

文章编号:1671-6833(2008)02-0137-04

# 软岩隧道开挖与支护的三维有限元仿真分析

张洵安, 王显彬

(西北工业大学 力学与土木建筑学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 为了验证某国防隧道工程设计和施工方案的可行性. 根据地下结构设计理论和岩石屈服的 Drucker-Prager 准则, 考虑到围岩的自身承载能力, 用 ANSYS9.0 软件对该隧道的开挖与支护过程进行三维有限元模拟, 对设计参数进行验证, 对周边围岩变形和初期支护效果进行综合分析, 得出结论: 该设计方案可行, 初期支护满足要求, 围岩能够自行稳定. 该数值分析结果与现场实测结果一致, 可为相关工程设计和现场施工提供理论指导.

**关键词:** 软岩隧道; 有限元法; 锚喷支护; 三维数值模拟  
**中图分类号:** TU 457 **文献标识码:** A

## 0 引言

由于岩体材料构造的复杂性, 在地下工程围岩的应力和变形中, 难以采用解析方法, 地下工程长期处于“经验设计”和“经验施工”的局面<sup>[1-2]</sup>. 随着数值计算技术的飞跃发展, 有限元设计方法不断应用于隧道工程设计中, 它不仅可以考虑岩土介质的非均匀性、各向异性、非连续性以及几何非线性, 而且还能解决节理、裂隙、断层等问题, 使隧道结构的形式和参数设计更趋合理、经济. 在以往的地下工程有限元分析中, 大多数局限于二维模拟, 不能很好地开展空间效应的研究. 要正确地对隧道的开挖与支护进行全面分析, 使用三维有限元分析是必须的<sup>[3]</sup>. 基于此, 笔者以某国防隧道工程开挖与支护的三维有限元数值模拟研究为背景, 对围岩的初始应力场、开挖与支护方案的有效性和合理性进行了全面论证.

## 1 工程实例

某国防隧道在山地中进行开挖, 点位所处山体饱满, 无植被, 石质以火山熔岩为主, 后期构造运动明显, 构造铲状陡倾, 完整性较差, 表面风化严重, 围岩类别为 IV 类. 隧道设计为直墙半圆拱形, 毛洞跨度 6 m, 洞高 9 m, 洞室埋深自底板标高

算起 51 m. 采取全断面一次开挖, 拱顶初期锚喷支护完成而且稳定后进行二次支护, 每次开挖进尺 3 m. 其支护结构参数如表 1 所示.

表 1 IV 类围岩条件下初期支护参数<sup>[4]</sup>

Tab. 1 Parameter of preliminary lining under IV wall rock condition

喷射混凝土		锚杆			钢筋网	钢拱架
强度等级	厚度/cm	直径/mm	间距/m	长度/m		
C20	10	18	1.2	2.5	无	无

## 2 模型建立及计算方法

### 2.1 确定范围及边界条件

由于隧道属于细长结构物, 即隧道的横断面相对于纵向长度来说很小, 可以假定在围岩荷载作用下, 其纵向没有位移, 只有横向发生位移. 根据隧道的地层结构特性, 近似地把围岩按非线性模型、平面应变单元考虑<sup>[5]</sup>. 理论和实践表明, 对于地下洞室开挖后的应力应变, 仅在洞室周围距洞室中心点 3~5 倍隧道开挖宽度 (或高度) 的范围内存在实际影响, 在 3 倍宽度处的应力变化一般在 10% 以下<sup>[6]</sup>, 因此本隧道模拟的地层范围取为: 横向两端除去 3 倍的洞径 (6 m) 为 18 m, 总共宽 42m; 高度为埋深 24m, 隧道底下 1 倍洞高

收稿日期: 2008-03-24; 修订日期: 2008-05-05

基金项目: 西北工业大学科技创新基金资助 (M450211), 西北工业大学研究生创业种子基金资助 (Z200729)

作者简介: 张洵安 (1959-), 男, 西北工业大学教授, 博士生导师, 从事结构工程的教学及研究工作; 王显彬 (1977-), 男, 工程师, 西北工业大学硕士研究生, 从事国防地下工程的施工及管理管理工作. Email: wxb9716@163.com.

(9 m), 总共地层高 42 m. 边界条件定为: 左右两侧水平约束, 下部垂直约束, 上部为自由边界. 按照“拱是重点, 拱、墙有别”的原则<sup>[1]</sup>, 初期支护的重点放在隧道拱部.

2.2 计算参数

依据现场提供的地质资料和试验结果, 岩体以 IV 类围岩为主, 围岩、锚杆加固体、喷射混凝土的参数取值如表 2 所示.

表 2 有限元计算的物理力学参数表<sup>[7]</sup>

Tab.2 Physical mechanics parameter of FEM computing

	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	密度 ρ /(kg · m <sup>-3</sup> )
围岩材料	15	0.30	2 400
锚杆加固区材料	20	0.25	2 500
喷射混凝土材料	21	0.18	2 500

2.3 计算模型

考虑岩体材料的非线性, 围岩采用 Drucker - Prager 屈服准则, 表达式<sup>[7]</sup>为:

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \tag{1}$$

其中:

$$\begin{cases} I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \\ J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 + \sigma_2)^2 + (\sigma_2 + \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \end{cases} \tag{2}$$

材料参数 α 和 k 一般通过拟合摩尔 - 库仑屈服条件确定, 当 Drucker - Prager 圆与库仑六边形的外顶点重合时, 可得:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3} (3 - \sin \varphi)} \\ k = \frac{6 \cos \varphi}{\sqrt{3} (3 - \sin \varphi)} \end{cases} \tag{3}$$

DP 材料受压屈服强度大于受拉屈服强度, 当已知单轴受拉屈服应力和单轴受压屈服应力时, 则可以得到 φ、c.

$$\begin{cases} \varphi = \sin^{-1} \parallel \frac{3\sqrt{3}\beta}{2 + \sqrt{3}\beta} \parallel \\ c = \frac{\sigma_y \sqrt{3} (3 - \sin \varphi)}{6 \cos \varphi} \end{cases} \tag{4}$$

β 和 σ<sub>y</sub> 由受压屈服应力和受拉屈服应力计算得到.

$$\begin{cases} \beta = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sqrt{3} (\sigma_c + \sigma_t)} \\ \sigma_y = \frac{2\sigma_c \sigma_t}{\sqrt{3} (\sigma_c + \sigma_t)} \end{cases} \tag{5}$$

式中: I<sub>1</sub> 为应力张量的第一应力不变量; J<sub>2</sub> 为应

力偏张量的第二应力不变量; c、φ 为岩石的黏聚力、内摩擦角; σ<sub>c</sub>、σ<sub>t</sub> 为受压屈服应力、受拉屈服应力.

锚杆加固的有限元模型, 根据文献资料及以往的施工经验, 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, 而在施工过程中锚杆的真正作用是及时加固, 限制塑性区的发展, 使岩体能保持较好的连续性和整体性, 从而使围岩能够很好地起到自承作用<sup>[8]</sup>, 因此锚杆可采用“等效材料”进行模拟. 锚杆加固区及围岩地层均采用“Brick 8node 45”块体单元, 初期喷射混凝土材料采用“Elastic 4node 63”壳体单元<sup>[9]</sup>.

3 方法及步骤

三维有限元模型的建立如图 1 所示, 有限元计算模型如图 2 所示.

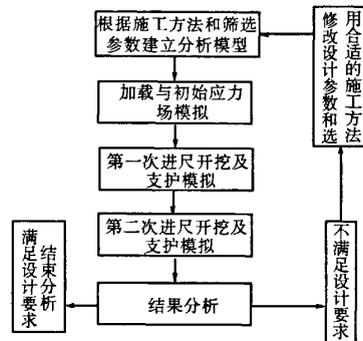


图 1 隧道开挖与支护过程分析流程图

Fig.1 Analysis flow chart of excavation and supporting process about tunnel

施加荷载并利用 ANSYS 中单元的“生死”技术进行隧道开挖与支护的三维仿真模拟<sup>[10]</sup>. 隧道开挖时, 选择将被挖掉的单元, 然后将其杀死, 以实现开挖的模拟. 增加支护时, 将相应支护部分在开挖时被杀死的单元激活. 当单元的生死状态有变化时, 程序重新生成体系刚度矩阵, 求解体系内力和变形的改变量, 从而实现模拟开挖与支护的计算.

根据变形图和位移图, 分析不同开挖过程中隧道周围的围岩位移; 根据应力图, 讨论所采用的支护方案是否合理有效; 根据变形图和内力图, 判断设计所选定的初期支护参数是否满足要求.

4 模拟结果分析

4.1 未加荷载前的模型图

变形图如图 3 所示, 位移图如图 4 所示, 主应

力等值线图如图 5 所示. 隧道在开挖过程中, 最大地面变形为 1.411 mm, 总的拱顶下沉很小, 为 1.157 mm, 而隧道底部的围岩向上的反弹也只有 0.251 mm, 两侧墙张开、而仰拱向上移动, 同时围岩在拱顶部分形成一个“V”字型位移场. IV 类围岩在埋深 50 ~ 500 m 范围内, 拱顶允许下沉的标

准值为 2 ~ 6 mm<sup>[1]</sup>, 从隧道周围的变形情况来看, 其变形值远远小于标准值. 两边侧墙的最大水平位移是 0.153 mm, 移动值非常小, 因此采用全断面开挖该隧道是安全的, 围岩能够自行稳定, 其开挖方案科学合理.

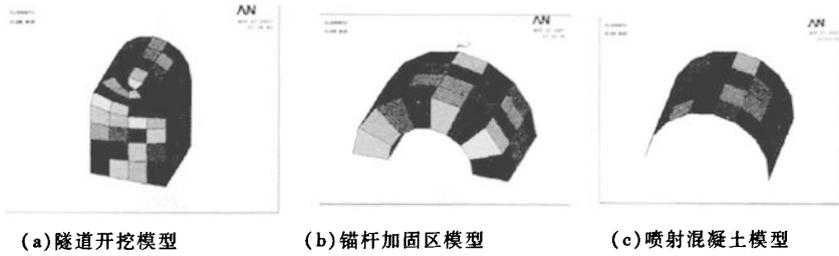


图 2 有限元计算模型

Fig. 2 The calculation model of finite elements

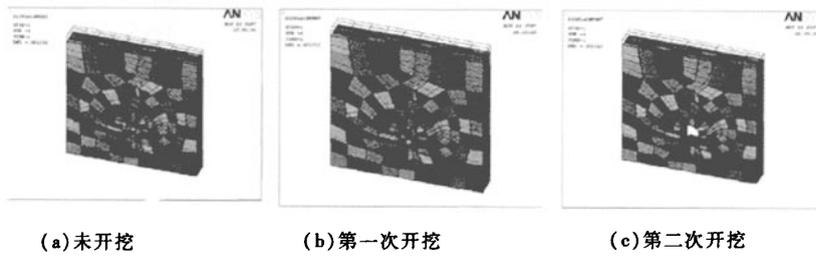


图 3 地层变形图

Fig. 3 Transform picture

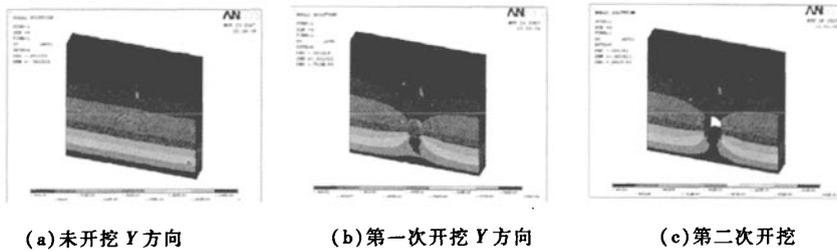


图 4 Y 方向位移图

Fig. 4 Moving picture

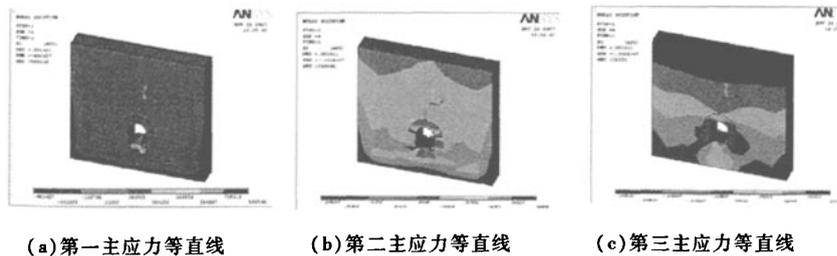


图 5 二次开挖主应力等直线图

Fig. 5 Isoline of the principal stress

从各个方向地层的应力图可以看出,随着隧道的逐步开挖,整个地层大部分区域都是受压的,只是在隧道附近一个很小的区域范围内出现拉应力.围岩最大拉应力为 0.87 MPa,最大压应力为 2.05 MPa,同时从主应力图可以知道,拉应力区域大都在所加固的围岩范围以内,而围岩加固的范围是由锚杆的长度决定的.因此,说明在本隧道的设计中,采用 2.5 m 的锚杆长度是合理、有效的.

#### 4.4 内力图

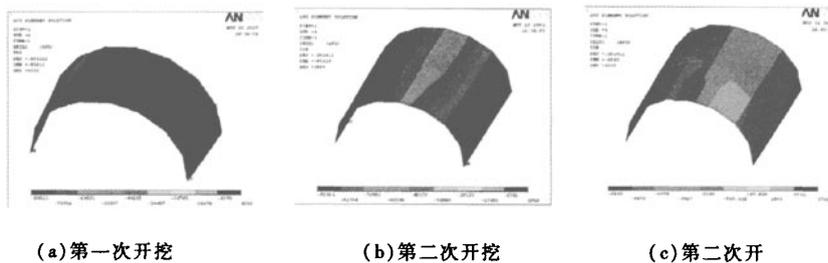


图 6 初期支护内力图

Fig. 6 Internal force of principal stress

从支护结构的变形和内力如图 6 所示,最大的拉力为 3.969 kN,压力为 92.414 kN,最大的剪力为 83.011 kN.将内力换算成初期支护结构上的应力为:最大拉应力 0.084 MPa,最大压应力 1.962 MPa,最大剪应力 2.306 MPa.设计中隧道初期支护采用的是 C20 普通硅酸盐水泥,其抗拉设计值是 1.1 MPa,抗压设计值是 9.6 MPa,抗剪设计强度是 4.0 MPa<sup>[11]</sup>.通过和设计值对比,说明采用全断面开挖方法修建该隧道,设计所选定的初期支护参数满足设计要求.

## 5 结论

通过对该隧道的开挖与支护进行三维有限元仿真分析,与设计参数进行比较,得出了如下结论:

(1) 笔者所采用的三维数值分析方法能有效地模拟隧道的开挖与支护全过程.

(2) 计算结果与设计参数相吻合.围岩变形量在临界范围以内,采用全断面开挖方法可行.

(3) 隧道开挖后,围岩的受拉区大都发生在隧道拱部锚杆加固区内和底部,说明所采用的锚杆参数合理,底部可视具体情况施作仰拱.

(4) 初期支护的变形值远小于其设计值,所选取的初期支护设计参数能够满足设计要求.

#### 参考文献:

[1] 关宝树.隧道工程设计要点集[M].北京:人民交通出版社,2003.5-9.  
[2] 谷兆祺,彭守拙,李仲奎.地下洞室工程[M].北京:清华大学出版社,1994.151-152.  
[3] SWOBODA G. Three-dimensional numerical modeling for TBM tunneling in consolidated clay[J]. Tun-

nelling and Underground Space Technology, 1999, 14 (3):327-333.

[4] TB10003-2005,铁路隧道设计规范[S].北京:中国铁道出版社,2005.  
[5] 王春生,周翠英.梅河高速公路隧道稳定性数值模拟[J].中山大学学报:自然科学版,2005,44(1):253-254.  
[6] 徐干成,白洪才.地下工程支护结构[M].北京:中国水利水电出版社,2003.211-213.  
[7] 赖永标,胡仁喜,黄书珍. ANSYS 11.0 土木工程有限元分析典型范例[M].北京:电子工业出版社,2007.67-78.  
[8] 俞琳.软岩隧道开挖与支护数值分析[D].大连理工大学硕士学位论文,2005.46-51.  
[9] 汪小敏,黄宏伟,谢雄耀.软弱围岩隧道施工三维有限元分析[J].地下空间与工程学报,2007,3(6):1114-1118.  
[10] 李权. ANSYS 在土木工程中的应用[M].北京:人民邮电出版社,2005.127-156.  
[11] 佚名.混凝土结构设计原理[M].北京:中国建筑工业出版社,2004.267-268.

(下转第 144 页)

(3)分析结果显示,FA掺量对粉煤灰混凝土的耐磨性影响最小.这点是基于粉煤灰掺量不超过50%的混凝土而言,对于>50%掺量的粉煤灰混凝土耐磨性方面的研究还不充分.

#### 参考文献:

- [1] 杨伯科.混凝土实用新技术手册[M].辽宁:吉林科学技术出版社,1998.
- [2] 陈瑜,张起森.掺粉煤灰道路混凝土耐磨性能的模糊综合评估[J].建筑材料学报,2004,(6):178-182.
- [3] 邓聚龙.灰关联熵分析方法[J].系统工程理论与实践,1996,(8):7-11.
- [4] 肖新平.灰技术基础及其应用[M].北京:科学出版社,2005.
- [5] 刘红瑛.影响沥青混凝土水稳定性的灰关联熵分析[J].长安大学学报,2003,23(6):7-10.
- [6] 钱觉时.粉煤灰特性与粉煤灰混凝土[M].北京:科学出版社,2002:199-200.
- [7] 张炳乾.粉煤灰水泥混凝土路面修筑技术研究[D].长安大学,2000:38-39.
- [8] Bilodeau A, Malhotra V M. Concrete incorporating high volumes of ASTM class fly ashes: mechanical properties and resistance to deicing salt scaling and to chloride-ion penetration[J]. ACI Special Publication, Sp132-19, 1992.

### Research on the Wear-resistant of Fly-ash Concrete by Grey Correlation Entropy Method

ZHANG Ming-gong, ZHU Hong-zhou, XU Song, TANG Bo-ming

(School of Civil Engineering & Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** Wear resistance is one of the main properties of road and bridge concrete. Improving the wear resistance of concrete plays an important part in ensuring its durability. Based on the gray entropy theory, This paper analysed the significance of wearable corrosion of fly-ash concrete. The results showed that water and aggregate play a major role in wearable corrosion, followed by cement consumption, fly ash content has the least impact. The deduction of gray entropy theory is very strict, and the calculation is simple. The grey relation entropy method can overcome the disadvantage of normal grey relation method, and the relation degree of grey entropy were not influenced by discriminant factor. Better results can be achieved for the use of gray entropy theory when analysing of the effects of different factors.

**Key words:** fly-ash concrete; wearable corrosion; grey correlation entropy method; influencing factor

(上接第140页)

### Three-dimensional FEM Simulation Analysis for Soft Tunnel during Excavation and Supporting

ZHANG Xun-an, WANG Xian-bin

(School of Mechanics & Civil Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** In order to verify the possibility of design and construction scheme of a certain national defense tunnel project based on theory of structure design and guide line of Drucker-Prager for rock, taking into account of its capability bearing the weight of wall rock, the excavation and supporting for the tunnel is simulated with three-dimensional FEM by ANSYS9.0 software. We verify the design parameter, comprehensively analyze transfiguration of wall rock and effect of primeval supporting. The conclusion is that the design scheme is feasible, the primeval supporting can meet a requirement, wall rock can keep steady by itself. The numerical analysis result is consistent with actual measurement outcome. It can offer academic guidance for relevant engineering design and site operation.

**Key words:** soft tunnel; FEM method; bolting and shotcreting; three-dimensional numerical simulation