

文章编号:0451-0712(2007)01-0188-03

中图分类号:U455.4

文献标识码:B

# 大断面连拱隧道施工方案研究

王 兵

(北京理工大学 北京市 100081)

**摘 要:** 针对青岛~兰州高速公路邯郸~涉县段台坡隧道的设计,运用有限元方法对三导洞法修建三车道连拱隧道进行了动态数值模拟,并且对三车道连拱隧道在施工过程中围岩的应力应变分布规律及位移的表现特点进行了分析,可为大断面连拱隧道的设计和施工提供依据。

**关键词:** 三车道连拱隧道;Ⅳ级围岩;数值模拟;三导洞法

随着我国经济的迅速发展,西部大开发战略的实施,西煤东运通道的不断开辟,山区高速公路的建设里程迅速增长,使得大断面山岭隧道应运而生,连拱隧道即是其中的一种。与分离式隧道相比,大断面连拱隧道具有以下优点:(1)避免了构造分离式路基,减少了占地;(2)在地形狭窄处利于洞口位置的选择,降低了布线难度;(3)可保持路线线形流畅,断面造型美观。为克服地形、地物的制约,短隧道采用连拱型式较多。连拱隧道虽然有诸多优点,但因开挖断面跨度较大,开挖与支护相互交错,施工过程中体系需经多次转换,使得围岩应力变化和衬砌荷载转换变得较为复杂,给设计和施工带来较大的困难。

目前国内已建成的连拱隧道多为两车道,三车道工程实例较少,可借鉴的施工经验少。本文结合青兰高速公路台坡隧道的设计,对三车道连拱隧道在施工过程中围岩的应力应变分布规律及位移的表现特点进行分析,从而为大断面连拱隧道的设计和施工提供依据。

## 1 基本方程

### 1.1 隧道开挖

在隧道施工中,对于各施工阶段的状态,其物理方程为:

$$[K]_i \{\Delta\delta\}_i = \{\Delta F_r\}_i + \{\Delta F_g\}_i + \{\Delta F_p\}_i \quad (1)$$

式中:  $[K]_i$  为岩土体和结构在第  $i$  施工步的总刚度;  $\{\Delta\delta\}_i$  为第  $i$  步的结点位移增量;  $\{\Delta F_r\}_i$  为

第  $i$  施工步开挖边界上的释放荷载的等效节点力;  $\{\Delta F_g\}_i$  为第  $i$  步新增自重的等效结点力;  $\{\Delta F_p\}_i$  为第  $i$  施工步增量荷载的等效结点力;  $L$  为隧道施工步。

### 1.2 衬砌的施作

为了隧道施工与运营的安全,通常在隧道开挖后再施作衬砌。根据弹塑性力学原理可知,隧道衬砌施作后,力学模型应满足以下公式:

$$[K + \Delta K] \{\delta\} = \{\Delta F_g^s\} \quad (2)$$

式中:  $K$  为结构施作前的系统刚度;  $\Delta K$  为施作结构的刚度;  $\{\delta\}$  为施作结构后的结点位移;  $\{\Delta F_g^s\}$  为施作结构自重的等效结点荷载。

### 1.3 结构的拆除

在临时支护的拆除过程中,围岩和支护的受力状态将发生改变,从而影响力度的变化,计算公式描述为:

$$[K - \Delta K] \{\delta\} = -\{F\} \quad (3)$$

式中:  $K$  为结构施作前的系统刚度;  $\Delta K$  为拆除结构的刚度;  $\{\delta\}$  为结构拆除后的结点位移;  $\{F\}$  为拆除结构内力的等效结点力。

## 2 施工方法

### 2.1 隧道断面形式

青兰高速公路是国家高速公路7918网中“横6”的组成部分,是河北省晋煤外运的主要通道,本路段设计标准为双向六车道高速公路,设计速度为80 km/h,建筑限界为14 m,净高5 m,采用复合式中墙结构,中墙最小厚度为2.6 m。

## 2.2 地质情况简介

路线位于河北省西南部太行山余脉,场地所处大地构造单元属“祁、吕、贺兰”山字形构造东翼边缘弧东侧的太行山麓背斜东翼,总体为一单斜构造,隧道洞身穿越区地层主要为古生界寒武系中统张厦组,岩性主要为灰岩,岩层倾角为 $7^\circ$ ,岩层走向与隧道轴线夹角为 $43^\circ$ ,围岩级别主要为Ⅲ、Ⅳ级。

## 2.3 施工方案

本文针对Ⅳ级围岩施工方案进行分析,最大开挖宽度为33.66 m,采用三导洞法。

本隧道按照先左后右的顺序施工,共分为7个大工序,15个小工序,见表1。

表1 三导洞法施工工序

大工序	小工序
一开挖中导洞	1 中导洞开挖
	2 临时支护
	3 中墙浇筑
	4 中墙右侧回填
二开挖两侧导洞	5 两侧导洞开挖
	6 两侧导洞支护
三开挖左洞中部上台阶	7 左洞上台阶开挖
	8 开挖部初期支护
四开挖左洞中部下台阶	9 左洞下台阶开挖
	10 开挖部初期支护、浇筑仰拱
五开挖右洞中部上台阶	11 右洞上台阶开挖
	12 开挖部初期支护
六开挖右洞中部下台阶	13 右洞下台阶开挖
	14 开挖部初期支护、浇筑仰拱
七二次衬砌	15 二次衬砌

## 3 隧道施工的数值模拟

### 3.1 模拟计算模型

根据地质资料及隧道断面尺寸,建立二维有限元模型,模型计算范围在水平方向取距隧道中心5倍单洞开挖宽度,下边界取为洞高的5倍,上边界取隧道的实际埋深。模型的边界条件采用施加约束的方法,在模型的底面加固定支座以约束所有自由度,在平行隧道走向的两侧施加滑动支座,只约束水平方向的自由度而释放垂直方向的自由度,以模拟岩体的沉降,总共划分了6 275个单元和3 521个节点,计算模型见图1所示。

在进行有限元计算时,围岩及混凝土的物理力学参数依据《公路岩体分级标准》(GB 50218-94)中相关参数确定,见表2。

### 3.2 计算结果分析

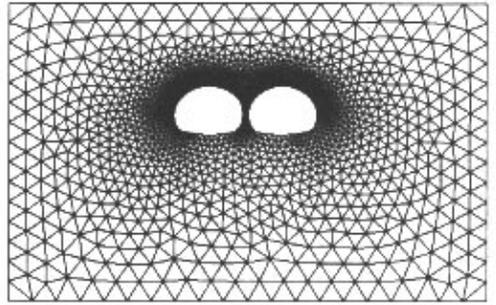


图1 有限元模型

表2 有限元计算物理力学参数

材料类型	Ⅳ级围岩	C20混凝土	C25混凝土
弹性模量 $E/\text{GPa}$	1.8	28	29
泊松比 $\mu$	0.32		
容重 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	21	23	25
内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	33		
内聚力 $c/\text{kPa}$	200		

### 3.2.1 围岩应力场分析

具有代表性的左洞拱部开挖、支护后的最大主应力和最小主应力曲线见图2、图3所示。由图可见,左洞拱部开挖、支护后,拱顶拉应力为4 kPa,压应力为0.6 MPa;边墙一直受压,压应力值为1.2 MPa。左洞拱部开挖、支护后,围岩应力骤增,施工时应采取相应措施,确保施工安全。左洞下台阶开挖、支护后,使得隧道顶部隆起,从而产生拉应力,此时需设置仰拱。右洞拱部开挖、支护后,围岩存在拉应力,但比较小,右洞开挖完毕且仰拱及二衬浇筑后,围岩应力场基本呈对称状分布。

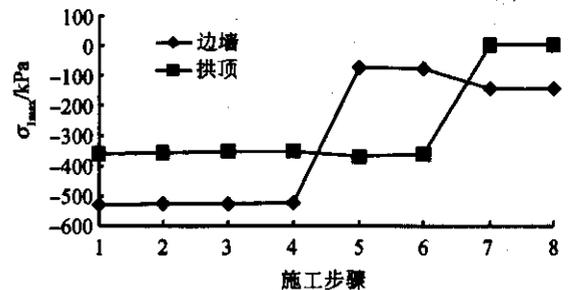


图2 左洞拱部开挖、支护完成前各步骤围岩最大主应力

### 3.2.2 围岩位移场分析

位移场的分析,主要考虑开挖后围岩竖向位移的大小,且着重对拱顶进行分析,研究它在各个施工步骤中位移的增量。图4为围岩在各施工步骤中的位移曲线。由图4可见,后施工的右洞室拱顶竖向位移略大于先施工的左洞室,其值分别为5.4 mm和5.1 mm,满足规范要求。

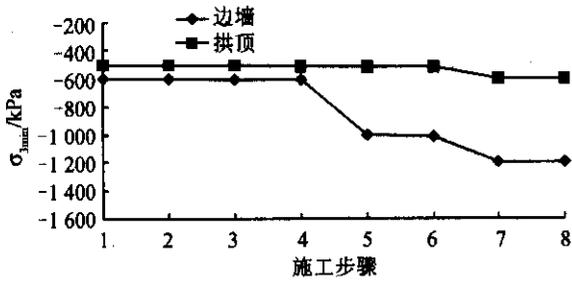


图3 左洞拱部开挖、支护完成前各步骤围岩最小主应力

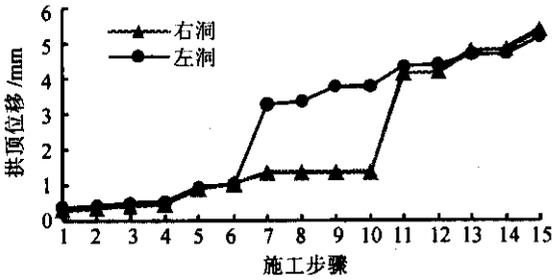


图4 左、右洞拱顶围岩竖向位移

### 3.2.3 塑性区分析

经过分析数值计算结果,发现有4处明显的塑性区:一是三导洞开挖后的中导洞边墙,此时处于开挖初始阶段,在以后的施工中要不断受到扰动,所以应加强此处的监控量测工作,避免围岩因塑性区的发展而出现剪切破坏,见图5所示;二是边墙底部的围岩,在左右导洞初期支护完成后,会出现范围较小但应变值很大的塑性区,应采取加强措施;三是中隔墙底部围岩;四是中墙顶部V形区的围岩,在施工过程中多次受到扰动,容易发生松弛,施工过程中应对此处围岩进行多次加固,确保施工安全,见图6所示。

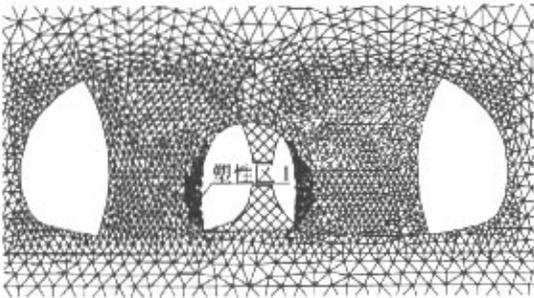


图5 三导洞开挖后的围岩塑性区

### 3.2.4 支护结构分析

对于锚杆轴力,隧道施工完成后,拱顶锚杆最大拉力为64.9 kN/m,而在中墙顶部锚杆主要受压,最大值为11.8 kN/m。初期支护轴力以受压为主,中墙顶部出现拉力,支护轴力在-1 250 kN/m ~ 574 kN/m之间,见图7所示。

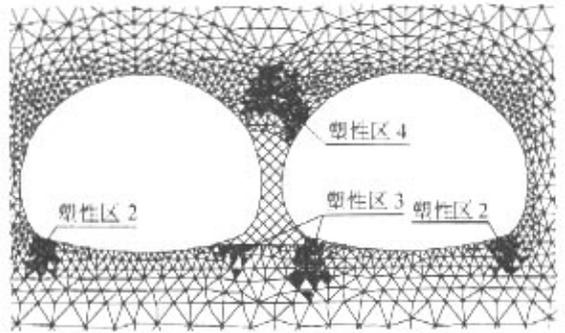


图6 施工完毕后的围岩塑性区

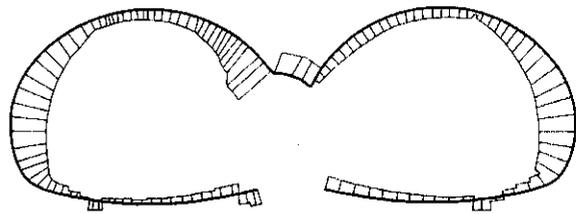


图7 施工完成后的初期支护梁轴力示意

施工时,侧导洞初期支护梁轴力始终较大,其安全应予以重视。对于二次衬砌,隧道施工完成后,左洞所受弯矩在-371 kN·m~63.4 kN·m之间,右洞所受弯矩在-382 kN·m~72.7 kN·m/m之间,见图8所示。二衬与围岩协调变形,在拱顶受到拉力作用,当围岩变形较大时,二衬应尽快施作。

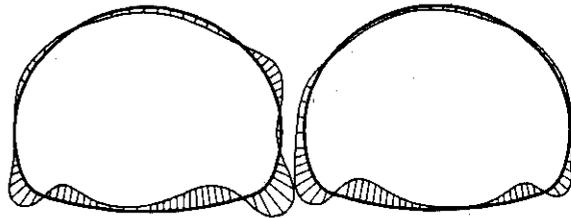


图8 施工完成后的二衬弯矩示意

### 3.2.5 中墙受力与变形分析

从应力水平来看,中墙一直处于较低的应力状态,但在局部有较高的应力集中现象;从位移情况来看,由于中墙受到偏载作用,会产生偏转,但不是简单的整体偏转,而是在偏转的同时产生扭转,引起墙体中部有向左侧凸出的弯曲变形,中墙施作的好坏是工程成功与否的关键之一。左洞下部开挖、支护后,中墙位移曲线见图9、图10所示。

## 4 结语

- (1)本隧道采用三导洞的施工方案是可行的。
- (2)连拱隧道的跨度大,施工技术复杂,施工工序繁多,实施难度较大,通过模拟分析找出了施工过

文章编号: 0451-0712(2007)01-0191-06

中图分类号: U453.4

文献标识码: B

# 从人员安全疏散的观点 研究特长隧道横通道间距

杨高尚<sup>1</sup>, 彭立敏<sup>1</sup>, 彭建国<sup>2</sup>, 张进华<sup>2</sup>, 安永林<sup>1</sup>

(1. 中南大学土木建筑学院 长沙市 410075; 2. 湖南省交通规划勘察设计院 长沙市 410075)

**摘要:**隧道的消防设计应以保护人员的生命安全为首要目标,横通道作为隧道的安全地带,其间距的设置  
在人员安全疏散中是至关重要的。本文以雪峰山隧道为工程实例,阐述了一种计算横通道间距的方法,并简述了该  
方法的应用。首先根据特长隧道火灾特点,从人员安全疏散的观点出发,模拟分析特长隧道4种不同火灾场景下的  
典型自然疏散过程,并运用火灾模拟软件FDS计算不同火灾场景、不同横通道间距情况下的危险时间,然后与相应  
的包含人员疏散行为特征的疏散时间相比较,得出最适宜的横通道间距,并分析其经济性。其方法和结论可为特长  
隧道消防系统的设计、紧急疏散方案和引导指挥体系的建立提供理论依据。

**关键词:**特长隧道; 火灾; 人员安全疏散; 横通道间距

避免或减少隧道火灾所造成的人员伤亡,除了  
努力采取消防安全措施预防火灾事故外,火灾发生  
后如何安全地进行人员疏散,已越来越受到人们的  
重视。人员疏散是否安全的一个很重要的标准便是  
人员能否在危险条件来临之前疏散到安全地点。横  
通道作为隧道的安全地带,其间距的设置,在人员疏  
散中占重要地位。然而,隧道火灾的消防研究在我国  
仍处于初始阶段,目前国内还没有专门针对长大隧

道消防的设计规范和标准作为设计依据,特别是对于  
横通道间距的确定,在我国公路隧道交通工程设  
计规范中只有推荐值,即推荐供人员疏散的横通道  
间距为200~400 m,间距的设置以借鉴国内外的经  
验数据为主,没有具体计算和验证的方法,国内多数  
特长隧道的横通道间距取保守的较低值250 m。对于  
特长隧道,如果能在确保人员疏散安全的基础上,  
适当延长横通道间距,则有可能减少横通道个数,其

基金项目:西部交通建设科技项目(编号20033179802)子课题

收稿日期:2006-05-08

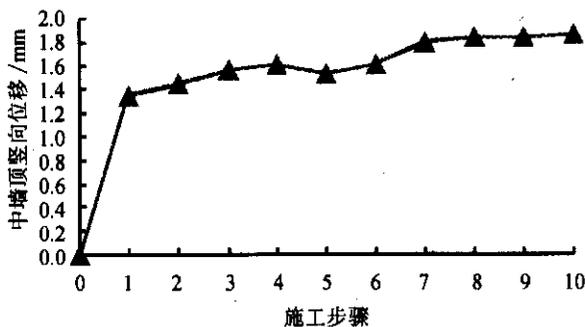


图9 左洞下部开挖、支护前各步骤中墙顶部竖向位移

程中的最不利情况,施工时应予注意。

(3)从计算结果来看,拱顶锚杆拉力最大,中墙顶部锚杆主要受压。

(4)初期支护的轴力以受压为主,施工时侧导洞

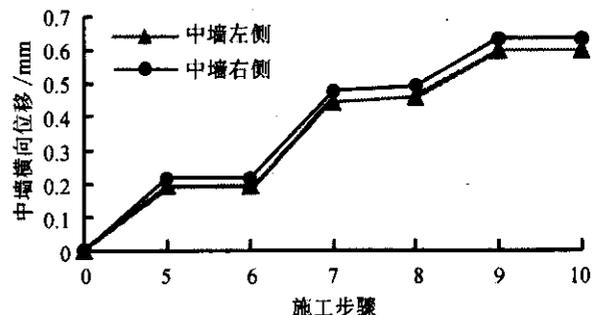


图10 左洞下部开挖、支护前各步骤中墙顶部横向位移

初期支护的轴力较大,其安全应予以重视。

(5)中墙的应力较小,但是受到偏载作用,中墙会产生偏转,同时产生扭转,引起墙体中部有向左侧凸出的弯曲变形,故应对中墙的变形加强量测。