

偏压连拱隧道合理开挖方案的分析

周玉宏 赵燕明

程崇国

(重庆后勤工程学院土木工程系, 重庆 400041)(重庆交通科研设计院 400067)

Analysis on the Construction Process With Reason of Joint Arch Tunnel in Partial Press

Zhou Yu-hong

Zhao Yan-ming Cheng Chong-guo

(1.Dept. of Civil Eng., Logistical Engineering University, Chongqing 400041, China 2.Chongqing Institue of Traffic Science And Research Design)

摘 要: 本文采用 ANSYSV5.6 版有限元分析程序对云南元磨高速公路桥头隧道采用的施工过程进行了二维有限元分析。通过有限元计算,模拟了三种开挖顺序,获得了偏压连拱隧道在采用不同开挖顺序施工时各阶段围岩的应力、应变状态、地表沉降以及隧道支护结构中的内力变化情况,通过对比、分析,并和现场量测资料相比较,得出一些结论,为云南元磨高速公路连拱隧道采用的施工方法提供了科学依据与技术指导。

关键词: 偏压 连拱隧道 有限元 开挖施工顺序

中图分类号: TU

文献标识码: A

Abstract: In this paper, the process of the construction of the transitional joint arch tunnel in Qiaotou tunnel of YuanMo Freeway has been simulated with the application of ANSYS V5. 6 FEM program. The stress state of surrounding rock, ground settlement and internal forces of tunnel support structure during each period of construction are obtained by 2D computation. Some solution is obtained by contrasting, analysing and comparing with data obtained by live measure. This analysis provides a scientific basis and technical guidance for the construction of joint arch tunnels in Qiaotou tunnel of YuanMo Freeway.

Key words: Partial Press; Joint Arch Tunnel; FEM; Construct Order

1 概 述

本文计算所模拟的桥头隧道位于元江~磨黑高速公路 16 合同 K342+375~K342+655 之间,全长 280 米,为带中墙的整体式双跨连拱结构隧道,隧道单跨净宽 10.53 米,净高为 7.2 米。单跨采用单心圆,边墙为曲线,中墙为直线,中墙厚为 2 米,隧道净宽为 23.05 米,最大开挖跨度为 24.65 米。围岩类别为Ⅱ、Ⅲ类,隧道最大埋深 74 米。路线位于云贵高原西部,横断山脉南延地区。云南省地貌分区的哀牢山中山亚区,区内属构造侵蚀地形,路线主要位于高中山地区。隧道上部岩体是一明显的斜坡,使隧道处在偏压状态中,具体参照图一模型。

隧道施工中采用先中墙,再上下台阶开挖法施工。隧道最大开挖跨度为 24.65 米,无论从设计角度,还是从施工角度而言,其结构的受力状况都是十分复杂的。而且连拱隧道在国内外的研究还为数不多,为掌握连拱隧道在开挖过程中引起的地层变形、地表沉降和支护结构的力学状态,特别是隧道施工顺序对围岩稳定及应力、应变影响,必须对连拱隧道结构的开挖过程进行有限元计算和分析,以便为该区段连拱隧道的设计和施工提供科学依据和技术指导。

目前的施工中所采用的施工顺序有先左洞后右洞开挖、先右洞后左洞开挖以及两洞同时开挖,对于偏压条件下双洞连拱隧道的开挖顺序,究竟哪种施工顺序更为合理,本文进行了一定的分析。通过计算,并结合现场量测资料分析,得出一些可引为规律性的东西,从而对指导设计、施工、量测测点埋设位置及对施工中出现的問題和不合理量测结果的解释提供理论帮助。

2 隧道结构的计算模型

依照初步设计中所提供的桥头隧道地段地质资料,将该地段围岩类别定为Ⅱ类,并结合初步设计中连拱隧道断面的相关尺寸建立了桥头隧道的二维有限元计算模型。在有限元计算当中,边界约束条件对计算结果影响较大。因此,为尽量减少二维有限元模型中边界约束条件对计算结果产生的不利影响,计算模型的边界范围按照以下原则进行了确定,即二维有限元计算模型所取地层的范围是:水平方向上隧道两边的长度均取洞跨的 3 倍为限,即计算模型的水平宽度为开挖隧道跨度的 7 倍;垂直方向上,隧道下的距离为洞高的 3 倍,而隧道上方按实际地形尺寸。计算模型如图 1。

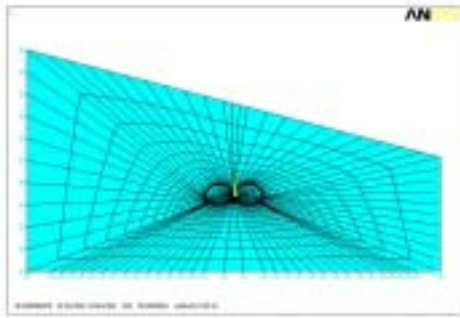


图1 偏压连拱隧道有限元计算模型与网格划分
Fig.1 Model Net for FEM analysis

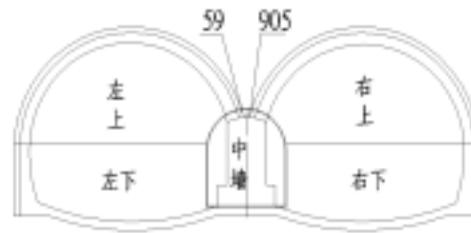


图2 偏压连拱隧道模型平面划分
Fig.2 Model for joint arch tunnel for joint arch tunnel

2.1 加固措施的简化

在本次有限元计算中，隧道结构的有限元计算采用隧道与地层共同作用的受力模式，模拟分析各种施工顺序对地层和隧道结构的受力与变形的影响。在现场隧道开挖过程当中，为防止开挖引起的洞周岩土体的垮塌，通常根据围岩类别采用锚杆、超前小导管注浆和管棚等支护措施对其进行加固处理，以提高围岩的稳定性。锚杆等加固的有限元模型，目前仍是国内外正在研究中的课题。根据文献资料以及以往的工作经验，锚杆的主要作用并非其自身强度对整体结构的贡献。因为在整个系统中，锚杆刚度和周围岩体刚度相比是微不足道的，而锚杆的真正作用在施工过程中起到及时加固，限制塑性区的发展，使岩体能保持较好的连续性和整体性，从而能够很好的起到自承作用。所以，通常的锚杆模拟计算中采用提高 C 、 μ 值的方法。根据大跨隧道初步设计方案，模拟计算必须考虑锚杆和超前小导管对围岩的加固稳定作用，因此在有限元计算时，依据国内外研究及现场经验所建议将围岩参数中的 C 、 μ 值提高 20%-30%，本文对上述加固措施采用了将其所处位置围岩参数中的 C 、 μ 值提高 20% 的方法加以模拟。

2.2 计算模型和计算参数

根据隧道围岩的物理力学性质，在本次有限元计算当中，采用了弹塑性的非线性有限元法。在有限元计算中，围岩材料的本构模式采用 Drucker-Prager(D-P)模型，以计算隧道结构与地层在开挖过程中发生的非线性变形特性。在对连拱隧道进行开挖过程的有限元模拟分析中，计算程序采用了 ANSYSV5.61 版有限元分析软件。由于该计算软件提供了对有限元计算单元进行“生(alive)”与“死(kill)”的处理功能，因此可以利用该功能来模拟隧道施工的分步开挖过程。在计算过程当中，主体和隧道结构的支护均采用 ANSYS 程序中的 PLANE42 单元加以模拟。在进行有限元计算时，围岩的物理力学参数依据铁路隧道锚喷构筑法中Ⅲ类围岩的参数确定，而支护采用混凝土 C25 的参数，物理力学参数具体如表 1 所示。

表1 有限元计算的物理力学参数

Table 1 Physical mechanics parameter for FEM calculation

围岩类别	弹性模量 $E(\text{GPa})$	泊松比 μ	容重 $(10\text{N}/\text{m}^3)$	内摩擦角 $(^\circ)$	内聚力 $C(\text{kPa})$
Ⅲ类	1.1	0.33	2500	35	120.0
C25	28.0	0.15	2500		

对偏压连拱隧道开挖过程模拟所建立的有限元模型划分有限元网格，总共划分为 2024 个 PLANE42 单元。计算时所施加的边界约束条件是：地表为自由边界，未受任何约束；计算模型的左右边界分别受到 x 轴方向的位移约束，模型的地层下部边界受到 y 轴方向的位移约束。

3 开挖过程的模拟计算

对于桥头偏压连拱隧道，为模拟其施工过程，将隧道模型平面划分如图 2。

计算分三种开挖顺序分别计算。

先左洞，后右洞

实施步骤是：先开挖中导坑，用改变中墙单元材料属性来模拟；开挖左洞上半部，用杀死单元来模拟；对左洞上部初期支护，用激活单元并改变单元材料属性来模拟；开挖左洞下半部；对左洞下部初期支护；右洞上部开挖，同时做左部仰拱；右洞上部初期支护，同时做左洞二衬；右洞下部开挖；右洞下部初期支护；做右洞仰拱，右洞二衬。

先右洞，后左洞

实施步骤是：先开挖中导坑，用改变中墙单元材料属性来模拟；开挖右洞上半部，用杀死单元来模拟；对右洞上部初期支护，用激活单元并改变单元材料属性来模拟；开挖右洞下半部；对右洞下部初期支护；左洞上部开挖，同时做左部仰拱；左洞上部初期支护，同时做右洞二衬；左洞下部开挖；左洞下部初期支护；做右洞仰拱，左洞二衬。

左右两洞同时开挖

实施步骤是：先开挖中导坑，用改变中墙单元材料属性来模拟；开挖左、右洞上半部，用杀死单元来模拟；对左、右洞上部初期支护，用激活单元并改变单元材料属性来模拟；开挖左、右洞下半部；对左、右洞下部初期支护；做左、右部仰拱；做左、右洞二衬。

4 计算结果和分析

通过对偏压连拱隧道开挖过程的模拟计算，得出三种开挖方法所得的结果是不同的。

对连拱隧道中墙的计算结果分析

在结果比较中发现，中墙与左洞初衬拱脚的交点（59 结点）和与右洞初衬拱脚的交点（905 结点）的应力是最敏感的。表 2、表 3 分别列出了 59 结点和 905 结点的应力、位移。

表 2 59 结点应力、位移

Table 2 Stress and displacement for No.59

59 结点	先左洞后右洞开挖	先右洞后左洞开挖	两洞同时开挖
最大 X 向应力(MPa)	-4.365	-3.601	-10.423
最大 Y 向应力(Mpa)	-7.159	-6.182	-20.904
最大 X 向位移(mm)	1.71	1.82	0.87
最大 Y 向位移(mm)	6.17	6.00	7.38

表 3 905 结点应力、位移

Table 3 Stress and displacement for No.905

905 结点	先左洞后右洞开挖	先右洞后左洞开挖	两洞同时开挖
最大 X 向应力(MPa)	-3.381	-4.079	-12.431
最大 Y 向应力(Mpa)	-6.004	-8.148	-22.950
最大 X 向位移(mm)	1.60	1.90	0.85
最大 Y 向位移(mm)	6.24	5.83	7.33

由以上数据可以得出下列分析：

两侧同时开挖的应力值明显大于另外两种开挖顺序；

在先左洞后右洞开挖和先右洞后左洞开挖中，X 向最大应力为-4.365Mpa，出现在先左洞后右洞开挖顺序；Y 向最大应力为-8.148Mpa，出现在先右洞后左洞开挖顺序；而 X 向位移是先左洞后右洞开挖顺序小于先右洞后左洞开挖顺序。

三种开挖顺序的结果中隧道拱顶最大竖向位移均在左洞拱顶，其中两侧同时开挖顺序的位移值最大，为 12.466mm；先左洞后右洞开挖顺序的位移值最小，为 10.738mm。且左洞竖向位移比右洞大。衬砌 Y 向位移分布图如图 3。



图 3 先左洞后右洞开挖竖向位移

Fig.3 Vertical displacement for digging in left tunnel Before right tunnel

由 、 可以得知，两侧同时开挖顺序是最不利的，故下面只比较另外两种开挖顺序。

水平位移如图 4、图 5 所示。

- 1) 先左洞后右洞开挖最大水平位移在右洞拱腰，最大位移为 5.882mm ;先右洞后左洞开挖最大水平位移在左洞边墙，最大位移为 3.412mm.
- 2) 两种开挖顺序所得左、右两洞均表现为向内收敛，如表 3 所示。

表 4 水平位移 (mm)

Table 4 Horizontal displacement(mm)

	左洞左拱腰	左洞右拱腰	右洞左拱腰	右洞右拱腰
先左洞后右洞开挖	0. 709	-0. 507	3. 209	-1. 315
先右洞后左洞开挖	2. 532	-2. 937	2. 259	-0. 574

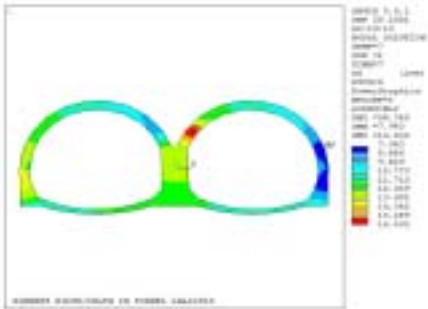


图 4 先左洞后右洞开挖水平位移
Fig.4 Horizontal displacement for digging in left tunnel Before right tunnel

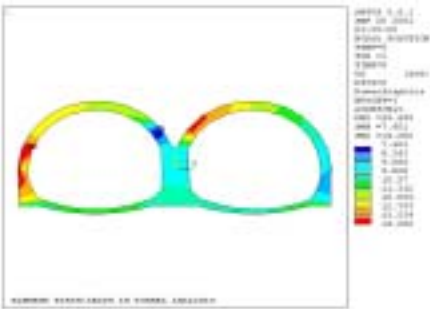


图 5 先右洞后左洞开挖水平位移
Fig.5 Horizontal displacement for digging in right tunnel Before left tunnel

由应力分布图可以看出，采用先左洞后右洞开挖顺序，最大 Y 向应力出现在左洞右拱腰，最大 X 向应力出现在左洞拱顶；采用先右洞后左洞开挖顺序，最大 Y 向应力出现在右洞左拱腰，最大 X 向应力出现在右洞拱顶。

由塑性应变分布图可以看出，采用先左洞后右洞开挖顺序所得到的塑性区小于其它两种开挖顺序所得到的塑性区。各开挖顺序所得到的塑性应变如图 6、图 7、图 8 所示。

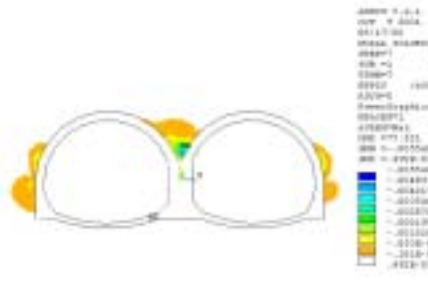


图 6 先左洞后右洞开挖塑性应变
Fig.6 Plastic strain for digging in left tunnel Before right tunnel

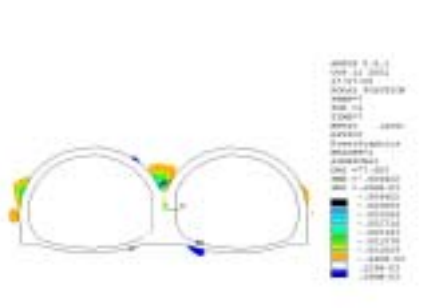


图 7 先右洞后左洞开挖塑性应变
Fig.7 Plastic strain for digging in right tunnel Before left tunnel

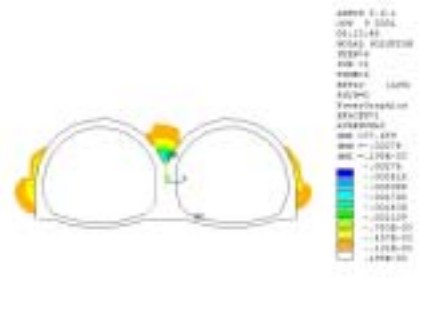


图 8 同时开挖塑性应变

图 8 两侧同时开挖塑性应变

Fig.8 Plastic strain for digging in two side at the same time

5 现场量测资料分析

桥头隧道的 SK342+403 断面和 XK342+402 断面, 收敛量测结果如图 7、图 8 所示。由量测结果可得出如下结论:

左洞 XK342+402 断面周边收敛 (如图 9) 表现为负值缩小, 拱腰最终收敛值为 9.571mm, 边墙最终收敛值为 1.521mm; 而右洞 SK342+403 断面 (如图 10) 表现为正值扩大, 拱腰最终收敛值值为 16.853mm, 边墙最终收敛值为 0.963mm。

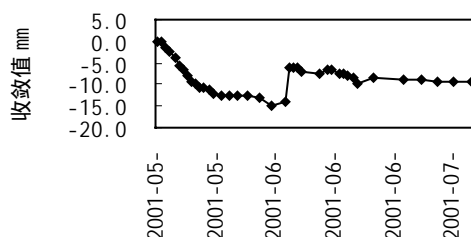


图 9 XK342+402 断面周边收敛

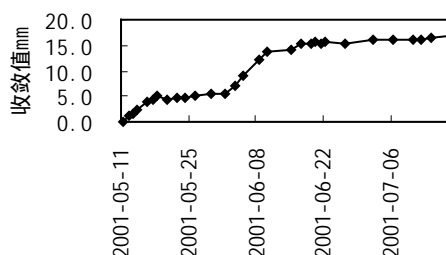


图 10 SK342+403 断面周边收敛

Fig.9 Around constringency for XK342+402 section Fig.10 Around constringency for SK342+403 section

从整个量测断面的数据分析, 两个断面的受力均为偏压状态, 左大右小。

桥头隧道开挖初期采用左、右洞同时开挖法施工, 左、右洞的掌子面、下台阶以及二次衬砌均在同一个断面上。在 6 月 8 日, XK342+403 断面就因为两个洞的下台阶对称开挖而出现量测数据异常变化, 表现为中隔墙开裂, 靠近中隔墙的拱腰位置, 喷射混凝土壁面有环向的裂纹; 左右洞的水平收敛值都有较大增长; 靠近中隔墙的拱腰位置的应力盒数据显示, 左右洞的围岩压力分别达到 400kPa 和 500kPa; 且拱腰部位的多点位移计在不同深度的各测点的位移值在这段时间也有大幅增长。初步估计是两个洞的掌子面和下台阶均在同一断面上开挖, 这样使得围岩垂直压力比只开挖一个洞的压力要大得多, 不利于结构的受力和稳定, 导致初期支护及中隔墙开裂。故重庆交通科研设计院现场量测组建议: 上行线掌子面先掘进, 待其二次衬砌超过下行线掌子面 30 米后, 下行线的掌子面再开挖。施工队按此法施工后取得了较为满意的结果。

6 结语

从以上结果可以看出, 实测结果与有限元计算结果是有一定差别的。通过对计算结果及现场量测资料的分析, 得出以下结论:

通过偏压连拱隧道的有限元计算结果, 可知在桥头隧道施工中所采用的先做中墙, 再对左、右隧洞进行上下台阶开挖的施工方法是完全可行的。

从有限元计算结果可以得出, 隧道变形最明显位置在拱顶、拱腰, 与现场周边收敛、拱顶下沉的埋点一致; 而应力测点的埋设应根据开挖顺序, 最明显位置出现在拱顶及拱腰, 故应根据开挖顺序对相应拱顶及拱腰进行应力监测。另外, 对中墙的应力监测也是必须的。

由计算结果可知在偏压状态下, 左右两洞同时开挖, 其产生的应力值较其它两种开挖顺序大的多, 故建议不宜采用。开挖先左洞, 后右洞和先右洞, 后左洞的开挖顺序对围岩的影响, 以及其产生的位移, 应力等结果是各有利弊的, 但综合塑性区的范围, 可以得出先右洞, 后左洞的开挖顺序比先左洞, 后右洞的开挖顺序更为合理。

在实际工程中由于地质条件的复杂性, 使得量测结果与计算结果有出入(如现场量测分析的结论), 这就进一步体现了岩土工程问题的不确定性, 解决这一问题, 就得采用半理论半经验的方法, 并结合现场监控量测, 灵活的进行设计、施工。

当然, 偏压连拱隧道作为一种较新的隧道形式, 还有很多问题有待于研究, 本文只是作者的一些看法, 希望能对连拱隧道理论上的发展有所帮助。另外, 关于空间效应对连拱隧道的影 响, 还有待于进一步的研究。

参考文献:

- [1] 夏才初. 地下工程测试理论与监测技术. 上海：同济大学出版社，1999
- [2] 美国 ANSYS Inc., ANSYS 使用手册，1998
- [3] 李世辉. 隧道围岩稳定系统分析. 北京：中国铁道出版社，1991
- [4] 易萍丽. 现代隧道设计与施工. 北京：中国铁道出版社，1997

作者简介：周玉宏，男，1976 年生，硕士，主要从事地下结构稳定性分析