

空间反向荷载法模拟隧道开挖

胡庆安¹, 崔刚¹, 蒋丽君²

(1. 长安大学公路学院, 西安 710064; 2. 许昌市公路局, 河南 许昌 461000)

摘要: 针对目前在数值分析中利用叠加法模拟隧道分步开挖时, 考虑材料非线性和几何非线性在运算时的不合理性, 提出了有限元数值模拟计算隧道开挖时空间反向荷载法。根据隧道开挖步骤, 将作用在开挖面上的一部分压应力按照一定的比例反向作用, 来模拟隧道开挖时的围岩应力释放, 不仅较为真实、方便地模拟隧道开挖时结构和围岩的受力连续变化过程, 而且便于进行非线性分析。

关键词: 隧道; 开挖; 数值分析; 空间反向荷载; 非线性; 连续变化

中图分类号: U451+.2

文献标识码: A

Simulating of Tunnel Excavation by means of Spatial Opposite Loading Method

HU Qing-an¹, CUI Gang¹, JIANG Li-jun²

(1. College of Highway Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Highway Bureau of Xuchang Municipality, Xuchang 461000, Henan, China)

Abstract: On basis of the irrationality of the material non-linearity and geometry non-linearity considered in the calculations of the numerical analysis performed to simulate the step-by-step excavation of the tunnels by means of superposition method, the article proposes a spatial opposite loading method for the numerical simulation of the excavation of tunnels by finite element method. According to the excavation steps, appropriate proportions of the pressing stresses acting on the excavation face are converted into loads in opposite directions so as to simulate the stress releasing of the surrounding rock mass during tunnel excavation. By means of the presented method, real and convenient simulations of the consecutive variations of the forces of the structures and surrounding rock masses during the tunnel excavation can be achieved and non-linear analysis can be made without difficulty.

Key words: tunnel; excavation; numerical analysis; spatial opposite load; non-linearity; consecutive variations

1 前言

公路隧道由于其围岩压力和参数的不确定性, 长期以来工程界对隧道结构的设计仍然沿袭工程类比法。但是, 随着人们认识水平的提高和计算技术的发展, 近年来结合类比法的初步设计, 利用有限元方法对隧道施工过程进行数值模拟分析, 以考察设计参数的合理性以及施工方案的可行性, 已经成为普遍的做法。目前, 国内外隧道与地下结构传统有限元分析方法的步骤一般如下:

确定各种计算参数;

建立隧道结构计算模型和有限元网格剖分;

分阶段计算释放节点荷载和结构自重等因素的等效节点荷载;

分阶段计算围岩和结构的应力及位移;

叠加各施工阶段的计算值, 以得到围岩和衬砌

结构的最终应力和位移。围岩和衬砌最后的力和位移值为各个施工阶段相应值叠加的结果, 即

$$= \sigma_0 + \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 + \sigma_5 = \sigma_0 + \sum_{j=1}^n \sigma_j \quad (1)$$

$$= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 + \sigma_5 = \sum_{j=1}^n \sigma_j \quad (2)$$

式中 n 为施工阶段数。

可以看到, 式 (1)、(2) 是采用了叠加法的原理, 将围岩和衬砌最后的应力和位移值定义为各个施工阶段相应值的叠加, 这种方法实际上是每次开挖后应力值重新从初始应力开始算起, 在计算结果的数值上进行叠加, 这显然与隧道实际开挖时应力的变化不一致。更为不利的是, 无法实现非线性计算。

2 隧道施工开挖的空间反向荷载法

所谓空间反向荷载法, 就是每步开挖后, 根据围岩

收稿日期: 2005 - 11 - 24; 修回日期: 2006 - 03 - 31

作者简介: 胡庆安 (1956 -), 男, 江苏南京人, 副教授, 硕士生导师。

的类型以及工程的实际情况,将开挖后的开挖面上的 $a\%$ (a 为100以内的实数)的力反作用回去进行计算,直到开挖到最后一步支护好二衬混凝土。最终的结果就是整个围岩自重的 $1-a\%$ 的力作用在一衬上,剩下自重的 $a\%$ 的力将由一衬和二衬共同承担,这样就可以达到隧道在开挖过程中,一衬和二衬按比例承受塑性区的真实变化情况,且易实现一衬和二衬按比例承受围岩荷载的开挖方式。

正确的隧道与地下结构的分析方法必须考虑到分阶段施工的特点。工程师们不但要关注隧道围岩以及开挖面的稳定性,而且关注各个施工阶段中围岩和尚未完成的结构的受力和变形情况。通过ANSYS有限元软件,利用空间反向荷载法能够准确、有效地模拟隧道在施工中的连续开挖,更加真实地反映开挖面以及衬砌的应力以及位移连续变化情况。

3 工程实例

3.1 工程概况

某新奥法施工黄土隧道,围岩类别为Ⅱ类围岩,支护参数为:初次支护系统锚杆为 $\phi 25$ 中空注浆锚杆,拱、墙部锚杆间距 $0.80\text{m} \times 1.00\text{m}$,长度 3.50m ; $\phi 6.0$ 的双层钢筋挂网,网格间距 $0.20\text{m} \times 0.20\text{m}$ 。 $\phi 50$ 小导管超前支护,环向间距 0.40m ,长度 5.0m 。 $\text{I}20$ 的工字钢支撑,纵向间距 0.75m 。 $\text{C}25$ 混凝土喷层厚度 0.25m 。仰拱为厚度 0.45m 的 $\text{C}25$ 钢筋混凝土,二次衬砌为厚度 0.45m 的 $\text{C}25$ 模筑钢筋混凝土。

3.2 有限元数值模拟计算

3.2.1 模型与计算参数

计算程序采用大型结构分析有限元程序ANSYS,隧道计算模型采用三维空间模型。利用对称性,建好的一半隧道模型共54923个单元。根据工程经验,采用一衬承担围岩自重的70%的力,一衬和二衬共同承担围岩自重剩下的30%的力的原则,隧道开挖局部剖面模型图见图1,模型中各构件采用的单元类型以及材料参数见表1。

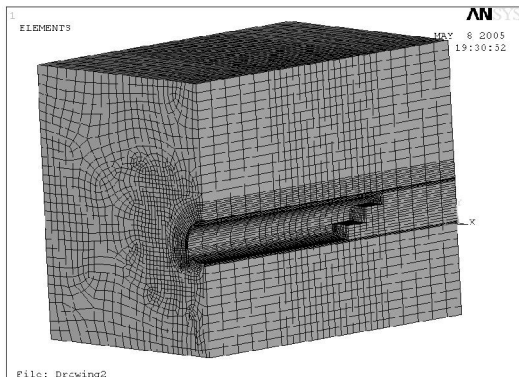


图1 隧道开挖局部剖面模型图

Fig 1 Model of part of tunnel excavation profile

表1 模拟隧道各结构层的材料参数

Table 1 Parameters of structural element materials of simulated tunnel

构件名称	泊松比	弹性模量 / Pa	密度 / (kg/m^3)
线性围岩土	0.400	1.50×10^9	2000
混凝土	0.167	2.85×10^{10}	2500
钢拱圈	0.330	2.00×10^{11}	7800
锚杆	0.330	2.00×10^{11}	7800

注:非线性围岩土:粘聚力 C 为 $1 \times 10^5 \text{ Pa}$,内摩擦角为 37° 。

3.2.2 施工开挖步骤

模型整体的侧面开挖图见图2示,整个模拟开挖过程可以分为7步,分别为:

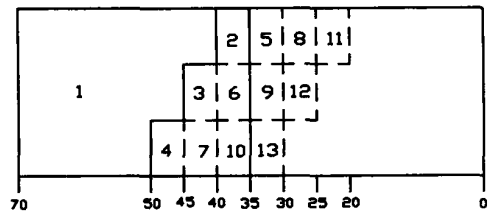


图2 隧道施工开挖步骤图

Fig 2 Steps of tunnel excavation

第一步模拟整个围岩在重力场下实际受力;第二步开挖掉模型中数字1所示的围岩土,并喷砌上一衬;第三步开挖掉模型中数字2、3、4所代表的围岩土,并喷砌上一衬,同时铺设钢拱圈和锚杆;第四步开挖掉模型中数字5、6、7所代表的围岩土,并喷砌上一衬,同时铺设钢拱圈和锚杆;第五步开挖掉模型中数字8、9、10所代表的围岩土,并喷砌上一衬,同时铺设钢拱圈和锚杆;第六步开挖掉模型中数字11、12、13所代表的围岩土,并喷砌上一衬,同时铺设钢拱圈和锚杆;第七步浇筑上二衬,再进行计算。

3.2.3 计算结果与分析

通过计算,整个隧道开挖到最后一步时,铺设钢拱圈处拱顶竖向位移变化见图3,铺设钢拱圈处一衬最小主应力变化见图4,铺设钢拱圈处一衬最大主应力变化见图5,开挖面拱顶挠度变化见图6。

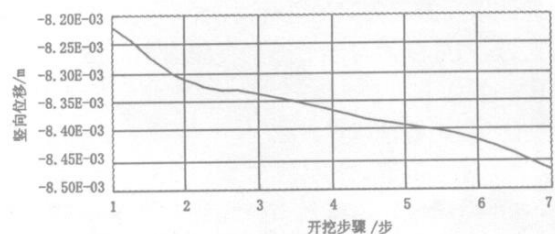


图3 铺设钢拱圈处拱顶竖向位移变化图

Fig 3 Curve of variations of vertical displacement of tunnel crown where steel arches are installed

从图3可以看出,在开挖第一步的时候,铺设钢拱圈和锚杆处拱顶的竖向位移变化比较快,主要是因为

第一步就把围岩开挖出一个台阶形状,而在以后的开挖过程中,竖向位移变化逐渐增大,因此,在进行新一轮开挖时,一定要做好掌子面后边的支护工作,以防围岩的不稳定性。

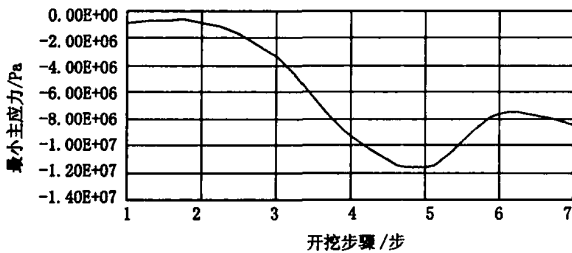


图 4 铺设钢拱圈处一衬最小主应力变化图

Fig 4 Curve of variations of minimum principal stress of primary reinforcement where steel arches are installed

从图 4 可以看出,在开挖过程中,铺设钢拱圈和锚杆处拱顶的最小主应力随着隧道的连续开挖而逐渐增大,直到开挖到第五步,其最小主应力达到最大值为 -1.17×10^7 Pa。开挖到第六步时,此时所有的钢拱圈和锚杆已全部铺设好,所以此时一衬的应力有所减小,直至减小到 -7.63×10^6 Pa。最后一步中一衬和二衬共同承担围岩自重剩下的 30% 的力,所以最小主应力又有所增大。

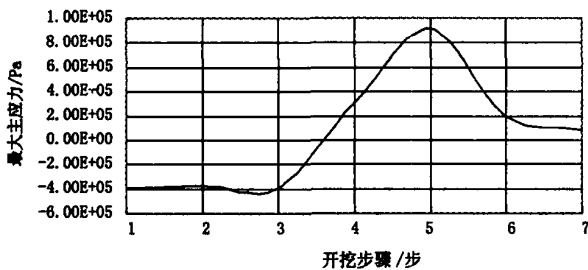


图 5 铺设钢拱圈处一衬最大主应力变化图

Fig 5 Curve of variations of maximum principal stress of primary reinforcement where steel arches are installed

从图 5 可以看出,在开挖过程中,铺设钢拱圈和锚杆处拱顶的最大主应力随着隧道的连续开挖而逐渐减小,直到开挖到第三步,其最大主应力达到最小值为 -3.95×10^5 Pa。在以后的开挖步骤中,最大主应力一直在逐渐增大,开挖到第五步,最大主应力达到 9.11×10^5 Pa,在以后的开挖中,最大主应力又逐渐减小,因为此时所有的钢拱圈和锚杆已全部铺设好。开挖到最后一步的时候,最大主应力减小比较慢,主要是由于此时已经支护好二衬了。

通过图 4 和图 5 的分析可以得出,在隧道开挖的过程中,开挖到第五步时,由于此时仰拱没有做好,一衬还没有形成闭合的环形,导致所有的荷载完全由拱脚承担,所以这一步拱圈受力最不利。到第六步仰拱做好后,一衬形成环形体系,此时应力又有所减小。所

以,在隧道实际施工中,应该及时施做一衬,并且保证其厚度,绝不能让一次衬砌的应力值到达它的破坏值,以保证掌子面的安全。

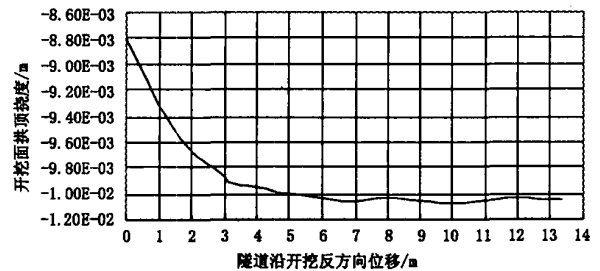


图 6 开挖面拱顶挠度变化图

Fig 6 Curve of variations of deflections of tunnel crown at excavation face

由图 6 可见,开挖面对拱顶挠度的影响范围有 5m 左右,也就是说在开挖过程中,在 5m 的范围内,拱顶挠度与掌子面距离成正比,5m 以外的影响已很小。

4 结论

采用空间反向荷载法对隧道进行了模拟分析,重点研究了隧道施工过程中开挖面的空间效应、一衬的位移以及应力变化情况,得出如下结论:

采用空间反向荷载法可以真实地模拟隧道的开挖过程,准确地反应隧道在开挖过程中,开挖面、一衬以及围岩的受力变形情况。

在开挖过程中,当断面围岩开挖完成而仰拱还没有做好时,一次衬砌受力最不利。为了安全,不仅要保证一衬的施工质量和厚度,而且要及时施做仰拱。

开挖掌子面对开挖面拱顶挠度的影响范围有 5m 左右,因此必须注意对掌子面附近的变形监控量测,同时根据量测到的结果做好支护工作。

采用空间反向荷载法可以真实地反映隧道在开挖的过程中,材料非线性和几何非线性的特性。

参考文献:

- [1] 孙钧,侯学渊. 地下结构 [M]. 北京:科学出版社,1987.
- [2] 彭定超,袁勇. 开挖施工方式对连拱隧道中墙影响的空间分析 [J]. 现代隧道技术,2002,39(1): 47-53.
- [3] 蒋树屏. 我国公路隧道建设技术的现状及展望 [A]. 国际隧道研讨会暨公路建设技术交流大会论文集 [C]. 北京:人民交通出版社,2002.
- [4] 中华人民共和国交通部. JTJ 026-90,公路隧道设计规范 [S]. 北京:人民交通出版社,1990.
- [5] 中华人民共和国交通部. JTJ 042-94,公路隧道施工规范 [S]. 北京:人民交通出版社,1994.
- [6] 王文正. 双联拱公路隧道开挖方法及施工过程数值模拟研究 [D]. 西安:长安大学研究生部,2003.
- [7] 夏永旭,王永东. 隧道结构力学计算 [M]. 北京:人民交通出版社,2004.