

大跨度双连拱公路隧道 数值模拟与围岩稳定分析

任少强

(中铁二十局集团有限公司,西安 710016)

[摘要] 公路连拱隧道是近二三十年来随着高等级公路建设发展而出现的一种隧道结构形式,具有较好的适用性和优越性,尤其适用于用地受限、山区地形复杂、道路展线困难等情况。然而,连拱隧道相对于分离隧道,施工中必然存在对围岩的多次扰动,施工难度较大。在浅埋、围岩软弱、岩溶等复杂地质条件下,这类隧道在不同施工阶段围岩的稳定性问题备受关注。以沪蓉西高速公路恩施至利川段白果坝隧道为背景,结合现场施工,利用三维弹塑性分析程序 MIDAS - GTS 对白果坝隧道进行了数值模拟研究,对围岩力学性状变化进行了分析,得到了隧道开挖施工中围岩的应力变化规律,针对薄弱部位提出了具体措施。

[关键词] 连拱隧道;数值模拟;围岩;应力

[中图分类号] U45 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009 - 1742(2009)08 - 0058 - 06

1 前言

沪蓉西高速公路恩施至利川段高速公路全长约 122 km,设计时速 80 km,全封闭四车道,是我国规划的公路主骨架网“五纵七横”中的“一横”。沪蓉西高速公路恩利 X10 段沿线地形地质十分复杂,为获得良好的技术经济效果,采用了较多的连拱隧道方案。其中白果坝隧道即为一典型双跨连拱公路隧道,隧道位于湖北省利川市境内,左线长 402.396 m,右线长 403 m,设计荷载为公路—I 级,设防烈度 7 度。隧道穿越地貌单元属构造剥蚀峰丛中低山地貌及剥蚀丘陵地貌区,地面标高在 1 140 ~ 1 370 m 之间,区内地形起伏较大,大部分地带植被发育。区域内岩溶特别发育,属典型山岭地区岩溶隧道。隧道主要不良地质现象为岩溶和软弱夹层。

2 施工方案

双连拱隧道常见施工方案包括三导洞先墙后拱法、中导洞台阶法、中导洞 CD(center diaphragm)

法、中导洞全断面法、单洞法、双洞法、无导洞施工法等。中导洞全断面法、单洞法、双洞法一般适用于地质条件较好、围岩级别 III 级以上、隧道跨度较小的情况^[1]。结合该隧道结构形式、跨度等特征和地层地质情况,对三导洞先墙后拱法、中导洞台阶法、中导洞 CD 法、无导洞施工法进行了施工方案对比。最终确定在洞口段进洞采用安全性高的三导洞先墙后拱法,在中间部位围岩条件较好的地段采用施工进度较快的中导洞台阶法。另外,为保证施工质量和加快施工进度,改变以往中导坑内中隔墙施工完成后,再施工两侧主洞的常规施工方法,采用了中隔墙先行施工,两侧导坑紧跟施工(两侧导坑与中隔墙保持距离不少于 100 m)的新型施工方法。在中部洞身段采取中导洞先行,两侧主洞台阶法开挖隧道,先施作左线隧道,滞后一定时间再施作右线隧道的施工方法。

3 数值模拟与围岩稳定性分析

目前,双连拱隧道的结构设计,往往将其简化

[收稿日期] 2009 - 04 - 02

[作者简介] 任少强(1966 -),男,陕西西安市人,教授级高级工程师,中铁二十局集团有限公司总工程师,研究方向为桥梁隧道施工;E-mail: rsq - kjb@126.com

为荷载结构或作为平面问题处理,较难反映支护结构的实际受力状态。为更加真实地反映施工过程中结构和围岩的安全稳定性,有必要对施工过程进行动态模拟和空间受力分析。文章结合白果坝连拱隧道的实际地表、地层条件和施工过程,进行了三维数值模拟,对围岩的稳定性进行分析等,对隧道施工的安全评估提供了参考依据。

3.1 支护结构概述

白果坝隧道断面为半径 $R = 5.5 \text{ m}$ 的单心圆拱形式。两隧道总跨度为 25.841 m ,隧道中心线间距 13.1 m ,采用复合式衬砌。初期支护为厚 27 cm 的 C20 喷射混凝土,系统锚杆为 D25 中空注浆锚杆,长 3.5 m ,岩壁表面挂设 $\phi 8$ 钢筋网,网格间距为 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$,钢支撑为 I 20b 工字钢,间距为 50 cm ;二次衬砌为 50 cm 厚 C25 模注钢筋混凝土。初期支护与二次衬砌之间防水层为无纺土工布及 1.2 mm 厚 EVA 防水板。

3.2 弹塑性模型假定与屈服准则

在外力作用下,一般认为岩土材料是具有弹塑性的,按照弹塑性理论来研究。文章对隧道开挖施工进行模拟,所涉及到围岩和作为支护结构的混凝土材料,均表现为弹塑性性质,考虑到缺乏试验资料,并为了使问题得到一定简化,围岩材料采用理想弹塑性本构关系,混凝土材料则按照线弹性本构关系处理。

另外,文章的模拟计算中选用了 Mohr - Coulomb 准则。该准则是一直线型破坏准则,适用于岩土材料受压状态,没有考虑中间主应力的影响,具有简单易用的特点,在目前岩土工程分析中使用最广^[2]。

3.3 计算模型的建立

对白果坝隧道的模拟分析采用有限元软件 Midas GTS。

根据隧道衬砌断面尺寸、支护参数、施工方法和地层情况,按地层—结构连续体建立三维有限元模型。围岩采用 4 节点实体四面体等参元,临时支护和初期支护采用板单元,锚杆采用嵌入式锚杆单元。围岩采用弹塑性 Mohr - Coulomb 本构模型,结构采用线弹性本构模型^[3,4]。

为尽量减少模型中边界条件对计算结果产生的不利影响,计算模型的边界范围确定如下:沿隧道轴向左右侧按照 5 倍洞跨即 60 m 考虑,沿隧道纵向按照施工开挖方案和进度,中导洞与左右导洞开挖施工相互错开,即中导洞与左导洞、右导洞各错开 20 m ,左侧主洞与右侧主洞相互错开 20 m ,中

导洞开挖 100 m 浇筑中隔墙后开挖左侧主洞,因此取模型纵向长度范围为 150 m 。垂直方向向下取为 3 倍洞高,即厚度 30 m 。整个计算模型在 x, y, z 三个方向尺寸为 $140 \text{ m} \times 150 \text{ m}$, y 轴正向为隧道开挖方向, z 轴正向向上为正,上部按照隧道所在位置地形等高线图按实际地表建模,见图 1。计算模型的边界条件为:底面为竖向约束,四周围岩外界面为垂直围岩面法向约束,上边界为荷载自由边界,隧道区模型及隧道支护网格划分详见图 2。计算区域内的单元总数为 $34\ 675$,节点总数为 $5\ 495$ 。

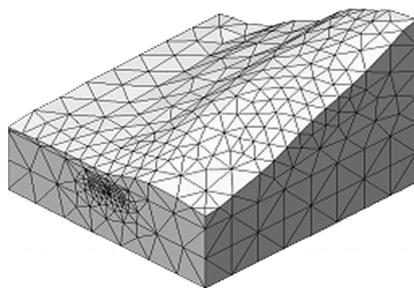
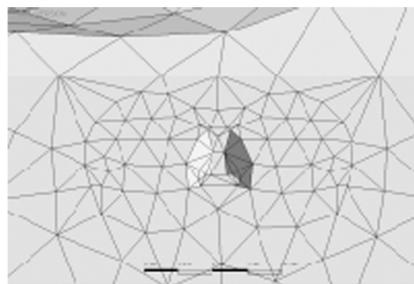
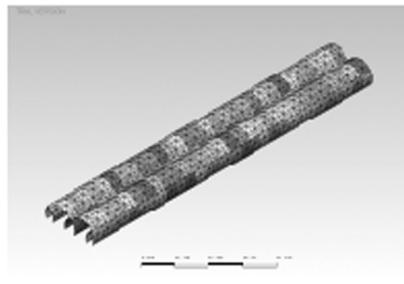


图 1 双连拱隧道模型网格划分图

Fig. 1 Network partition figure of double multiple arch tunnel model



(a)隧道主体网格



(b)支护主体网格

图 2 隧道及支护网格细部图

Fig. 2 Grid detail figure of tunnel and anchor - plateretaing

模型的计算参数见表1。

表1 模型中所采用的各材料力学指标值

Table 1 Mechanics index value of every material adopted in the model

材料类型	弹性模量/MPa	泊松比	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)
围岩	1 500	0.4	1 900	100	25
D25 中空锚杆	210 000	0.3	7 800	-	-
D22 砂浆锚杆	210 000	0.3	7 800	-	-
初支 C20 喷混	27 500	0.167	2 245	-	-
初支 C20 喷混(软)	9 167	0.167	2 245	-	-
临支 C20 喷混	26 500	0.167	2 100	-	-
临支 C20 喷混(软)	8 834	0.167	2 100	-	-
中隔墙 C25	29 000	0.167	2 500	-	-

注:支护结构中的钢筋按等效方法予以考虑,即将钢筋的弹性模量折算给混凝土

3.4 隧道开挖过程模拟

首先计算围岩自重应力场,然后进行隧道开挖施工过程的模拟,计算隧道衬砌结构与围岩的应力场和位移场,见表2。

表2 双连拱隧道三导洞紧跟施工结构与围岩体系施工阶段与荷载步

Table 2 Three pilot holes of double multiple arch tunnel following construction structure and construction phase of wall rock system and load step

计算时间步	施工阶段内容
IS	围岩自重应力场
CS1	中导洞 0~100 m 开挖、喷锚;左导洞 0~80 m 开挖、喷锚;右导洞 0~60 m 开挖、喷锚
CS2	中隔墙 0~100 m 浇筑;中导洞、左导洞、右导洞继续开挖;左上主洞 0~5 m 开挖
CS3	中导洞、左导洞、右导洞继续喷锚;左上主洞 0~5 m 喷锚;左下主洞 0~5 m 开挖;左导洞临支、中洞左临支 0~5 m 拆除
CS4—CS6	依次继续施工
CS7	右上主洞 0~5 m 开挖 右下主洞 0~5 m 开挖;右上主洞 0~5 m 喷锚;
CS8	中洞右临支、中隔墙顶临支、右导洞临支 0~5 m 拆除
CS9—CS16	依次施工

3.5 隧道围岩稳定性分析

白果坝隧道三导洞紧跟施工围岩主应力图见图3~图10。

由各施工阶段应力云图可见,隧道进洞以后,

随着不断开挖,隧道周边的围岩由于开挖卸载,应力迅速减小。

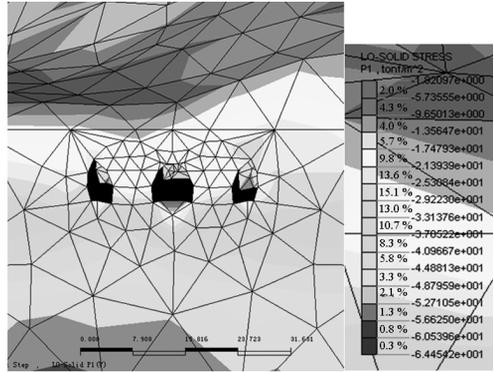


图3 CS1 围岩 σ_1 应力分布图

Fig. 3 Stress distribution figure of CS1 wall rock σ_1

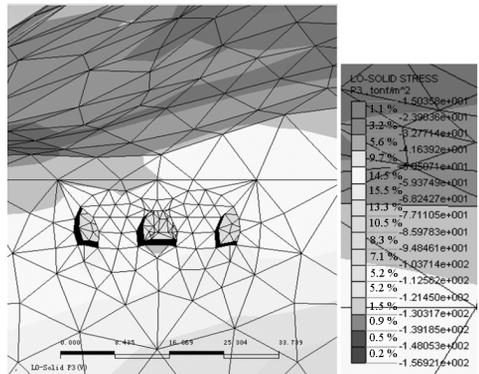


图4 CS1 围岩 σ_3 应力分布图

Fig. 4 Stress distribution figure of CS1 wall rock σ_3

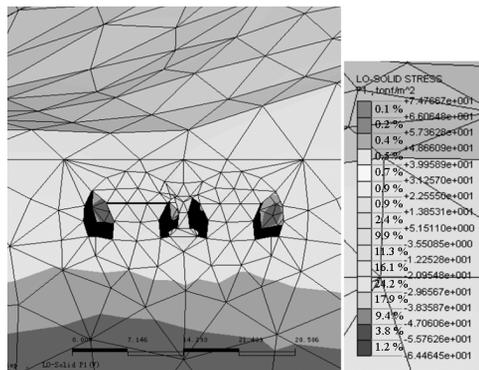


图5 CS2 围岩 σ_1 应力分布图

Fig. 5 Stress distribution figure of CS2 wall rock σ_1

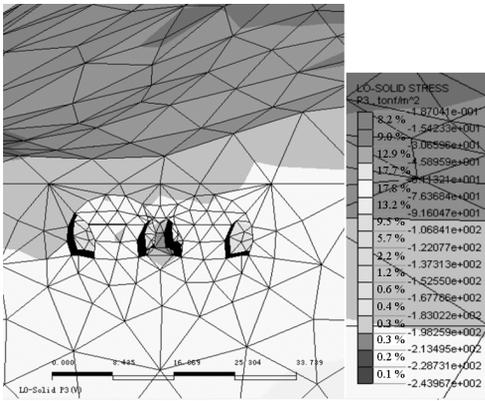


图 6 CS2 围岩 σ_3 应力分布图
Fig. 6 Stress distribution figure of CS2 wall rock σ_3

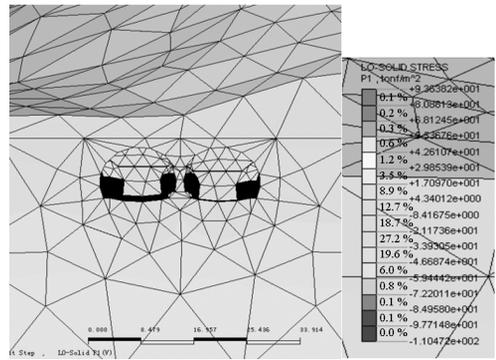


图 9 CS8 围岩 σ_1 应力分布图
Fig. 9 Stress distribution figure of CS8 wall rock σ_1

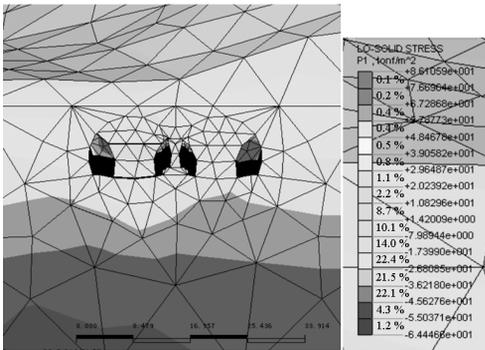


图 7 CS3 围岩 σ_1 应力分布图
Fig. 7 Stress distribution figure of CS3 wall rock σ_1

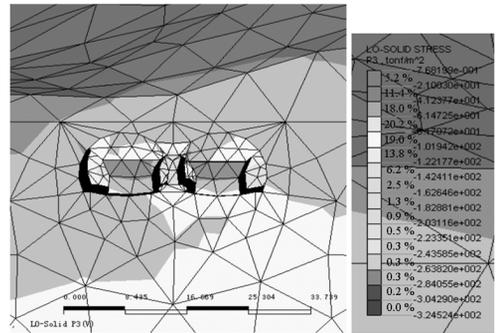


图 10 CS8 围岩 σ_3 应力分布图
Fig. 10 Stress distribution figure of CS8 wall rock σ_3

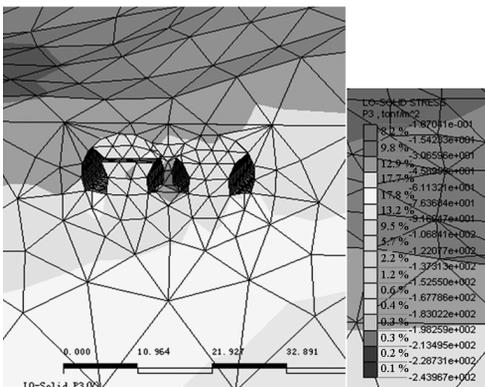


图 8 CS3 围岩 σ_3 应力分布图
Fig. 8 Stress distribution figure of CS3 wall rock σ_3

在 CS1 施工阶段,由于三导洞开挖,导洞底部围岩应力释放,最大主应力为负,即没有出现拉应力。由于中导洞跨度较大,其导洞底部主应力绝对值较小,而两侧导洞由于侧向挤压作用其主应力值较中导洞为大。其中在右侧导洞拱部附近,由于受到右侧山体偏压作用,围岩主应力较大,洞口 3 368 节点处围岩 σ_3 应力为 -0.54 MPa,施工时应注意山体偏压对围岩稳定性的影响。在隧道掌子面附近,围岩主应力最大,其中 σ_3 主应力在 $-1.13 \sim -1.4$ MPa 之间,应采取措施稳定掌子面围岩,注意注浆锚杆施工质量。

在中隔墙浇筑后,随着左上主洞开挖,主应力向两侧洞腰转移,左主洞下部围岩应力释放,中隔墙顶附近围岩应力增大,32 576 单元 σ_3 应力由 CS1 阶段的 -0.64 MPa 增大为 -0.76 MPa。随着中导洞向前开挖掘进,由于中导掌子面围岩的空间效应影响,底板部为围岩应力释放,产生隆起,中隔墙底

产生一定拉应力, CS3 施工阶段最大拉应力 0.86 MPa,但在混凝土结构抗拉强度范围内,结构是安全的。

CS8 施工阶段随着两侧主洞开挖,隧道底部应力释放,拱腰和中隔墙顶围岩应力继续增大,32 576 单元 σ_3 应力最终达 -0.86 MPa。中隔墙受压明显增大,最大压应力 σ_3 为 -3.24MPa。

CS15 施工阶段最大压应力分布图如图 11 所示。由图 11 可见,由于左右侧山体偏压作用,右侧围岩应力明显大于左侧岩体,其中右洞拱脚仰拱连接处围岩应力较大。洞口处拱腰结合部位 4 269 节点 σ_3 最大压应力 -0.76 MPa,左侧对应位置 5 号节点 σ_3 最大压应力为 -0.56 MPa。

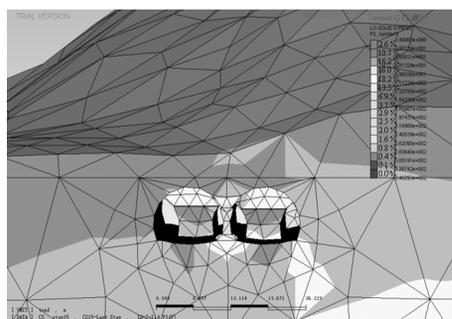


图 11 CS15 围岩 σ_3 应力分布图
Fig. 11 Stress distribution figure of CS15 wall rock σ_3

为观察方便,在模型内部垂直整体坐标 Y 轴做两个剖面,如图 12,图 13 所示,由最终阶段围岩塑性区分布图可见,洞周围岩塑性区主要分布于中导洞周围,中隔墙顶两侧,和右导洞拱脚仰拱连接处,而左侧导洞基本无塑性区存在,这主要是受到山体地形影响,荷载不对称造成了偏压,从而导致围岩应力左右不对称,因而在施工时应考虑中导洞施工

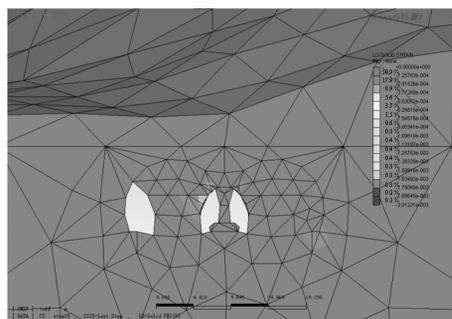


图 12 CS15 洞口 10 m 处围岩塑性区剖面图
Fig. 12 Profile chart of wall rock plastic zone 10 m from CS15 hole

以及右侧导洞施工时洞周围岩的稳定性,必须着重对中导洞施工时围岩的稳定采取有效措施,加强系统锚杆的施工质量,防止围岩发生失稳。

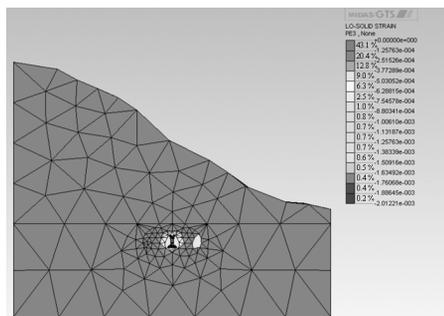


图 13 CS15 洞口 140 m 处围岩塑性区剖面图
Fig. 13 Profile chart of wall rock plastic zone 140 m from CS15 hole

4 结语

通过建立白果坝双连拱隧道三维弹塑性模型,动态模拟了隧道开挖施工过程,分析了围岩应力变化情况。通过分析,主要得到以下几点结论:

1) 双连拱隧道采用中隔墙先行施工,两侧导坑紧跟施工的新型施工方法,围岩符合安全施工要求。

2) 应力分析表明,在掘进工作面附近围岩应力集中较明显,越向下则应力集中越大,剪应力也越大,因此施工时应加强开挖工作面附近部位支护。

3) 右侧导洞由于受到地形偏压荷载作用,围岩应力较左侧主洞大,主应力最大位置分布在隧道开挖面附近及右侧边墙与仰拱交界处,施工时应采取措施,注意右侧主洞掌子面附近围岩及拱脚围岩稳定。

4) 中导洞是三导洞施工中围岩稳定性最差的导洞,存在较大范围围岩塑性区,右侧导洞拱脚仰拱连接处也存在塑性区,而左侧导洞基本无塑性区存在,施工中应注意中导洞系统锚杆施工,加强围岩监控量测。

参考文献

- [1] 景志富,孙波.大跨度双跨拱隧道的新型施工[J].铁道工程学报,2002,(1):62-65
- [2] 潘昌实.隧道力学数值方法[M].北京:中国铁道出版社,1995
- [3] 陈秋南,赵明华,张永兴,等.偏压双连拱隧道信息化施工与仿真分析[J].岩石力学与工程学报,2006,(8):1723-1727
- [4] 蒋树屏,刘洪洲,鲜学福.大跨度扁坦隧道动态施工的相似模拟与数值分析研究[J].岩石力学与工程学报,2000,19(5):567-572

Numerical simulation and stability analysis of surrounding rock of large-span multi-arch tunnel

Ren Shaoqiang

(China Railway 20th Bureau Group Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

[Abstract] Highway multi-arch tunnel as a new structure form has been developed in recent decades with the rapid development of high level road, and this tunnel structure form has the merits of good adaptability and superiority in the condition of complex land form and difficult line designation. However, compared with individual tunnel and conjoined tunnel, multi-arch tunnel has the question of mother rock's frequent perturbation, construction difficulty, et al. In the geological condition of shallow buried, soft rock, and carst, et al. the mother rock of these kinds of tunnel must be paid attention in the whole construction stage. This paper, taking the Baiguoba Tunnel, Enshi to Lichuan section, Hurongxi express way, as the background and combining field engineering construction, analyzed the Baiguoba Tunnel with MIDAS-GTS, laid the emphasis on surrounding rock mechanics property, drew a conclusion of stress regularity, and put up the countermeasure to the weak part.

[Key words] multi-arch tunnel; numerical simulation; surrounding rock; stress

(上接 23 页)

Some issues about setting up the Chinese school of modern guanli science(III): four definitions and three suggestions

Liu Renhuai, Sun Dongchuan, Sun Kai

(Jinan University, Guangzhou 510632, China)

[Abstract] Some basic concepts and basic questions of management were studied. The two terminologies guanli (including management, administration, supervision, etc.) and guanli science (generalized management science) have obvious differences in Chinese and English. In Chinese they are broad senses while in English are narrow senses. The simplified translations lead to several different meanings and confusions in Chinese academia. To clarify the Chinese meanings of these terminologies, four definitions are put forward: 1. Guanli activity is the second kind of human activities serving for the first kind of activities (i. e. operating activities); 2. The public guanli - activities of a group are called guanli works; 3. Some staffs appointed by an organization are called guanli-ers who are specially doing the guanli works; 4. Guanli Science is the sum total of man's knowledge of the rules of guanli activities and guanli works, while is a knowledge system with rich content. We hope to set up the Chinese school of modern guanli science.

[Key words] guanli; guanli activity; guanli work; guanli science; Chinese school of modern guanli science; speaking rights