

文章编号: 0451-0712(2007)03-0177-05

中图分类号: U451.2

文献标识码: B

雪峰山公路隧道开挖过程中围岩应力形变场的特征分析

马 亢¹, 徐 进¹, 王兰生², 高春玉¹

(1. 四川大学工程科学与灾害力学所 成都市 610065; 2. 成都理工大学工程地质研究所 成都市 610059)

摘 要: 结合湖南雪峰山特长公路隧道工程实践, 根据隧道开挖过程中地应力随施工工序逐步释放的真实过程, 基于有限元计算程序, 运用“施加虚拟支撑力法”进行适当的开发, 对高埋深洞段开挖过程进行数值模拟研究, 获得了隧道施工过程中各工序围岩应力形变场的特征及其变化规律, 能更好地符合工程实际, 同时得到了施工完毕后围岩应力形变场的特征, 从而为设计工作提供科学依据。

关键词: 雪峰山隧道; 应力释放; 施工过程; 数值模拟; 应力形变场

洞室的开挖打破了开挖边界上各点初始的应力平衡状态, 开挖边界上的节点受力不平衡, 为获得新的力学平衡, 围岩就要产生相应的变形, 引起应力的重分布, 从而直接得到开挖后围岩的应力形变场。

正确模拟开挖卸载过程的效果是地下工程数值模拟的一个重要课题。开挖卸载之前, 沿开挖边界上的各点都处于一定的初始应力状态, 开挖使这些边界的应力解除(即卸载), 从而引起围岩应力形变场的变化。对上述过程的模拟通常采用邓肯等人提出的地应力逐步释放法。

根据新奥法隧道施工的基本思想, 隧道开挖后, 围岩从变形到破坏有一个时间历程, 包括隧道本身开挖工序的推进, 开挖面向前推进围岩逐渐释放的时间效应和围岩介质的流变效应, 如能适时地构筑支护结构, 使围岩与支护共同形成坚固的承载环, 就能保证整个结构系统的稳定。因此, 要想真实地模拟隧道开挖与支护的整个施工作业流程, 必须符合隧道开挖应力逐步释放的实际, 本文基于有限元分析程序, 运用“施加虚拟力”来实现隧道真实的开挖过程。

1 所示。

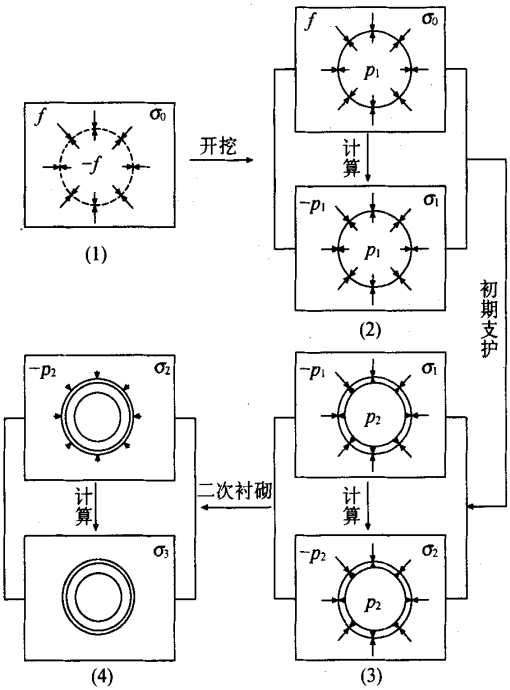


图 1 “施加虚拟力地应力逐步释放法”
隧道施工过程模拟示意

1 隧道开挖过程数值模拟的基本思想

本次研究是通过在开挖边界上施加虚拟支撑力的方法, 来模拟围岩的逐步卸载。施工模拟示意图

(1) 为隧道开挖前的初始地应力状态, 其中初始应力可根据实测地应力或有限元计算而加以确定。

根据各个单元的初始应力,可以计算其等效节点力:

$$F_i^0 = \int_{\Omega} B^T \sigma_0 d\Omega$$

式中: B^T 为应变矩阵的转置阵; σ_0 为单元初始应力向量; Ω 为积分区间,平面问题为单元面积,空间问题为单元体积。

隧道开挖后,在开挖边界的节点 i 上将作用释放节点荷载:

$$f_i = [f_{ix}, f_{iy}]^T = - \sum_j F_j^0$$

此节点荷载由连接节点 i 的被开挖掉的有关单元在节点 i 上的等效节点力综合贡献而成。

这种释放荷载的确定是将释放边界一侧单元的初始应力转化成相应等效节点荷载,然后通过叠加,计算开挖边界上各节点总的等效节点荷载。还有另一种方法是:根据预计开挖边界两侧单元的初始应力,通过插值求得边界节点上的应力,然后假定两相邻边界节点之间应力变化为线性分布,从而按静力等效原则,计算各节点的等效节点荷载,这里不具体叙述。

在开挖阶段(2),作用在开挖边界上的释放节点荷载 $f_{1i} = \alpha_1 f_i$, 式中 α_1 为此阶段的地应力释放率,通常可根据量测资料确定,近似地等于隧道控制点本阶段的变形值与施工变形完毕变形稳定以后该控制测点的总变形值的比值,在缺乏实测变形资料的情况下,可按工程类比法和工程经验加以选定,并根据试算结果予以修正。为实现这一过程,在初始应力场挖去土体单元的同时,在开挖边界上各相应节点施加虚拟支撑力 $p_{1i} = (1 - \alpha_1)(-f_i)$, 即生成新的荷载边界条件,继续进行计算,就直接得到开挖后围岩的应力形变场。

在阶段(3),初期支护施作后,又有一部分的节点荷载 $f_{2i} = \alpha_2 f_i$ 被释放,这时只需将虚拟支撑力减小为 $p_{2i} = (1 - \alpha_1 - \alpha_2)(-f_i)$, 继续进行计算,即得初期支护后围岩和支护的位移和应力。 α_2 为初期支护施作后地应力释放率。

在阶段(4),二次衬砌施作后,剩余的节点荷载完全释放掉了,这时只需去除虚拟支撑力,继续计算就可得到最终竣工后围岩和衬砌的位移和应力。 α_3 为二次衬砌施作后地应力释放率。通常二次衬砌在工程实际中只做安全储备,一般不用于支护受力结构,即初期支护施做完毕后,地应力可认为基本完全释放完毕。

2 虚拟支撑力数值模拟技术在雪峰山隧道中的应用

本次研究以湖南雪峰山特长双洞分离式公路隧道为研究对象,应用有限元分析程序,建立连续介质模型,同时考虑相邻隧道的影响,采用全断面开挖方式,基于现场大量应力形变场的监测资料,对隧道真实的地应力逐步释放的开挖过程进行数值模拟分析,揭示其围岩应力形变场的特征规律。

2.1 计算模型概化

计算模型中,计算区域左右两侧和上下两侧分别向外延伸隧道高度和跨度 5 倍,其中底部施加竖向位移约束,计算范围水平宽 105 m,垂直高 58 m,划分 1 618 个单元,1 593 个节点。模型中,围岩和初期支护选用 4 节点平面实体单元,锚杆单元选用杆单元。建立的连续介质计算模型及力学边界条件如图 2 所示。坐标原点位于模型左下脚处, Y 轴以垂直向上为正方向, X 轴以水平向右为正方向。

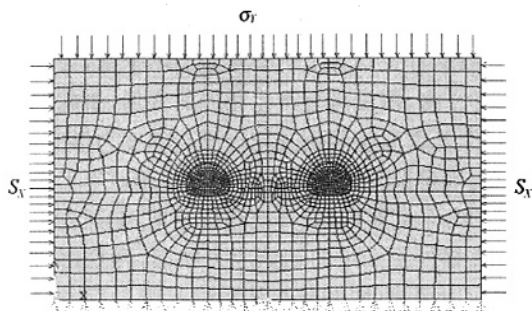


图 2 离散的有限元计算模型及边界条件

2.2 计算分析域力学边界条件的确定

根据雪峰山隧道 K98+040 洞壁围岩二次应力现场测试及数值反演分析的成果(成果待发表),确定模型的力学边界条件为:计算域底部施加竖向位移约束,顶部根据隧道埋深为 496 m 施加自重均布荷载: $\sigma_y = 496 \times 24 \times 10^{-3} = 11.90$ MPa,水平面力 $S_x = 12.94$ MPa,此时侧压力系数为 1.08。

2.3 隧道处初始地应力水平与勘察阶段实测资料的比较

由前述,隧道计算分析域的应力边界条件为:水平面力 S_x 为 12.94 MPa,垂直应力为 11.90 MPa。由此进行第一步初始应力场的计算,就可得到隧道区附近比较真实的初始地应力水平应力分量 σ_x 和垂直应力分量 σ_y ,与勘察阶段该断面附近 ZK3 号钻孔的相应深度附近所做水压致裂法原始地应力测量和 ZK3 号钻孔 Kaiser 效应测试进行对比,见表 1。

表 1 反演后隧道区初始应力与勘察阶段资料的比较

初始应力 确定方法	应力 1 MPa	应力 2 MPa	应力 3 MPa
有限元数值 模拟计算	—	初始水平应力 分量 $\sigma_x=12.9$	初始垂直应力 分量 $\sigma_y=12.5$
水压致裂法 ZK3(6)	最大水平主应力 15.41(NW70°)	最小水平主应力 10.85(NE20°)	垂直应力 13.08
Kaiser ZK3(3)效应	最大主应力 25.53(NW70°)	中间主应力 17.84(NE3.5°)	最小主应力 10.16

从表1中可以看出,3种方法均在一定程度上反映了初始地应力的量值,由于隧道的主体走向约为NW60°,两种方法实测的最大主应力基本和洞轴平行或小角度相交,特征点实测计算反演后的初始应力 σ_x 应和应力2比较, σ_y 应和垂直应力比较。可以看出量值基本相近,从而反映出反演后模型的初始力学边界条件是比较合理的。

2.4 围岩介质物理力学参数

以K98+040为研究断面,隧道岩性为变质砂岩,完整性较好,围岩类别为Ⅳ类,采用全断面施工。根据雪峰山隧道岩石主要物理力学实验成果统计表,并参考有关规范,计算参数见表2。

表 2 Ⅳ类围岩物理力学参数

确定方法 及依据	重度 kN/m ³	内聚力 MPa	内摩擦角 (°)	泊松比	弹性模量 GPa
《规范》值	23~25	0.7~1.5	39~50	0.25~0.3	6~20
计算取值	24	1.1	45	0.25	10

2.5 计算方法及步骤

整个过程一共分为6步,计算方法及步骤见表3。

表 3 隧道各开挖工序

施工工序	开挖内容
1	计算初始应力状态应力场
2	导出开挖边界初始应力,100%反向施加原边界,应力不释放,不开挖岩体
3	开挖左洞,释放部分地应力
4	施做左洞初期支护,释放剩余地应力
5	开挖右洞,释放部分地应力
6	施做右洞初期支护,释放剩余地应力

3 隧道开挖过程中围岩应力变形场结果分析

根据上述施加虚拟支撑力地应力逐步释放法,对隧道实际的计算分析,更能得到符合实际的结果。计算获得了雪峰山隧道研究断面(K98+040)围岩

应力变形场的特征规律。

3.1 隧道开挖过程中围岩应力变形场的特征及变化规律

通过模拟计算分析,得到了隧道开挖过程各工序的围岩应力变形场结果,仅给出工序3和工序5开挖后围岩最小主应力和垂直位移分布图,见图3~图6所示。围岩节点分布见图7所示。

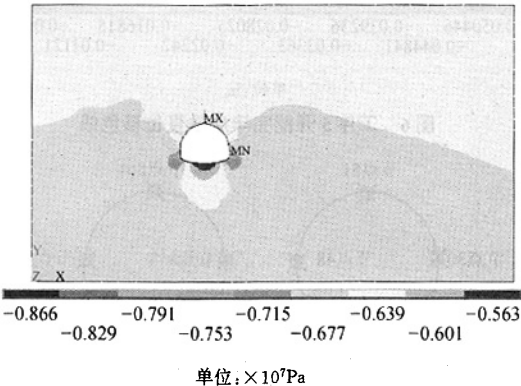


图 3 工序 3 开挖完毕后最小主应力等色线

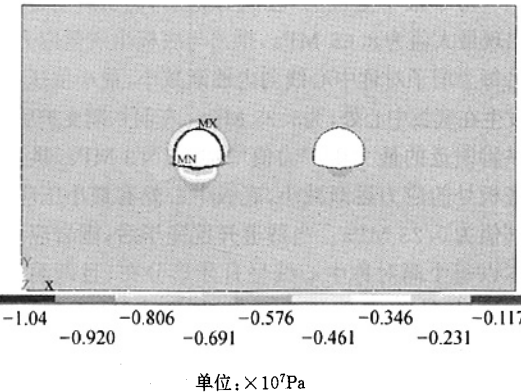


图 4 工序 5 开挖完毕后最小主应力等色线

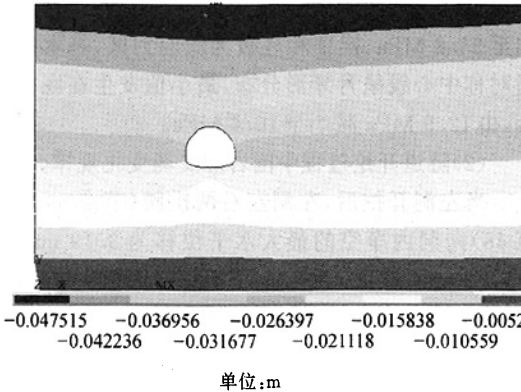


图 5 工序 3 开挖完毕后垂直位移色线

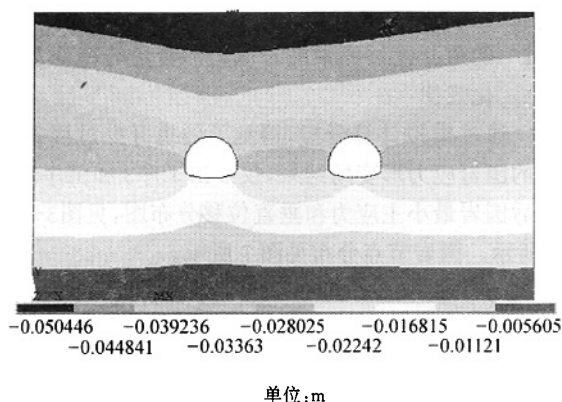


图6 工序5开挖完后垂直位移色线

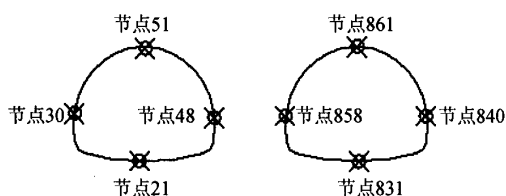


图7 隧道围岩节点分布

(1) 隧道开挖过程中应力场变化规律。

对于最小主应力,左洞开挖后,两拱脚附近区域出现最大值为8.66 MPa,拱顶与底板出现低应力区,沿每个洞子对称中心线向内逐渐减小,最小值压应力发生在底板中心处,为5.25 MPa。左洞初期支护后,两拱脚附近的最大压应力值增加到10.3 MPa,拱顶及底板处的应力逐渐减小,底板中心处有最小压应力,其值为0.23 MPa。当隧道开挖完毕后,围岩应力基本以每个洞对称中心线呈月牙形分布,且两洞的围岩应力量值相似。底板处有最小压应力,均约0.11 MPa,未出现拉应力区,拱脚附近出现较小范围的高压应力区,最大主压应力达到10.5 MPa。

类似于最小主应力,最大主应力的变化规律基本相同,拱脚附近的最大压应力由24.1 MPa 逐渐增加至35.8 MPa,拱顶和底板为低应力区,基本以两洞对称中心线呈月牙形分布,最小值发生在底板中心,由12.9 MPa 减小至10.4 MPa。

(2) 隧道开挖过程中围岩形变场变化规律。

当左洞开挖后,左洞左右两拱腰(节点30和节点48)向洞内净空的最大水平位移为3.19 mm和-1.43 mm,拱顶(节点51)下沉值及底板中点(节点21)隆起值分别为-4.32 mm和3.84 mm;当左洞初期支护施做后,以上位移增加至6.99 mm、-4.32 mm和-9.65 mm、8.86 mm;当隧道开挖完毕后,左洞节点30和节点48的向洞内发生的最终水

平位移及节点51的拱顶下沉值及节点21底板隆起值分别为7.06 mm、-6.81 mm和11.13 mm、8.39 mm(右洞开挖后使左洞地板隆起值略有下降),右洞左右两拱腰(节点858和节点840)向洞内发生的最终水平位移分别为4.78 mm和-7.06 mm,右洞拱顶(节点861)下沉值和底板中点(节点831)隆起值分别为-11.19 mm和8.42 mm。

3.2 隧道开挖完后应力形变场特征

由于隧道开挖工程一般考虑后期施工卸载的影响,而隧道在初始应力条件下的早期地层应力形变场不是研究的重点,将最后得到的围岩位移场减去初始位移场,应力场不减可以得到隧道开挖完毕后的应力形变场特征规律。仅给出部分,如图8~图12所示。

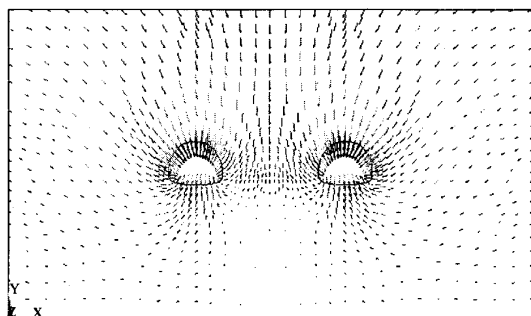


图8 围岩变形矢量

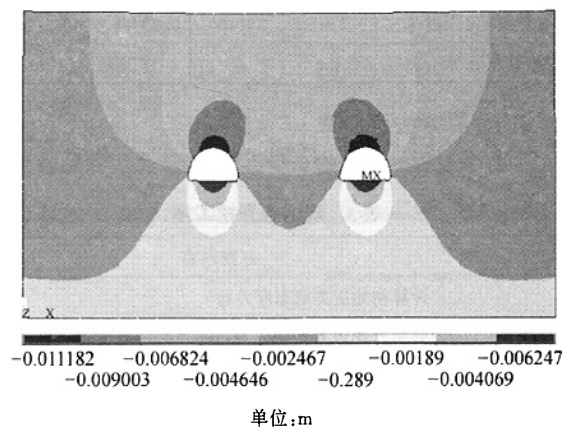


图9 围岩垂直位移分量色线

3.3 计算结果分析

通过计算分析,得到的隧道各周边特征点的形变量,单元最大应力值见表4。由此,可以得到隧道开挖后应力形变场的几点认识。

(1)根据《公路隧道施工技术规范》要求,在埋深 $H > 300$ m的条件下,隧道周边允许相对位移值或拱顶位移实测值与隧道的宽度之比在1%~3%之

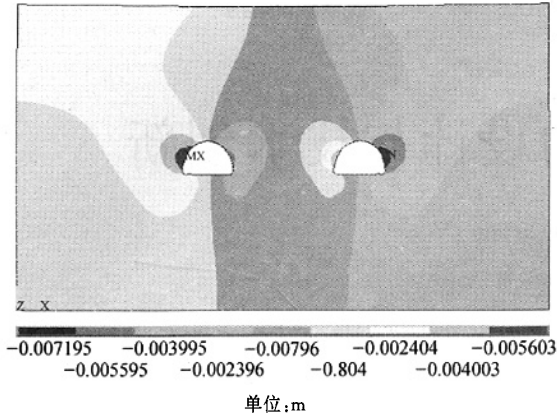


图 10 围岩水平位移分量等色线

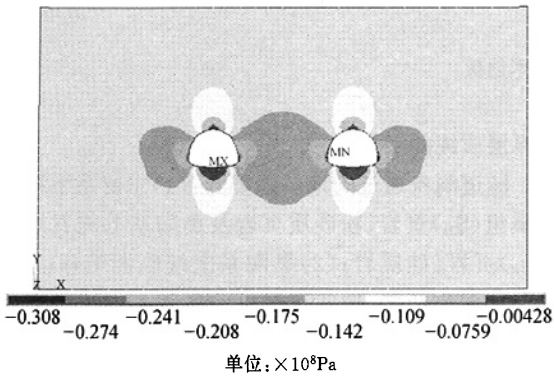


图 11 开挖后围岩垂直应力分量等色线

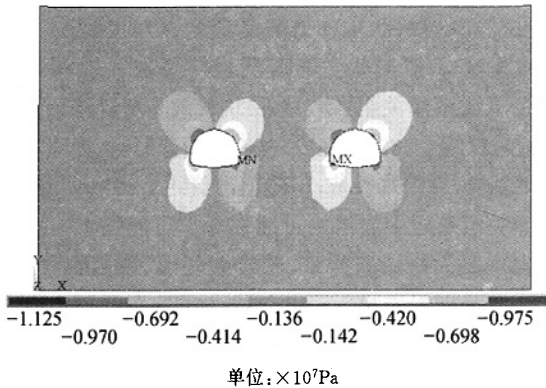


图 12 开挖后围岩最大剪应力等色线

表 4 隧道开挖完毕后计算结果

隧道围岩周边变形最大值			单元最大应力 (垂直应力分量)
拱顶下沉	拱腰(x 方向)	边墙(x 方向)	
11.13 mm	5.47 mm	4.61 mm	30.8 MPa

间,经过计算得到的拱顶位移与隧道宽度的最大比值为 0.10%,隧道周边的变形值满足隧道周边允许位移值。

(2)隧道开挖引起地应力调整,围岩向隧道内

压,隧道开挖后隧道顶部、侧墙以及底板附近均发生较大位移,开挖引起的最大位移发生在隧道拱顶,数值为 11.13 mm,且位移方向均指向隧道;距离隧道 3 倍洞径以外的岩体位移量很小,基本不受隧道开挖的影响。

(3)由于隧道开挖后产生的形变量沿围岩深度越来越小,即越向围岩深处,围岩受隧道开挖卸载的影响越小。另外,在某一个隧道开挖后本隧道的周边位移量变形很大,而在另一个隧道开挖过程中基本不受影响,反映了公路双洞隧道中每个洞子的开挖所产生的围岩形变只局限于一定的范围内,并且该洞段设计的洞间距离是合理的。

(4)隧道开挖后,隧道周围产生应力集中情况,隧道拱腰、拱脚成为高应力的危险区,开挖后的最大应力发生在隧道拱脚附近,其数值为 30.8 MPa。且距离隧道洞径 1 倍范围以外的岩体应力受开挖的影响较小。在隧道拱顶和拱底附近区域应力较小,若围岩条件不好时,甚至可能会出现拉应力。

(5)本次研究的洞段围岩条件较好,强度参数较高,不易导致屈服,隧道开挖后围岩也未出现拉应力区,如果将围岩的内聚力降低后,即在较软弱的围岩下进行开挖,隧道将在拱底和拱脚附近发生一定的塑性变形。

4 结语

虚拟支撑力法数值模拟技术,为隧道工程开挖模拟方法提供了一种较为真实的模拟思路和方法,该方法准确可靠,获得的隧道开挖过程中应力形变场的特征规律更能符合实际。对于隧道工程中每一工序的应力释放率和模型分析域的力学边界条件的确定问题,还应密切结合现场围岩松动位移及应力监测的资料加以对比校核及反演分析确定,从而能获得隧道开挖问题中围岩应力形变场更为深刻的认识,为隧道设计工作提供依据。

参考文献:

- [1] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
- [2] 肖明. 地下洞室施工开挖三维动态过程数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(4).
- [3] 杨志法, 王思敬, 冯紫良, 等. 岩土工程反分析原理及应用[M]. 北京:地震出版社, 2002.
- [4] 夏永勋, 等. 公路双连拱隧道开挖方法及施工过程数值模拟研究[D]. 长安大学, 2003.