

大跨度公路隧道动态施工围岩稳定性数值分析

李 军, 刘 瑞, 侯庆军

(内蒙古交通设计研究院有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要:结合龙头山隧道工程, 利用有限元软件 ADINA 建立空间计算模型, 用三维弹塑性有限单元法对隧道Ⅲ类围岩段施工过程中围岩稳定性和安全性进行分析, 分析施工过程中围岩的位移、应力、应变变化规律, 得出了一些有益的结论, 对大跨度隧道施工过程中的围岩稳定性和安全性评价有一定指导意义。

关键词:大跨度公路隧道; 有限元; 稳定性

中图分类号: U452.12 **文献标识码:** A

文章编号: 1671-5322(2008)02-0070-04

1 工程概况

龙头山隧道位于同三、京珠国道主干线绕广州公路东环段, 起自广州北二环高速公路火村互通式立交, 向南经白云区、黄埔区、广州经济技术开发区, 跨越珠江扛水道, 终于番禺区化龙镇, 与广朱东线高速公路相连。为国内规模最大的双向分离式单洞四车道公路隧道, 隧道最大开挖宽度 21.1 m, 最大开挖高度 13.2 m, 隧道右线起讫桩号为 YK5+760~YK6+742, 长 982 m, 隧道左线起讫桩号为 ZK5+760~ZK6+750, 长 990 m。

2 工程地质水文地质条件

龙头山总体走向近东西, 测区内最高点海拔高程约 184 m, 隧道通过地段最大海拔高程 170 m 左右, 坡脚标高 28 m, 相对高差较大, 约 158 m, 隧道所处地貌单元属长期风化剥蚀丘陵地貌区, 坡度一般为 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$, 隧道上覆低矮灌木和杂草, 植被茂密。根据区域地质资料、地震安全性评价报告及勘察成果, 在隧址区外围主要发育二组断裂, 即文冲断裂和瘦狗岭断裂。根据工程地质测绘及钻探揭示, 隧道区地层较为简单, 局部地段基岩出露地表, 隧道区主要分布第四系残坡积物 (Q_4^{dl+el}), 基岩为燕山晚期的花岗岩侵入体 ($\gamma_5^{2(3)}$), 岩性为二长花岗岩。

地下水类型主要为松散岩类孔隙潜水和基岩裂隙水。松散岩类孔隙水主要赋存于隧道的第四系残坡积层中及全风化花岗岩中, 松散岩类孔隙水含水层埋藏浅, 水量小, 富水性弱, 动态变化大, 受大气降水直接补给, 下渗入基岩裂隙中或沟谷斜坡地带与基岩接触处, 成渗流或湿地形式排泄出露。调查发现, 在沟谷中发现多处细流, 流量为 0.34 L/s。另外在龙头山基岩裂隙较发育地带, 杂草丛生, 与地下水有直接关系, 地下水呈片状渗出, 据简易流量测定, 地下水流量为 1.50 L/s。基岩裂隙水主要赋存于基岩裂隙中, 赋水性不均匀, 局部透水性较好, 主要受大气降水及第四系松散岩类孔隙潜水的渗入补给。根据水质分析成果, 地表水及地下水类型为 $HCO_3 - Cl - Ca \cdot Mg$ 型, pH 值分别为 6.68 及 6.25, 呈弱酸性。地下水及地表水对混凝土无腐蚀性。

3 三维有限元分析在 ADINA 中的实现

公路隧道围岩具有明显的弹塑性性质, 进行隧道实际开挖过程的动态数值模拟, 通过弹塑性分析得出开挖过程中围岩应力分布、应变规律和位移变化规律, 可以为隧道的顺利施工提出警示信息和直接指导, 同时为隧道断面设计的优化提供理论基础。

本文采用 ADINA 有限元软件进行施工过程数值模拟, 为探讨隧道开挖过程中, 不同开挖步骤

收稿日期: 2008-03-17

作者简介: 李军(1980-), 男, 内蒙古巴彦淖尔市人, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为桥梁隧道工程。

对隧道目标面(研究面)围岩稳定性的影响,本文对龙头山公路隧道左线有代表性的地段(ZK5+820-ZK5+850)的施工过程进行数值模拟,分析不同施工工况下围岩的位移、应力、应变情况。

在符合真实施工顺序的基础上,结合隧道的具体情况,本文采用三维有限元对隧道的开挖过程和喷锚支护过程进行数值模拟,依据隧道开挖的影响范围,模型左右取3.5倍洞径,向下2.5倍洞径,向上取自地表。

具体的分析计算步骤如下:(1)确定开挖断面的几何参数及围岩和支护的各种力学参数;(2)确定计算域及建立围岩和支护结构的数值分析模型;(3)计算围岩的初始应力场;(4)按各施工方案的开挖过程模拟计算围岩和支护结构的应力场和位移场;(5)叠加各施工阶段的计算值,得到围岩和支护结构的最终应力场和位移场;(6)根据最终的计算结果,评估隧道围岩结构的强度和稳定性。

本文研究的计算段埋深约50 m,Ⅲ类围岩,初期支护采用喷锚支护,采用直径50 mm小导管超前支护,长度4.5 m,环向间距40 cm;锚杆采用Φ25 mmTZL预应力锚杆,长度4 m,间距100×100 cm。采用Φ28格栅钢架支护,H=15×20 cm,纵向间距100 cm;喷射C25钢纤维混凝土20 cm,二次衬砌采用C30钢筋混凝土,厚度55 cm。

本文在隧道施工过程的数值模拟中,围岩和支护变形分别按弹塑性和线弹性考虑能较好地反映岩土体和混凝土材料变形的非线性和线性,因此围岩用Mohr-coulomb材料来模拟且不考虑其体积膨胀,喷射混凝土为线弹性材料且不计其非线性变形,二次衬砌作为安全储备,本文不考虑。在有限元计算中围岩和混凝土均采用8节点六面体实体映射单元划分,锚杆采用ADINA里的`rebar单元,钢拱架采用等效计算方法,将钢拱架的弹性模量折算给它相邻的混凝土。各材料物理力学计算参数表1:

表1 岩体及支护材料物理力学参数表

Table 1 Physical and mechanical parameters of rocks and support material

名称	重度 γ kN/m ³	弹性模量 E GPa	粘聚力 kPa	内摩擦角 (°)	泊松比
围岩	22	3	500	35	0.25
C ₂₅ 喷射混凝土	22	23	—	—	0.2
锚杆	7 800	200	—	—	0.2

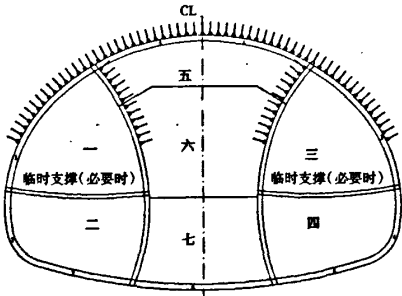
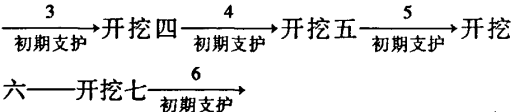
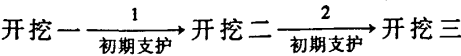


图1 龙头山隧道Ⅲ类围岩开挖步骤示意图
Fig.1 Layout of digging processes on the Ⅲ surrounding rock in Longtoushan tunnel

3.1 计算模型及条件

(1)隧道施工过程采用双侧壁导坑法开挖,开挖工序如图1所示^[1]:



(2)根据实际情况及对研究面(目标面)的影响大小,将模型分为两段开挖,每一段长10 m,中间即为目标面^[2]。整个模拟过程见图2。

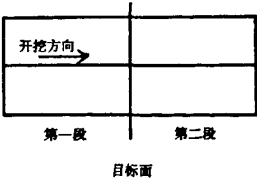


图2 开挖步骤示意图
Fig.2 Layout of digging processes

(3)计算模型整体经离散后单元总数12 600个,节点总数14 335个,计算模型的边界条件,除上部为垂直荷载外,侧面和底面为法向约束边界,

因隧道埋深较浅,故计算时按自重应力场考虑。

4 隧道围岩稳定性计算结果分析

4.1 位移场分析

为了能够清楚的表达隧道施工过程中对目标面围岩稳定性的影响,本文选择了几个关键位置上的点来研究它们的位移变化情况,这些点是 1、2、3、4、5,如图 3 所示。

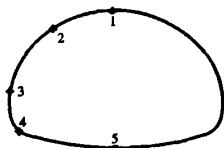


图 3 关键点示意图

Fig. 3 Layout of key points

从实际情况看,在隧道开挖过程中,喷锚支护所起的作用明显的,可以有效的减小围岩的变形。随着开挖步骤的进行,隧道围岩拱顶下沉量不断增加,在整个施工过程中,目标面上的 1#点,即拱顶沉降量最大,在无支护的情况下,1#点的沉降量达到 9.01 mm,有支护的情况下达到了 7.47 mm,并且目标面上拱顶位移变化幅度最大的时刻发生在目标面前一段和后一段上台阶土开挖后,因此洞顶应作为收敛量测的控制点;在隧道开挖过程中,水平位移变化较大的是 2#点和 3#点,在有支护的情况下位移减小明显。在第一段有支护后,形成应力拱,在开挖第二段时拱腰和拱角水平向位移能明显减小,施工过程中应该在这加强围岩的动态量测和监控,其它关键点水平位移变化较小;开挖核心土后拱底竖向回弹较大,和拱顶的竖向位移方向相反,变化趋势基本一致,无支护时达 10.56 mm,有支护时达 9.82 mm,这主要是因为核心土下部开挖完成后相当于内卸载作用,致使拱圈回弹产生的。

4.2 应力场分析

(1)隧道第一段左导洞开挖后由于部分初始应力得到释放,左导洞曲边墙两侧出现了应力集中现象,围岩塑性范围小,但应变值大,在施加初期支护后地应力完全释放,由围岩和支护共同承担应力,拱腰应力圈变化均匀,应力集中现象得到了很大的改善。

(2)隧道第一段在左右导洞开挖无支护的情况下,拱肩和拱脚出现对称的应力集中现象,拱肩

是应力集中最大的地方,在施加喷锚支护后拱肩应力集中现象消除,有效的改善了围岩应力集中现象。

(3)隧道第一段上台阶开挖后,隧道顶部应力得到释放,顶部和拱角处应力集中明显并有所增大,其它地方围岩应力无无明显变化。施加喷锚支护后隧道围岩应力集中得到改善,只有在拱角处出现了比较大的应力集中现象。在下台阶开挖后,地应力完全释放,由围岩与衬砌共同承担,在拱角应力进一步集中,拱顶和拱底均出现了拉应力,其他部位变化比较均匀,出现拉应力的原因是隧道开挖后对拱底有一个卸载作用,拱底回弹产生向上的位移致使出现拉应力。

(4)隧道第二段左导坑开挖后,在无喷锚支护情况下,拱顶和左拱腰出现了明显的应力集中现象,如图 4 所示,在实施喷锚支护后应力集中现象得到很大改善,尤其拱顶部应力集中现象减少很明显,如图 5 所示,图 6 为开挖两段后塑性区纵向剖面图。从纵向来看,隧道开挖产生的塑性区对围岩的影响仅在开挖面附近,最大影响范围在开挖面前方 2 m。

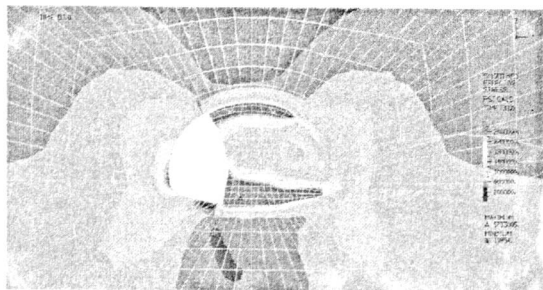


图 4 隧道第二段左导洞开挖应力云图(无支护)

Fig. 4 Stress cloud of the No2 left lead hole of the tunnel (support)

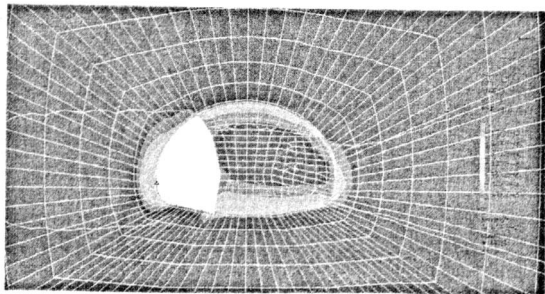


图 5 隧道第二段左导洞开挖应力云图(有支护)

Fig. 5 Stress cloud of the No2 left lead hole of the tunnel (no support)

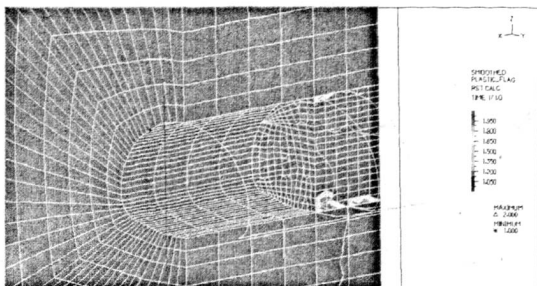


图6 隧道第二段全部开挖塑性区
竖向剖面云图(无支护)

Fig.6 Vertical cloud in plastic area after the No2
section of the tunnel was dug(no support)

5 围岩稳定性数值计算结果分析

通过对龙头山隧道Ⅲ类围岩施工过程的动态数值模拟,得到采用“双侧壁导坑”法施工中围岩先后出现的几处危险区域:

(1)在左右导洞开挖的过程中,隧道左右导洞开挖轮廓线由于棱角的存在,应力集中现象明显,隧道拱肩部位应力集中很大,有连接贯通的趋势,在施加喷锚支护后应力集中现象有了明显改善,因此要在此处加强监控量测并及时支护,避免因时间的增长使围岩塑性区扩展而出现剪切破坏^[4]。

(2)拱腰处在整个施工过程中都存在应力集

参考文献:

- [1] 刘洪洲. 大跨度扁担隧道施工的力学响应及施工方法的研究[D]. 重庆:重庆大学,1999.
- [2] 蒋树屏,刘洪洲,鲜学福. 大跨度扁担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. 2000,9, 19(5):567-572.
- [3] 王宇,罗毅. 凌子口隧道围岩稳定性分析评价[J]. 地质灾害与环境保护,2002,13(3):40-42.

Numerical Analysis of the Stability for the Surrounding Rock During Dynamic Construction Process of Large-span Tunnel

LI Jun, LIU Rui, HOU Qing-jun

(Inner Mongolia Communications Design & Research Institute Co. Ltd, Neimenggu Huhehaote 010010, China)

Abstract: Associated with the project of Longtoushan tunnels, in this paper, by use of ADINA, a nonlinear FEM program, a spatial computation model is made, a numerical computation method with 3-D elastic-plastic finite element is proposed to analyze stability and safety of the III surrounding rock in construction, through analyzing the distributing law of displacement, stress and strain in rock mass followed with tunnels construction, the author gets some beneficial conclusions, which is of guiding meaning for evaluation of stability and security in surrounding rock during construction of large-span highway tunnels.

Keywords: large-span highway tunnel; finite element; stability