

戴云山隧道燕尾段施工数值仿真分析

宋 杨^{1,2}, 娄国充¹, 高云娇¹

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 中国兵器工业北方勘察设计研究院有限公司, 河北 石家庄 050011)

摘要: 国内外燕尾式隧道的修建起步较晚, 相应的技术难度较大, 缺少施工经验和技术标准。利用大型有限元软件对新建向莆铁路戴云山隧道燕尾段工程开挖进行了仿真模拟, 通过对围岩应力场、位移场和支护体系受力特点的分析研究, 指出大跨段拱顶下沉和拱底回弹较大, 连拱段中墙上部岩体最为脆弱、中墙偏移、墙身偏压、墙底受拉, 小净距段中夹岩柱承受压力较大。针对上述问题, 提出了相应的施工建议与对策, 对燕尾段现场施工具有一定的指导意义。

关键词: 燕尾式隧道; 数值模拟; 断层破碎带; 施工对策

中图分类号: U457 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2013)04-0038-05

0 引言

燕尾式隧道是近年来国内出现的一种新型的隧道结构形式, 它由大跨加宽段、连拱段、小净距段和分离段组合而成, 较普通隧道结构复杂, 开挖跨度较大且断面结构型式变化频繁, 围岩经受多次扰动, 稳定性差, 给施工带来了极大的难度^[1-2], 引起工程界的普遍关注。张家新等人利用 ABAQUS 有限元程序建立了八字岭隧道数值模型, 模拟了其不同洞段的开挖过程, 提出合理的支护形式参数^[3]; 胡剑兵利用大型有限元软件对八字岭隧道施工过程进行数值模拟, 分析了围岩变化和破坏的特性^[4]; 王汉鹏等人建立了八字岭分岔隧道的三维数值模型, 得到了隧道围岩的位移、应力和损伤屈服区^[5]等, 前人的研究一般集中于理论和力学性质研究, 对燕尾段隧道的施工方法及技术措施分析较少。本文根据数值模拟结果, 从指导现场施工的角度指出燕尾式隧道在施工过程中将会遇到的重难点问题并提出相应的施工对策, 可为同类隧道的设计施工提供科学的依据与参考。

1 工程概况

戴云山隧道位于福建省福州市与三明市交界处, 是新建向莆铁路重点控制性工程之一。隧道燕尾段处于 F4 断层影响带范围之内, F4 断层产状 $165^{\circ} \angle 60^{\circ}$, 与线路交角约为 45° ; 断层以密集节带的形式表现, 局部沿节理面产生水平滑移, 地表宽度约为 3 m, 长度为 800 m; 该断层为左旋平移断层, 其上盘影响宽度约为 20 m, 下盘影响宽度约为 10 m, 在影响范围之内的岩石节理裂隙相对发育, 岩石破碎, 地下水为构造裂隙水, 较发育, 为强富水区。燕尾段围岩分级如表 1 所示。

表 1 隧道燕尾段围岩分级

里程	长度/m	围岩级别	隧道结构型式	备注
DK422+950~DK423+520	570	IV	大跨+连拱	煤系地层局部软弱夹层
DK423+520~DK423+540	20	IV	连拱	F4 断层影响带
DK423+540~DK423+560	20	V	连拱	F4 断层
DK423+560~DK423+580	20	IV	连拱	F4 断层影响带
DK423+580~DK423+888	308	III	小净距	III 级围岩

燕尾段埋深为 125~365 m 之间, 其中大跨加宽段最大开挖跨度 21.01 m, 开挖高度 15.82 m, 开挖面积达到 267.9 m²。隧道大跨段采用三台阶法进行开挖, 连拱段以中导洞超前, 右洞全断面先行开挖, 小净

收稿日期: 2013-01-08

作者简介: 宋 杨 男 1987 年出生 硕士研究生

距段采用右洞全断面先行,左洞全断面再开挖。隧道燕尾段采用 $\Phi 42$ 超前小导管支护,长度 4 m,间距 40 cm;径向注浆锚杆长度 4 m,间距环向 1.0 m,纵向 1.0 m;开挖后采用 I22a 型钢和 I18 型钢钢拱架网喷,钢拱架间距 60 cm,喷射混凝土为 C25 合成纤维,厚度 30 cm,二次衬砌为 C35 钢筋混凝土,厚度 60 cm。

2 数值模拟分析

2.1 建立有限元模型

数值模拟采用地层—结构模型,将支护结构与围岩视为一体,作为共同承载的隧道结构体系。燕尾段局部网格划分如图 1 所示。

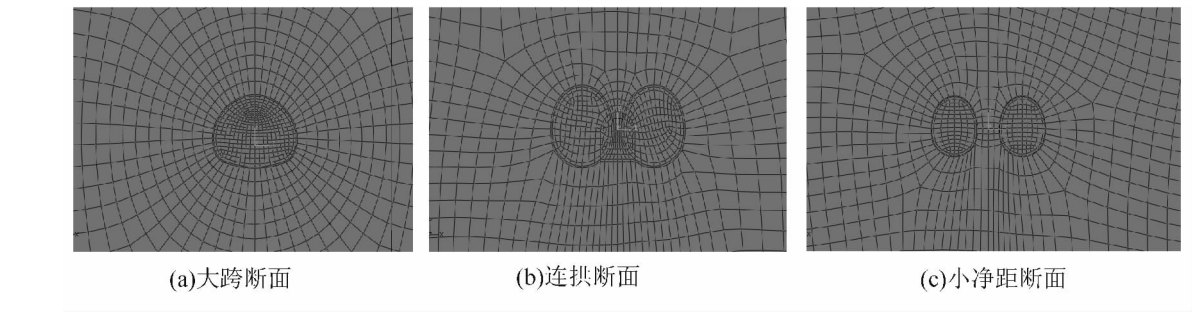


图 1 燕尾段模型及网格划分

有限元模型计算范围在水平方向左右两侧取值为隧道跨度的 3~4 倍,竖直方向向上取至地表,本次模拟大跨断面埋深 130 m,连拱断面埋深 210 m,小净距断面埋深 350 m,向下取值为隧道开挖轮廓尺寸的 3~4 倍;边界条件设置为位移边界条件,左右两侧和底面均为法向约束条件,上部顶面为自由边界;岩体本构模型选用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型;围岩自重应力场作为初始应力场;钢拱架模拟采用弹模等效原则折算给初喷混凝土层;围岩与初衬单元采用 CPE4R 4 节点平面应变积分单元,锚杆采用 T2D2 二维二节点桁架单元^[6]。材料参数列于表 2,数值模拟开挖步序如图 2 所示。

表 2 计算模型的材料参数

材料名称	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	内摩擦角 $c/(\text{°})$	剪胀角 $\varphi/(\text{°})$	粘聚力/ MPa	备注
大跨段围岩	2 000	3.0	0.35	27	24	0.45	IV 级围岩
连拱段围岩	2 000	3.0	0.35	27	24	0.45	IV 级围岩
小净距段围岩	2 300	6.0	0.3	39	36	0.7	III 级围岩
初期支护	2 400	23.0	0.2				C25 混凝土
二次衬砌	2 500	32.0	0.2				C35 混凝土
中隔墙	2 300	28.0	0.2				C20 混凝土
锚杆	7 800	200.0	0.2				$\Phi 22$

2.2 围岩应力场分析

由计算得到的围岩应力云图如图 3 所示。由图 3 可以看出,大跨段开挖过程中,拱底出现拉应力,数值为 0.038 MPa,左右边墙位置处所受压应力较大,应力值为 9.096 MPa;连拱段开挖过程中,左右两洞拱底处最大值应力值较大,但均无拉应力产生,中墙上方岩体所受压应力较大,为 8.582 MPa;小净距段开挖过程中,先行右洞拱顶、后行左洞拱顶和拱底均不同程度的出现了拉应力,尤其以后行左洞拱底拉应力较大,为 0.078 MPa,中夹岩柱承受压力为 12.37 MPa;根据围岩应力分布情况可以确定洞周围岩基本稳定^[7],其中大跨段边墙处围岩、连拱段中隔墙上方岩体和小净距段中夹岩柱应力值较大,在整个燕尾段开挖过程中需加强重点保护。

2.3 位移场分析

燕尾段开挖后位移矢量如图 4 所示,其中大跨段拱顶沉降 11.59 mm,拱底回弹 12.5 mm;连拱段先行右洞拱顶沉降 8.38 mm,拱底回弹 8.80 mm,后行左洞拱底沉降 8.11 mm,拱底回弹 8.79 mm;小净距段先行右洞拱顶沉降 4.67 mm,拱底回弹 5.12 mm,后行左洞拱顶沉降 4.65 mm,拱底回弹 5.06 mm;从围岩最

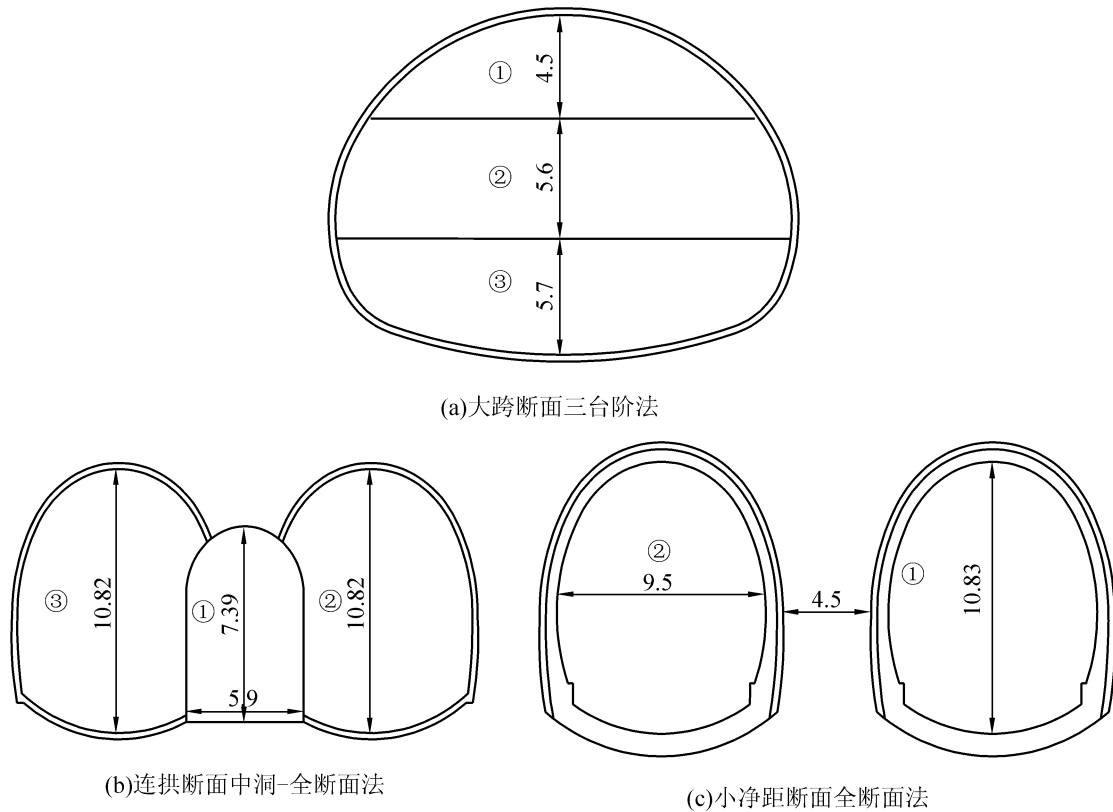


图 2 燕尾段开挖模拟步骤图(单位: m)

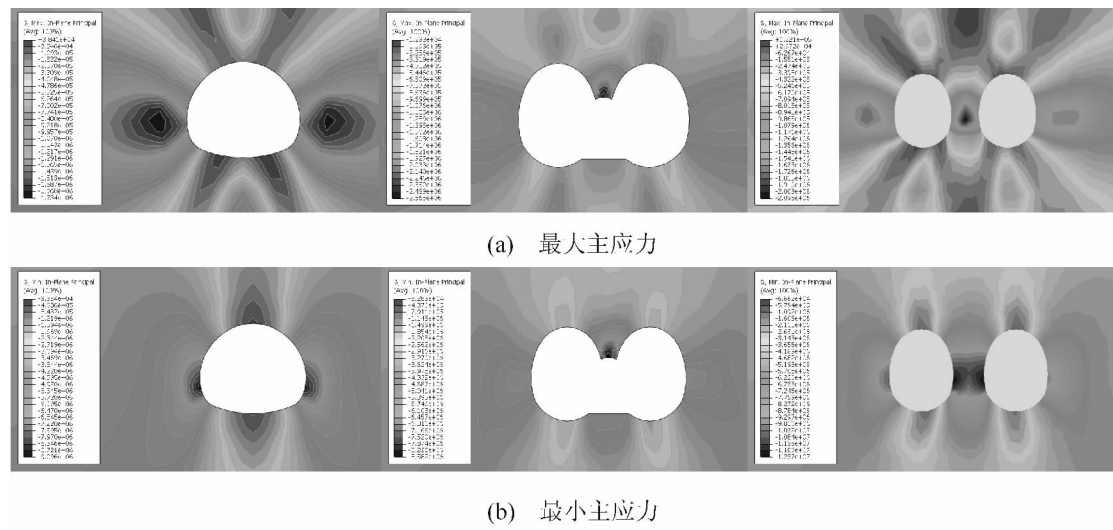


图 3 围岩应力分布云图(单位: MPa)

终收敛情况可以判定洞周围岩基本稳定,整个燕尾段拱顶沉降与拱顶回弹以大跨段变化最为显著,连拱段次之,小净距段变形最小;纵向来看,燕尾段拱底回弹量均大于拱顶沉降量,尤其在高地应力情况下遇到局部软弱夹层或膨胀性围岩时,由于洞底开挖使上部围岩压力解除,应力得到释放,加之洞室积水,很可能造成洞底围岩隆起变形,因此施工过程中应及时排出拱底积水,并注意仰拱施作的及时性,以有效控制洞底的隆起变形;应特别注意的是,连拱段位移矢量图显示中隔墙出现了整体向左偏移的现象,因此应采取必要的措施防止中隔墙发生偏移。

2.4 连拱段中隔墙应力分析

数值模拟所选断面处中隔墙高度为 6.61 m,墙顶宽度 1.64 m,墙底宽度 3.96 m。为便于分析中隔墙

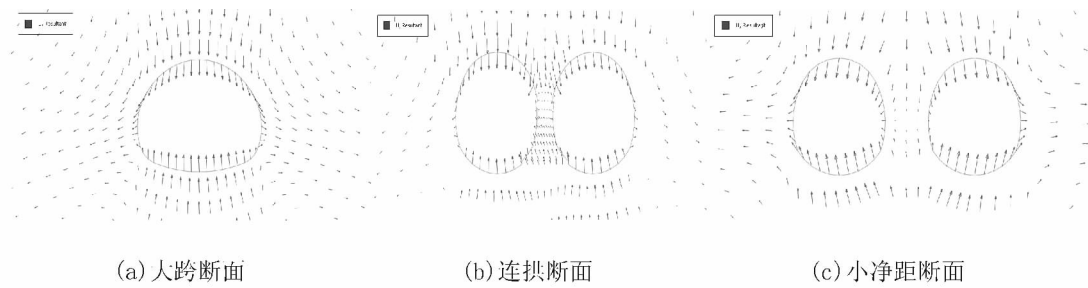


图 4 燕尾段位移矢量图

应力动态变化情况,选取中隔墙左、右墙壁中点和墙底中点为应力分析的关键点。中隔墙应力分布如图 5 所示。

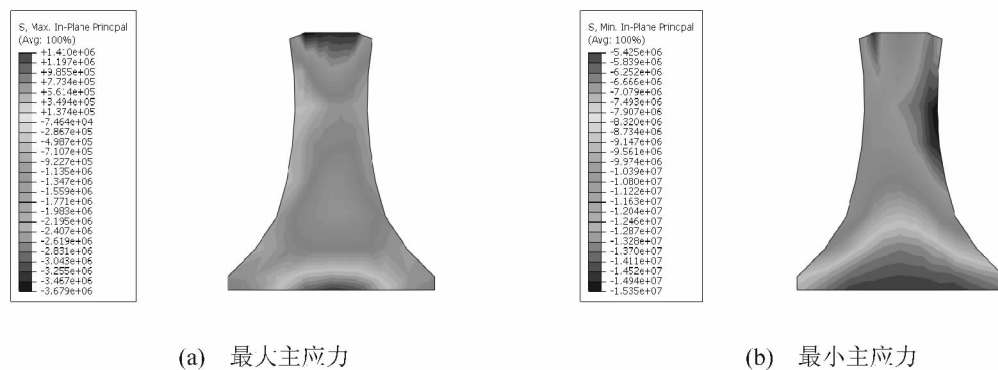


图 5 连拱段全断面法开挖后中隔墙应力云图 (单位: MPa)

中洞开挖中隔墙施作后,左、右墙壁中点压力值为 6.322 MPa,墙底压力为 0.484 MPa;先行右洞支护完成后,中墙右壁中点压应力增长为 13.233 MPa,相对于上一步的应力增量为 6.911 MPa,左壁中点压应力增长为 6.46 MPa,墙底中点压应力减小为 0.208 MPa;后行左洞开挖后,中墙右壁中点压应力增长为 14.919 MPa,增量为 1.686 MPa,左壁中点压应力增长为 11.391 MPa,墙底中点由压转拉,拉应力为 1.407 MPa。根据中墙左右边墙和墙底的三个关键点的应力变化情况可以看出中隔墙受力在其材料强度允许范围之内,整个施工过程中,先行右洞开挖后,中隔墙出现了明显的偏压受力,右侧压应力明显大于左侧,待后行左洞开挖后,中隔墙偏压受力情况才得以改善,中隔墙墙底应力在后行左洞开挖后由压变拉。

2.5 初期支护应力分析

初期支护最终应力分布情况列于表 3。

表 3 燕尾段初期支护应力值

隧道 结构型式	初期喷射混凝土层				系统锚杆	
	最大主应力	出现位置	最小主应力	出现位置	最大主应力	出现位置
大跨度	1.87	拱底	-12.76	边墙	217.0	拱腰
连拱	0.880	中墙上方	-17.00	右洞左拱腰	197.4	左洞右拱腰
小净距	0.788	左洞拱底	-14.18	中夹岩柱侧壁	186.4	左洞右边墙偏上

根据燕尾段初期支护应力的模拟结果,可以看出初期支护体系基本处于安全状态,其中以大跨度拱底位置所受拉应力最为明显,因此施工过程中更应该注意仰拱施作的及时性,以使初期支护体系及时闭合成环,充分发挥支护作用,有效控制大跨隧道的变形收敛;初喷砼层压应力以连拱段先行右洞左拱腰处(即中隔墙右上方)最为显著,小净距段中夹岩柱次之,施工过程中应当注意对连拱段中墙上方岩体和小净距段中夹岩柱的保护;锚杆支护体系发挥的作用在大跨度中最为显著,连拱段次之,小净距段最小,拱腰位置处的锚杆所受拉应力最大。

3 结论

通过对戴云山隧道燕尾段开挖过程的数值模拟分析,得出以下结论与建议:

(1) 大跨段开挖后拱顶下沉与拱顶回弹量值较大,不但要采用超强小导管预支护措施,对工作面前方岩体进行预加固以控制拱顶沉降,防止坍塌险情发生,还应该及时施作隧道仰拱,使初期支护体系快速闭合环联合发挥作用,以有效抑制拱底回弹。

(2) 连拱段中隔墙上方岩体所受压应力最大,考虑到现场爆破开挖对该部分岩体的多次扰动,可以确定中隔墙上方岩体为整个连拱隧道的薄弱部位,所以中导洞开挖时应重视超前小导管施作的及时性,以加固中隔墙上方岩体。

(3) 连拱段中隔墙整体向左偏移,并表现出偏压和墙底受拉的力学特点,建议中墙基底采用地基锚杆锚固,清底回填与二衬等强度混凝土,以减小墙底拉应力,并有必要在后行左洞未开挖围岩与中墙之间施作钢支撑工程,以平衡先行右洞开挖后初支拱圈的推力,防止中隔墙向左偏移,减小中隔墙偏压程度。

(4) 小净距段中夹岩柱承受压力较大,很可能出现失稳破坏的情况,建议采用预裂爆破和光面爆破技术以减小对夹岩柱的震动影响,其次采用小导管注浆、系统锚杆、水平贯通预应力锚杆等方法加固中夹岩柱,及时施作初期支护,使中夹岩柱处于有利的三向受压状态。

参 考 文 献

- [1] 周有江. 燕尾式隧道设计及施工探讨[J]. 隧道建设, 2009, 29(3): 367-370.
- [2] 蔚立元, 李术才, 郭小红, 等. 分岔隧道过渡段稳定性研究[J]. 中国公路学报, 2011, 24(1): 89-95.
- [3] 张家新, 柳治国. 分岔隧道的围岩应力及变形数值分析[J]. 土工基础, 2009, 23(4): 33-36.
- [4] 胡剑兵, 乔春江, 杨林松, 等. 分岔隧道施工三维数值仿真模拟研究[J]. 公路, 2009(3): 193-199.
- [5] 王汉鹏, 李术才, 郑学芬. 偏压分岔隧道施工过程损伤破坏分析与优化研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1705-1710.
- [6] 陈卫忠, 伍国军, 贾善坡. ABAQUS 在隧道及地下工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [7] 张永利. 大跨度浅埋软弱围岩隧道施工方法比较[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2012, 25(1): 68-70.

Numerical Simulation on Excavation of Swallow-tailed Section of Daiyunshan Tunnel

Song Yang^{1, 2}, Lou Guochong¹, Gao Yunjiao¹

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. China North Industries Norengo Ltd, Shijiazhuang 050011, China)

Abstract: The building of the swallow-tailed tunnel is little at the present, which leads to the lack of construction experience and technical specification. The process of the swallow-tailed tunnel excavation is simulated by employing numerical method in the article. According to the result of the surrounding rock stress, the displacement and the stress of primary support system, the larger vault subsidence and bottom rebound in the large-span tunnel, the vulnerability of the rock above the middle wall, the shifting of the wall, the eccentric compression of the wall and the tension under the wall in the double-arched tunnel, and the high press stress of the shared rock in the neighborhood tunnel, the measures corresponding to the above mentioned problems are put forwards, which can make a reference for constructing swallow-tailed tunnel.

Key words: swallow-tailed tunnel; numerical simulation; fault fracture zone; construction countermeasures

(责任编辑 刘宪福)