挖部分。围岩材料参数按照岐山隧道里程ZK79+75~ZK79+105段F215断层破碎带勘察值进行转换,支护结构材料参数按照混凝土材料及相关规范选取,各材料计算参数详见表1。

表1 材料参数

材料	重度 $\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	体积模量 G/GPa	剪切模量 K/GPa	黏聚力 C/MPa	内摩擦角 $\varphi$ (°)
围岩	23.0	7.93	3.04	0.78	22
初支	25.0	22.4	11.2	—	—
二衬	25.0	24	12.0	—	—

由于依托工程隧道埋深达500 m,必须考虑构造应力的影响,因此在施工模拟前,采用快速应力边界法<sup>[10]</sup>,参照相关地应力资料,将初始地应力加载到模型四周。

超前锚杆计算参数按参考文献<sup>[11]</sup>进行选取,取锚杆弹性模量为45 GPa,抗拉强度为120 kN,水泥浆黏结力为 $2.0 \times 10^5$  N/m,水泥浆刚度为 $1.75 \times 10^7$  N/m<sup>2</sup>。

### 3.3 超前锚杆布置方案

数值计算预加固工况中掌子面共布置60根超前锚杆,每根长25 m,采用梅花形布置,相邻锚杆间距为1.5 m,平均密度 $2.5 \text{ m}^2/\text{根}$ ,掌子面锚杆布置方案如图3所示;模型中设置的Cable单元如图4所示。

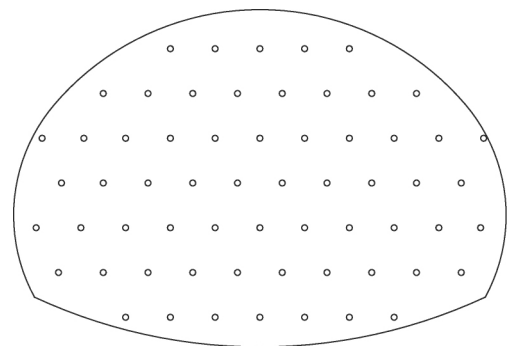


图3 掌子面锚杆布置

### 3.4 计算工况设置

本次数值模拟共设置两个工况。工况一为传统的全断面开挖;工况二为玻璃纤维锚杆超前加固下的全断面开挖。两工况均先循环开挖至20 m处消除边界效应。工况一按照锚杆布置方案在掌子面前方设置锚杆(Cable)单元后全断面开挖;工况二则按

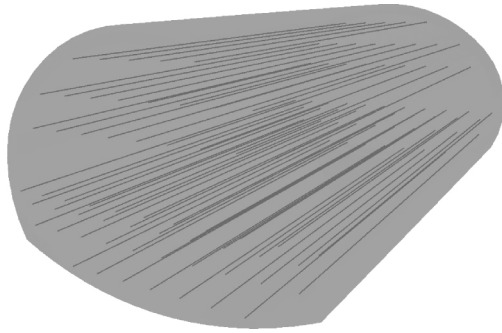


图 4 模型中设置的锚杆(Cable)单元

照传统全断面开挖方法进行。两工况下每循环进尺均为 2 m,共开挖 7 个循环共 14 m,开挖完成后工况一超前锚杆残余长度为 11 m。

#### 4 计算结果分析

如上所述,新意法认为掌子面—超前核心土体系的稳定是隧道开挖能否安全进行的决定性因素,因此将两工况下掌子面—超前核心土的变形及应力情况进行对比分析,以评价超前锚杆预加固的作用效果。

##### 4.1 挤出位移分析

两工况条件下掌子面前方 16 m 范围内超前核心土中心点挤出位移如图 5 所示;图 6 为两工况下掌子面挤出位移与距掌子面距离的关系曲线。

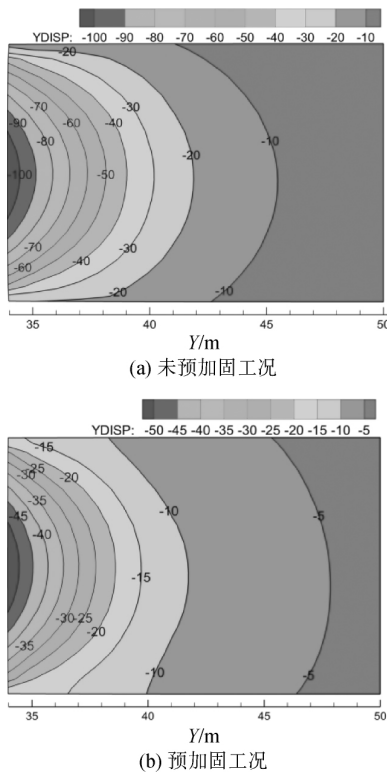


图 5 超前核心土挤出位移

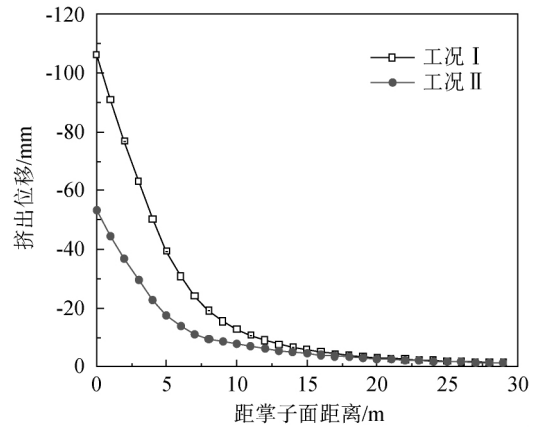


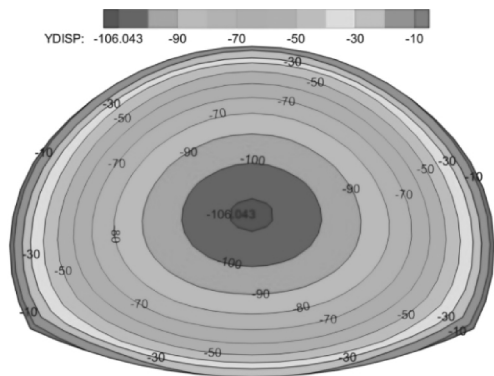
图 6 挤出变形与距掌子面距离的关系

通过对两工况计算结果分析可知,开挖完成后,在距掌子面 10 m 左右的范围内,预加固工况下的掌子面前方挤出位移远远小于未加固工况下的挤出位移,但在远离掌子面 15 m 之外的范围内,两种工况的挤出变形没有太大区别,且两种工况在挤出位移上对超前核心土的影响范围基本一致,在 20~25 m 范围内,约为 1.5 倍洞径。L. Cantieni 等通过在掌子面上施加恒定的法向压力模拟掌子面预加固,得到的结果与上述结论基本一致。

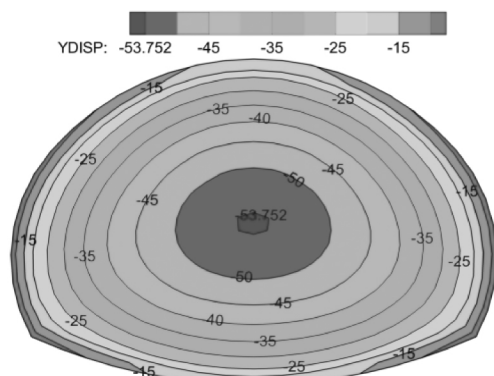
两种工况条件下掌子面处挤出位移情况如图 7 所示。由计算结果可以看出,隧道开挖后,两工况掌子面处挤出位移均在内轮廓中心处达到最大,并呈环形向外逐渐减小,传统工况下掌子面处最大挤出位移达到 106 mm,对掌子面预加固后最大挤出位移减小到约 54 mm,而在内轮廓边缘处,两工况掌子面挤出位移值没有太大区别。

##### 4.2 拱顶预收敛与收敛分析

图 8 所示为掌子面前方轮廓线顶部下沉位移发展曲线,由图中可以看出,隧道开挖后,在距掌子面 10~15 m 的范围内,预加固工况下的掌子面前方预收敛位移远远小于未预加固工况下的收敛位移,但在远离掌子面 15 m 之外的范围内,两种工况的预收敛变形没有太大区别,且两种工况在预收敛位移上对超前核心土的影响范围也基本一致,总体来说,掌子面前方预收敛位移所表现出来的各个规律与前方挤出位移基本一致。另外,在掌子面前方 11 m 处,即残余超前锚杆的末端位置,预加固工况下的预收敛位移值出现了轻微地向上波动,这说明此时残余的 11 m 超前锚杆已经不能完全满足超前加固的需要,需要及时搭接新的超前锚杆。



(a) 未预加固工况



(b) 预加固工况

图7 掌子面挤出位移

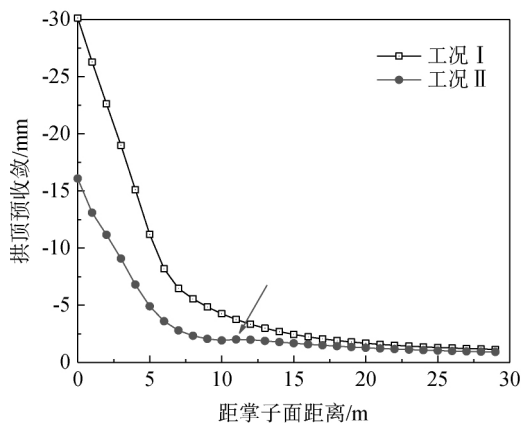


图8 拱顶预收敛与距掌子面距离的关系

图9所示为循环开挖过后掌子面后方各断面拱顶下沉曲线,横坐标负号表示取值点位于掌子面后方,从图中可以看出,工况二后方拱顶下沉明显小于工况一,两曲线基本呈平行状态,说明预加固通过控制掌子面前方变形有效地减小了洞室总变形,但掌子面通过各断面后,预加固措施不再影响拱顶收敛的发展。

### 4.3 超前核心土应力分析

两工况超前核心土内大主应力的纵剖面分布如

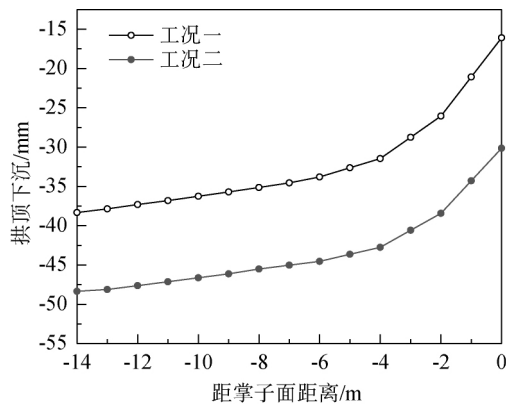
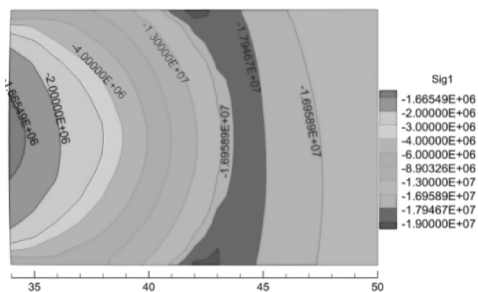
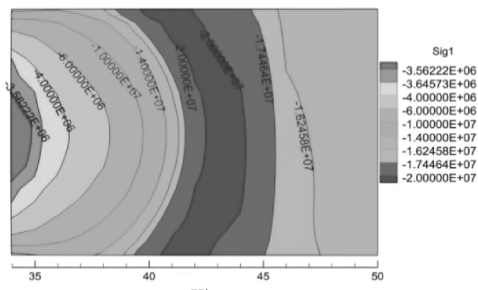


图9 掌子面后方下沉曲线

图10所示,由计算结果可以看出,两工况下开挖完成后超前核心土大主应力分布规律基本相似,最小值出现在掌子面处并向内逐渐增大,在掌子面前方10~15 m处达到最大值后开始逐渐减小,未预加固和预加固工况下大主应力最小值为分别为1.6 MPa和3.4 MPa,最大值分别为19 MPa和21 MPa。



(a) 未预加固工况



(b) 预加固工况

图10 超前核心土大主应力纵剖面分布

通过以上分析,可以认为超前预加固可以更好地控制掌子面—超前核心土的应力释放,加强掌子面前方形成的土拱效应,分析结果同时表明,两工况下纵向拱形成的位置均在掌子面前方10~15 m处,这也印证了前文超前核心土挤出位移及预收敛范围所表现出来的规律。

## 5 结语

采用有限差分程序模拟玻璃纤维锚杆超前预加固隧道核心土下的全断面开挖,通过对比预加固与传统工法下的应力应变情况验证了工法效果,并得到以下结论。

(1)预加固工况下掌子面前方一定区域内的挤出位移远小于未加固工况下的挤出位移,但在远离掌子面 15 m 后,两种工况的挤出变形没有太大区别,且两种工况在挤出位移上对超前核心土的影响范围均在 20~25 m 范围内,约为 1.5 倍洞径。

(2)两工况掌子面处挤出位移均在轮廓中心处达到最大,并呈环形向外逐渐减小,超前核心土预加固在掌子面中心处对挤出位移的减小效果最为明显。

(3)两工况下掌子面前方预收敛位移所表现出来的各个规律与挤出位移基本一致,且通过对比发现,超前预加固对掌子面后方收敛也有较为明显的控制作用。

(4)两工况超前核心土大主应力分布规律基本一致,最小值出现在掌子面处并向内逐渐增大,在掌子面前方 10~15 m 处达到最大值后开始逐渐减小。对比发现超前预加固可以更好地控制掌子面—超前核心土的应力释放,加强掌子面前方形成的土拱效应。

以上结果说明,新意法所提出的超前预加固措施可以有效提高和保证超前核心土强度和稳定性,全方位减小开挖引起的变形并优化围岩受力,从而可以实现各种围岩和跨度条件下的全断面机械化快速施工。而随着我国隧道工程不断突破传统修建环境及结构形式,有必要借鉴新意法先进的施工理念,并结合国内现状,逐步形成一套适合我国国情的软弱围岩隧道全断面机械化设计施工体系。

## 参考文献:

- [1] 王梦恕,谭忠盛. 中国隧道及地下工程修建技术[J]. 中国工程科学, 2010, (12): 4-10.
- [2] 马健,孙守增,赵文义,等. 中国隧道工程学术综述·2015[J]. 中国公路学报, 2015, 28(5): 1-65.
- [3] Pietro Lunardi. The Design and Construction of Tunnels Using The Approach Based on The Analysis of Controlled Deformation in Rocks and Soils[J]. Tunnels & tunneling International ADECO-RS Approach, 2000, (5): 3-30.
- [4] 翟进营,杨会军,王莉莉. “新意法”在国外隧道工程中的应用[J]. 隧道建设, 2008, 28(4): 469-475.
- [5] Lunardi P, Barla G. Full Face Excavation in Difficult Ground[J]. Geomechanik Und Tunnelbau, 2014, 7(5): 461-468.
- [6] Barla G. Full-face Excavation of Large Tunnels In difficult conditions[J]. Journal of Rock Mechanics & Geotechnical Engineering, 2016, 8(3): 294-303.
- [7] Oreste P P, Dias D. Stabilisation of the Excavation Face in Shallow Tunnels Using Fibreglass Dowels[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2012, 45(4): 499-517.
- [8] 李世才. 桃树坪隧道富水未成岩粉细砂试验段施工技术[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(4): 111-119.
- [9] 李斌,漆泰岳,旷文涛,等. 新意法在浏阳河隧道参数设计中的应用[J]. 现代隧道技术, 2009, 46(4): 83-88.
- [10] 陈育民,徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例·第二版[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2013.
- [11] Cantieni L, Anagnostou G, Hug R. Interpretation of Core Extrusion Measurements When Tunnelling Through Squeezing Ground[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2011, 44(6): 641-670.

# Research on the Effect of Full Face Pre-reinforcement in Tunnel based on ADECO-RS

TANG Yong-san<sup>1</sup>, LIN Jian-fei<sup>2</sup>, YE Fei<sup>3</sup>, SONG Jing<sup>3</sup>, ZHAO Ru-liang<sup>3</sup>

(1. Fujian Expressway Construction Headquarters, Fuzhou 350001, China;

2. Putian Meiyu Expressway Co. Ltd., Putian 351100, China;

3. School of Highway, Changan University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** Based on the basic theory of ADECO-RS and Qishan Tunnel project on the Meizhouwan-

# 软岩隧道横洞施工对主洞衬砌结构影响分析

王 凯<sup>1</sup>, 俞焕庆<sup>1</sup>, 王 忠<sup>1</sup>, 龚元军<sup>1</sup>, 徐旭东<sup>1</sup>, 晏长根<sup>2</sup>

(1. 宁波交通建设工程试验检测中心有限公司 宁波市 315121; 2. 长安大学公路学院 西安市 710064)

**摘 要:** 针对隧道中先浇筑主洞衬砌结构后进行横洞开挖的施工工序中横洞施工对主洞衬砌结构形变破坏的影响,以某软岩隧道为工程依托,通过隧道衬砌应力监测、初支结构形变监测以及横洞施工时主洞衬砌结构形变破坏的监测,对深埋软岩隧道横洞施工对主洞衬砌结构形变破坏影响进行了研究与分析。研究表明,隧道交叉段围岩形变量较大,围岩形变速率较大,最大水平收敛位移达到 537 mm。最大拱顶下沉值达到 346.1 mm,围岩形变速率平均值达到 9.93 mm/d;依托工程隧道衬砌为主要受力结构,受力随着时间呈逐渐增大趋势。局部位置处形成应力集中区,应力值达到 1.13 MPa 和 1.03 MPa。衬砌混凝土在左拱脚与右拱腰位置处呈现受压状态,最大压应力值为 0.889 MPa。拱顶呈受拉状态,最大拉应力值为 6.45 MPa。深埋软岩隧道中的横洞施工对主洞衬砌结构的形变破坏有着较为严重的影响,影响范围达到 140 m。在此软岩隧道中不宜采用先浇筑主洞衬砌结构后对横洞进行爆破开挖的施工工法。

**关键词:** 软岩隧道; 应力监测; 横洞施工; 主洞衬砌; 形变破坏; 分析

随着我国地下工程的不断发展,逐渐在一些特殊复杂的地区进行了隧道的修建。一直以来隧道中横洞与主洞交叉连接段的受力问题是学者们研究的热点。为了防止隧道在运营过程中突发的险情对人员与车辆的安全造成危害,在隧道的修建中,必须在一定距离范围内修建横洞(人行横洞、车行横洞以及机房等)与主洞交叉连接。隧道中的隧道洞身交叉连接处的受力是极为复杂的<sup>[1]</sup>,尤其在软岩隧道中,横洞施工对主洞的围岩与衬砌结构的受力以及形变

有着较为显著的影响。目前对隧道交叉段的研究主要是依托数值模拟进行研究,如史彦文等<sup>[2]</sup>通过数值模拟分析了大断面公路隧道交叉口的受力行为,提出了大断面公路隧道优先施做主洞二衬再进行横洞的开挖;黄明等<sup>[3]</sup>通过有限元数值模拟对深埋长大隧道交叉段的衬砌裂缝成因进行了分析;刘山洪等<sup>[4]</sup>通过对车行横洞主洞交叉段局部失稳进行的数值模拟分析得出了,地应力和结构应力集中是导致局部开裂并影响交叉段稳定性的两大关键因素;孙

收稿日期:2017-03-20

Chongqing Expressway, the full-face excavation under pre-consolidation with fiberglass bolts is simulated by finite difference program, and the effect is verified by comparison with the condition of traditional method in extrusion, convergence and the stress distribution within the advance core. The results are as follows: (1) pre-reinforcement measures can reduce the extrusion deformation within a certain scope, but has no effect on the influence zone ahead of the face; (2) the maximum extrusion of both conditions appear in the center of face, the decrease of extrusion displacement by pre-reinforcement is also most obvious in the centre; (3) the distribution characteristics of the pre-convergence in two conditions are identical with extrusion displacement, but pre-reinforcement has no control effect on rear convergence behind the face; and (4) the scope of arch effect in two conditions are basically identical, and the arch effect ahead of the face can be strengthened under pre-consolidation.

**Key words:** ADECO-RS; full face pre-reinforcement; advance core; numerical simulation; study