

# 公路双连拱隧道三导洞法施工过程的力学分析

夏永旭 王文正 胡庆安

(长安大学公路学院, 西安, 710064)

**摘要:**应用有限元数值方法,对双连拱隧道“三导洞法”施工时围岩和结构的受力、变形规律进行了详细分析。在两正洞拱部施工的时候,左右洞拱顶沉降约占最终沉降的70%。中墙受到偏载作用,不仅产生整体偏转,而且在偏转的同时产生扭转,引起墙体中部向左侧凸出的弯曲变形。二次衬砌分先后洞全断面一次浇筑时,围岩的底板隆起和拱顶沉降减小,边墙水平收敛增大,围岩稳定性增强。因此,在双连拱隧道设计与施工中,超前隧道初期支护,尤其中墙顶拱脚处应予以加强;后进隧道一侧的中隔墙底部必须回填;中隔墙底部要设计足够的抗拉钢筋。

**关键词:**隧道工程 双连拱隧道 线弹性模型 施工过程 力学分析

关于双连拱隧道的施工,根据围岩类别和隧道结构断面形状的不同,以及对地表沉降控制要求的不同,所用的开挖方法也不同,文献[2]已经通过数值模拟证明三导洞法在II类围岩中最好。本文在文献[2]的基础上,研究使用三导洞法修建双连拱隧道施工过程中围岩和支护结构的应力、应变规律。

## 1. 基本计算模型

本文计算模型为线弹性平面应变模型,岩体初始应力场仅考虑其自重应力,隧道初期支护只考虑锚杆和喷混凝土的作用。围岩为II类,假设开挖瞬间地应力释放40%,初期支护施作后释放其余60%。隧道开挖宽度为23.96m,开挖高度为9.26m,单跨采用单心圆,边墙为曲墙,中墙为直墙,墙厚1.6m。围岩弹性模量1.2GPa,波松比0.4,容重20kN/m<sup>3</sup>;混凝土弹性模量26GPa,波松比0.2,容重23kN/m<sup>3</sup>。隧道施工模拟采用有限元数值方法,程序为ANSYS。计算模型范围水平方向100m,隧道上部取至自然边界,下边30m。模型底部完全固定,两侧无水平位移。

## 2. 三导洞法施工的基本工序

计算中三导洞法施工工序为:(1)计算自重应力场;(2)中导洞开挖;(3)中导洞初期支护,中墙浇筑;(4)左、右导洞开挖;(5)左、右导洞支护;(6)中墙顶及左侧回填,右洞拱部开挖;(7)右洞拱部初期支护;(8)右洞核心土开挖;(9)右洞仰拱浇筑;(10)左洞拱部开挖;(11)左洞拱部初期支护;(12)左洞核心土开挖;(13)左洞仰拱浇筑。

## 3. 数值模拟过程及结果分析

### 3.1 围岩位移变化规律

#### 1) 拱顶沉降

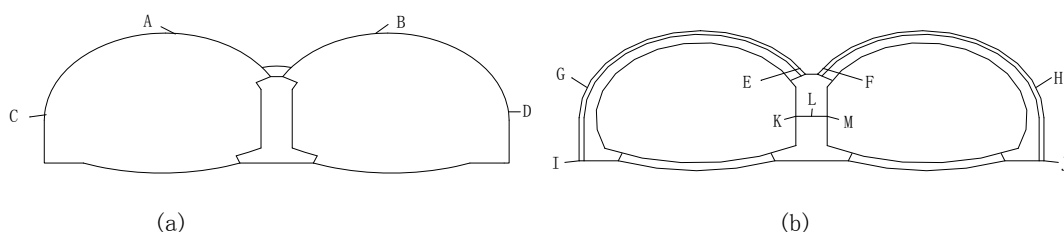


图1 特征点位置

选择左右洞开挖边界上拱顶最终沉降值最大的两个特征点A和B,如图1(a)所示。从计算结果数据中提取A、B点在各个工序的沉降量,绘制其与施工工序的变化关系图2(a)。图2(b)为每个施工工序的沉降比例(某工序的沉降量累计/最终沉降量)。从图中可以看到,中导开挖支护后,A、B点沉降比例为12%;左右导洞开挖支护后,A、B点沉降比例为20%。正洞的施工过程由于左右洞的施工相互干扰,A、B点沉降有所不同。右洞拱部开挖支护后,A点沉降

比例为 30%，B 点沉降比例为 88%；右洞核心土开挖结束时，A、B 点沉降比例基本没有变化；左洞拱部支护结束时，A、B 点沉降比例已达 100%；左洞核心土开挖结束时，沉降没有变化。中导和左、右导洞施工产生的沉降约为最终

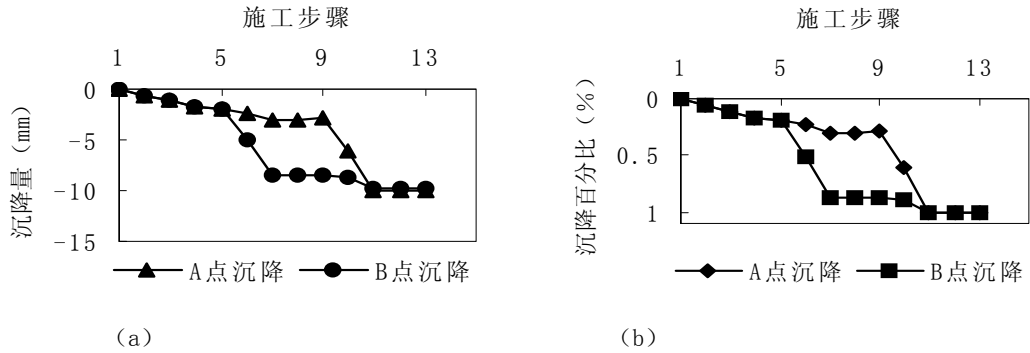


图 2 A、B 两点沉降随施工步骤的变化关系

沉降的五分之一；左右洞拱顶沉降显著的情况出现在两正洞拱部施工的时候，约占最终沉降的 70%；右洞的施工使左洞产生 10%的沉降比例；左洞施工使右洞产生 12%的沉降比例。

2) 洞边水平位移

选取边墙处两个特征点 C 和 D，其水平位移与施工步骤的关系如图 3 所示。可以看到，左右导洞施

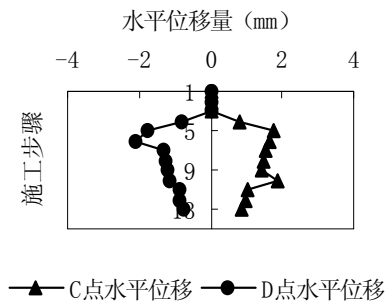


图 3 C、D 两点水平位移与施工步骤的关系

工结束时，C、D 点产生向洞内的收缩位移；右洞拱部开挖后，D 点的位移值达到最大。此后，D 点向内的收敛位移随施工的进行逐步减小；C 点在右洞施工时，其收敛位移值逐渐减小，待左洞拱部开挖后，其收敛值有所增大，在随后的施工中却又一直下降。最终，C 点的收敛值略大于 D 点。在整个施工过程中，左右边墙处的最大水平收敛都出现在正洞拱部开挖时，随着各洞后续工序的施作，收敛值逐渐减小。

3.2 初次支护结构应力变化规律

连拱隧道在施工中存在的一个主要问题，是后进坑道施工引起的围岩再分配应力作用在先进坑道的支护结构上，极易造成开裂。这里主要研究喷层和中墙的受力规律。特征点的选择如图 1(b)所示，其中 K、L、M 三点在同一截面上。

表 1 喷层应力  $\sigma_3$  (MPa)

特征点 工序	E	F
7		-10.98
8		-10.92
9		-10.84
10		-14.28
11	-9.68	-15.90

表 2 F 点应力发生率

工序	发生率 (%)
7	67
8	67
9	68
10	87
11	97

12	-9.62	-16.04
13	-9.51	-16.23

12	98
13	100

表 1 中列出了中墙顶拱脚处 E、F 点喷层压应力随施工步骤的变化值，可以看出右洞支护压应力明显大于左洞，应作为考察的重点。为便于比较，将 F 点的压应力发生率列入表 2。喷层压应力主要产生在左右洞拱部施工时，核心土的开挖对喷层压应力影响很小。后进坑道的施工使得 F 点的喷层压应力发生率上升了 32%，说明后进坑道对先进坑道的影响显著。施工结束时，先进坑道中墙顶拱脚喷层压应力远大于后进坑道。因此先进坑道中墙顶拱脚处初期支护应予以加强，并在施工中加强对其监控量测。

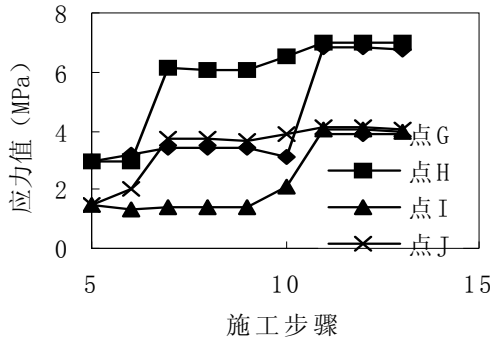


图 4 喷层应力变化曲线

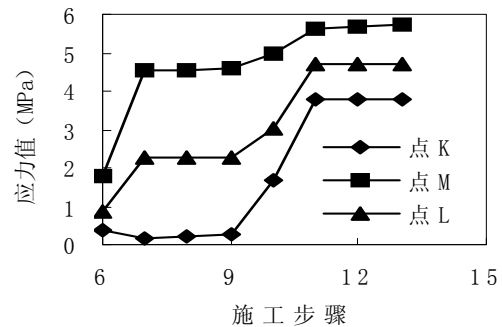


图 5 中墙应力变化曲线

图 4 表示的是左右洞拱腰和边墙拐角处 G、H、I、J 四点，喷层压应力随施工工序的变化曲线。正洞拱部施作支护时，拱腰处喷层压应力急剧增长，核心土开挖对拱腰处喷层应力影响很小。右洞施工时，左洞拱腰喷层应力变化不大；左洞施工时，右洞拱腰喷层应力有一定幅度的增长，应力发生率上升 13%。施工完成时左右洞拱腰喷层应力值接近。边墙拐角处喷层应力有同样的变化规律。可见，先进坑道拱腰和边墙处喷层压应力受后进坑道的影响有一定增长，但远不如中墙顶拱脚喷层压应力增长显著；左右洞拱腰和边墙喷层最终压应力值接近。

文献[1]对中墙应力的初步分析，发现中墙顶端及其基部拐角处应力集中显著，而且拉应力区主要出现在中墙底部，墙身段没有产生拉应力。图 5 是中隔墙中段的同一截面上 K、L、M 三点应力随施工步骤的变化曲线。三点的压应力都随施工的进行而成阶梯状增长趋势，左右洞拱部施工时应力增长显著，从数值上来讲 M 点的应力值最大，L 点其次，K 点应力值最小，说明中墙墙身的同一截面在整个施工过程中压应力的分布是不均匀的。右洞施工时，K 点的受力很小，当左洞拱部施工时，K、L 点应力值却增幅较大，M 点亦有一定增幅。图 6 表示的是各施工步骤所取墙身截面 K、L、M 三点的应力分布情况。可以看出在整个施工过程中，中墙的中部一直承受偏压载荷，但是下部存在较大的拉应力。

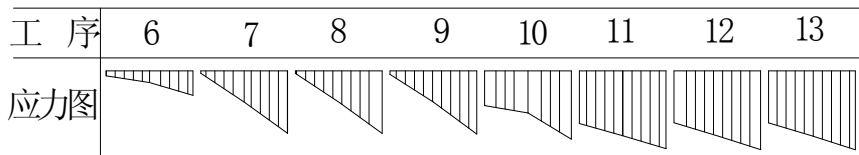


图 6 墙身截面应力分布图

### 3.3 施工因素对分隔墙的影响

双连拱隧道施工由于存在对围岩的多次扰动，围岩内部的应力历经多次调整，其中分隔墙是上、下行线间主要的承载结构，其受力及施工中载荷的转换十分复杂，往往要承受偏压作用。在前边分析时，为控制偏压右洞拱部开挖之前，中墙左侧和顶部都已作回填。而在实际施工中，要保证两处回填的质量比较困难，比如在进行中墙一侧的回填时，往往使用临时木支撑或工字钢横撑，其效用的发挥程度通常是有限的。因此，需要对施工中中墙侧不回填的情况进行模拟计算，探讨此时中墙的受力变形规律。

图 7 是其中两个施工步骤中墙  $\sigma_1$  等值线图。施工过程中中墙产生的最大压应力值为 17.9MPa，略大于回填时情况（17.7MPa）。与回填时不同，中墙左侧不回填而进行右洞拱部的施工时，在中墙左侧整个墙身段出现了拉应力区，且下半段应力值稍大，约在 1.3~2.6MPa 之间。中墙基部拉应力区范围及数值依然很大，达到 5.52MPa。右洞核心土开挖及仰拱浇筑后，中墙底部拉应力略有下降，而左侧拉应力略有上升。左洞拱部施工完成时，中墙墙身段拉应力区消失，转为受压。

图 8 是水平位移等值线图从中墙水平位移等值线图可以看出，右洞施工的时候，整个中墙都产生了水平位移，而其水平位移最大值始终发生在右侧，在底部仰拱浇筑后，最大值达到 1.65mm；从位移矢量图还可看出，中墙基部右侧相对左侧有所抬升，表明中墙发生了偏转。左洞开始施工后，中墙向左的水平位移逐渐减小，基部抬升也慢慢恢复，至整个左洞施工完成后，中墙仍保留部分的向左位移，其值已很小。

为更好地分析中墙的变形规律，选取中墙对称轴上的三个特征点，如图 9 所示。图 10 表示的是几个关键施工步骤中该截面的水平位移的大致分布情况。由于受到顶部回填及岩体的限制，顶端水平位移较小，而中部较大，因此中墙受到偏载作用时，其不仅产生简单的整体偏转，而且在偏转的同时产生扭曲，引起墙体中部向左侧凸出的弯曲变形。

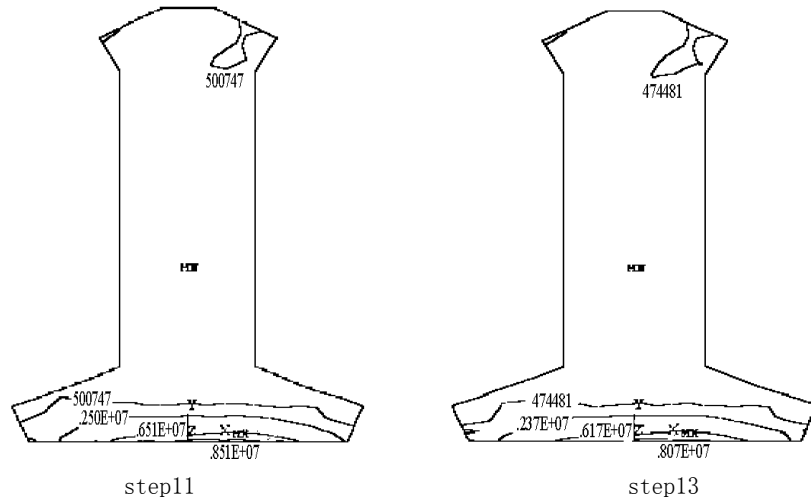


图 7 中墙  $\sigma_1$  等值线图

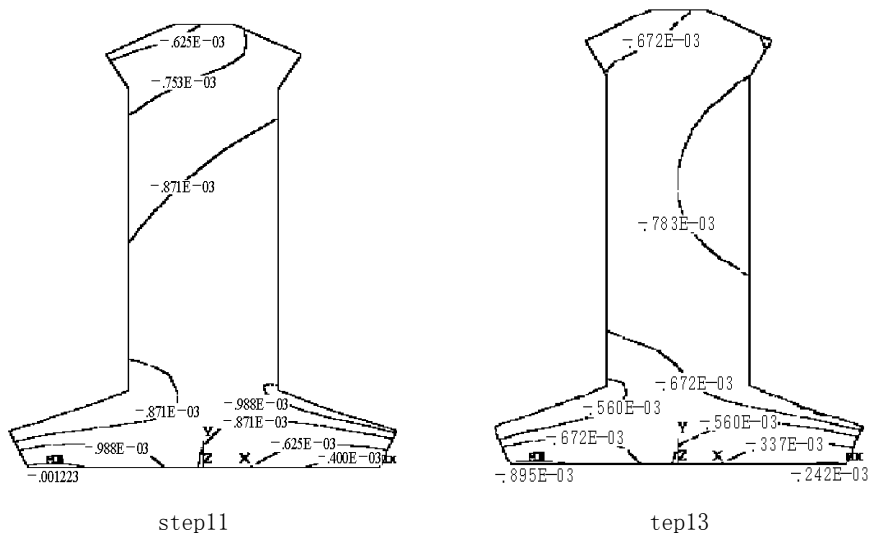


图 8 中墙水平位移等值线图

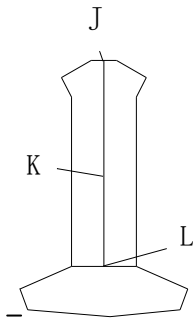


图9 特征点位置

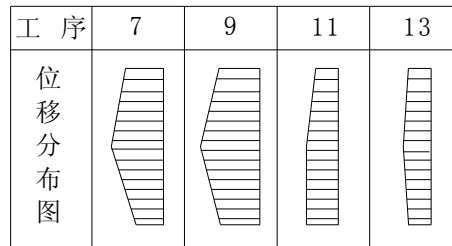


图10 中墙截面水平位移分布

### 3.4 二次衬砌的施工过程模拟

本节将考虑二次衬砌的作用，对双连拱隧道的施工过程作进一步的模拟分析。在施工工序中左右洞核心土开挖之前加入浇筑二衬混凝土（全断面一次完成）这一工序，同时假定开挖瞬间地应力的释放率为30%，初期支护完成后又释放40%，二衬完成后释放其余30%。围岩应力和位移以及支护结构的应力计算结果分别列入表3和表4中。

表3 围岩应力及位移计算结果

内 容 工 序	围岩应力 (MPa)		围岩位移 (mm)			
	$\sigma_{1max}$	$\sigma_{3min}$	$U_{xmax}$	$U_{xmin}$	$U_{ymax}$	$U_{ymin}$
右洞拱部支护	0.94	-4.13	2.515	-2.910	8.000	-6.916
右洞完成施工	0.82	-4.6	2.340	-2.288	9.300	-8.026
左洞拱部支护	0.75	-4.68	2.660	-1.928	9.504	-9.144
左洞完成施工	0.54	-4.81	1.742	-1.841	9.240	-9.087

表4 支护结构应力计算结果

内 容 工 序	喷层应力 (MPa)		中墙应力 (MPa)		二衬应力 (MPa)		锚杆应力 (MPa)	
	$\sigma_{1max}$	$\sigma_{3min}$	$\sigma_{1max}$	$\sigma_{3min}$	$\sigma_{1max}$	$\sigma_{3min}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$
右洞拱部支护	1.71	-14.62	3.21	-8.77			75.9	-1.79
右洞完成施工	2.07	-17.53	7.69	-17.42	3.27	-4.10	82.5	-47.1
左洞拱部支护	3.68	-13.10	9.16	-19.24	3.64	-4.87	76.3	-71.2
左洞完成施工	5.57	-13.84	10.82	-20.60	3.43	-5.97	85.2	-80.0

与只考虑初期支护时相比，当地应力的瞬间释放率同为30%时，考虑二衬作用的情况下，围岩的压应力有所减小，拉应力也有很大程度的降低；因考虑到左右侧导稳定后才进行正洞施工，计算时假定二衬施作时侧导边墙处的地应力已完全释放，所以围岩的水平收敛增加，而二衬的施作限制了隧道顶部和底部围岩的变形，底板隆起及拱顶沉降都有不同程度的减小。

施工过程中，特别是右洞拱部施工时，中导洞左侧拱腰处的临时喷层的压应力超过了正洞永久喷层的压应力，最大值达到17.5MPa，说明施工过程中中导洞的临时支护承受了较大的载荷，其强度不应低于正洞支护。施工结束时，喷层压应力的最大值出现在边墙位置，为13.8MPa。中导顶部喷层在中墙受力后出现拉应力。锚杆轴应力值略有降低，数值变化不大。

二次衬砌的施作，使得中隔墙的拉压应力都有所增加。当右洞的二衬施作后，中墙的左侧在有回填的情况下仍然出现了拉应力区，说明中墙由于右洞二衬的施作（左右洞分开施作）而承受了较大的偏载作用产生扭曲，所以中墙侧的回填是非常重要的。左洞施工后拉应力消失，中墙左侧逐渐转为承受压应力。中墙底部最终拉应力最大值达到

10.8MPa, 远远超出了混凝土的极限拉应力, 应特别引起注意。二次衬砌压应力值较大的区域主要在曲边墙和拱部与中墙接触的拱脚处, 其值最大为 5.94MPa, 且右洞衬砌值略大于左洞; 底板的隆起使二衬在边墙底部位置因受到剪切作用而出现拉应力区, 拉应力最大值为 3.43MPa, 其他位置没有出现拉应力。

### 3.5 结果分析

归纳上述分析结果, 可以看到:

(1) 中导和左、右导洞施工产生的拱顶沉降约为最终沉降的五分之一; 左右洞拱顶沉降显著的情况出现在两正洞拱部施工的时候; 左右边墙处的最大水平收敛都出现在正洞拱部开挖时, 随后随着各洞后续工序的施作, 收敛值逐步减小。

(2) 后进坑道对先进坑道的影响显著, 且先进坑道中墙顶拱脚喷层最终压应力远大于后进坑道; 先进坑道拱腰和边墙处喷层压应力受后进坑道的影响有一定增长, 但远不如中墙顶拱脚喷层压应力增长显著, 左右洞拱腰和边墙喷层最终压应力值接近。

(3) 当中墙左侧不回填而进行右洞拱部的施工时, 在中墙左侧整个墙身段出现了拉应力区, 且下半段应力值稍大。施工过程中, 中墙受到偏载作用, 不仅产生整体偏转, 而且在偏转的同时产生扭转, 引起墙体中部向左侧凸出的弯曲变形。

(4) 二次衬砌分先后洞全断面一次浇筑时, 围岩的底板隆起和拱顶沉降减小, 边墙水平收敛增大, 围岩稳定性增强, 应力值降低。初期支护所受压应力降低。锚杆受力基本未变。中墙基部拐角应力集中处压应力值增大, 同时底部拉应力也有所增加。

## 4 结论

- (1) 双连拱隧道施工过程中超前隧道的初期支护尤其中墙顶拱脚处应予以加强, 并在施工中加强对其监控量测;
- (2) 后进洞一侧的中隔墙底部必须回填, 以降低中隔墙的变形;
- (3) 中隔墙底部应该布设足够的钢筋, 防止墙底的拉应力过大引起混凝土开裂;
- (4) 应该尽可能早的施做仰拱, 减低隧道底部的隆起。另外二次衬砌也要尽早施做, 减少初次衬砌的受力, 防止其出现过大的变形和位移。

### 参考文献

- [1] 中华人民共和国交通部:《公路隧道设计规范》(JTJ 026-90)(S), 北京:人民交通出版社, 1990
- [2] 王文正, 双联拱公路隧道开挖方法及施工过程数值模拟研究(D), 西安:长安大学, 2003
- [3] 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分析(M), 长安大学学报(自然科学版), 2005, 25(1):48~50
- [4] 夏永旭、王永东:《隧道结构力学计算》, 北京:人民交通出版社, 2004.8
- [5] 夏永旭、裘军良、王永东: 人工神经网络在公路隧道支护设计中的应用(M), 长安大学学报(自然科学版), 2005, 25(2):69~72
- [6] 赵德安、雷晓燕、Swoboda G, 单双层衬砌隧道的非线性有限元分析[M], 中国公路学报, 2003, 16(1): 62~67

### References

- [1] Ministry of Communications of the People' s Republic of China: 《Design Criterion of Highway Tunnel》 (JTJ 026-90) (S) , Beijing: People' s Communications Press, 1990
- [2] Wang Wenzheng, Research on Excavation Method and Numerical simulation of the Construction Process of Highway Double-arch Tunnel [D], Xi' an: Chang' an University, 2003
- [3] Hu Qing' an, Xia Yongxu, Wang Wenzheng: Three-Dimensioned Numerical simulation of the Construction Process of Highway Double-arch Tunnel (M), Transaction of Chang' an University, 2005, 25(1):48~50
- [4] Xia Yongxu, Wang Yongdong: 《Mechanical Computation of Tunnel Construction》 , Beijing: People' s Communications Press, 2004.8
- [5] Xia Yongxu, Qiu Junliang, Wang Yongdong: Application of artificial nerve-cell-network in the support design of highway tunnel (M), Transaction of Chang' an University, 2005, 25(2):69~72
- [6] ZHAO De-an, LEI Xiao-yan, SWOBODA G, Nonlinear FEM analysis for single and double lining tunnels(M), China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1):62~67

### **Mechanical Analysis on the Construction Process of the Three-heading Excavation Method of Highway Double-arch Tunnel**

Xia Yongxu Wang Wenzheng Hu Qing' an  
(Highway College, Chang' an University, Xi' an, 710064)

**Abstract:** By FME numerical method, analysis on the regularity of stress and strain of surrounding rock and support structure is carried out in detail as using three-heading excavation method to construct double-arc tunnel. The settlement of the two tunnels' arc crown occurs during the construction of arc part covers 70% of the final settlement. Bearing uneven load, the mid-partition not only deflects as a whole, but also twists at the same time, which makes the middle part of it bulges to the left. When the secondary lining of the lead tunnel is pouring full-face and the latter tunnel' s follows, the bottom leave and the settlement of arc crown decrease, the horizontal convergence increases and the stability of surrounding rock is intensified. The initial support of the lead tunnel, especially the part on the top of mid-partition, should be strengthened, the foot of the latter tunnel at the side of the mid-partition must be backfilled, and the bottom of the mid-partition must have enough reinforcing steel bar during the design and construction process of double-arc tunnel.

**Key Words:** Engineering of tunnel Double-arch Tunnel Elastic Model Construction Process Mechanical Analysis

夏永旭, 陕西武功人, 1953年12月生, 道路与铁道工程博士, 长安大学公路学院教授, 桥梁与隧道专业博士生导师。主要从事公路隧道结构理论、公路隧道运营通风及防灾救灾和结构工程数值方法研究。

通讯地址: 西安市南二环中段长安大学 330 信箱, 710064; 电话: 029-88498307; E-mail yongxuxia@sohu.com