

# 深埋双轨巷道围岩与支护结构稳定性的有限元仿真分析

徐宏斌 李庶林 林峰 薛云亮  
(厦门大学建筑与土木工程学院 361005)

**摘要:**采用有限元方法对深埋双轨巷道在无支护和有支护条件下围岩与支护结构的受力及变形特征进行分析,给出两种支护条件下围岩的应力分布特征、巷道周边特征点的变形(位移)大小及破坏区的范围,对支护前后巷道周边特征点处的应力、位移和屈服度进行对比分析,计算了混凝土支护结构所受内力和弯矩的大小,并给出其分布特征图。通过研究得出围岩能够自行稳定、支护结构设计参数合理和原设计方案可行的结论。

**关键词:** 双轨巷道 围岩稳定 支护结构 有限元法

中图分类号: TU313.3

文献标识码: A

文章编号: 1004- 6135(2010) 01- 0092- 04

## FEM Simulation Analysis for the Stability of the Surrounding Rock and Supporting Structure at a Deep Double-track Roadway Project

Xu Hongbin Li Shulin Lin Feng Xue Yunliang

(School of architecture and Civil Engineering of Xiamen University 361005)

**Abstract:** This paper used FEM to analyze the stress, deformation and damage of the surrounding rock and the supporting structure of the double-track roadway at a mine under no-supported and supported conditions. The characteristics of stress distribution, the size of the deformation and the yield degree of the surrounding rock under no-supported and supported conditions were analyzed and compared. The magnitude and the distribution maps of the internal force and moment of the concrete supporting structure were computed and given. The conclusions are made that the design is feasible, the supporting structure meets the requirements and the surrounding rock are stable.

**Keywords:** Double-track roadway Surrounding rock stability Supporting structure FEM

### 1 引言

地下岩体材料为天然的地质材料,其含有天然的不同尺度的结构面,是典型的非均质的各向异性材料;地下巷道断面形状复杂,地下支护结构一般都是超静定结构。因此,地下工程围岩和支护结构的应力和变形稳定性分析往往难以采用解析方法进行分析,而长期处于“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巷道工程设计中,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,使巷道结构的形式和参数设计更趋合理、经济;同时对于复杂断面形状的地下开挖断面以及超静定的支护结构的受力分析,有限元方法也显示出极大的优越性<sup>[3]</sup>。基于此,笔者利用“同济曙光”有限元分析软件,以某矿区深埋双轨巷道工程开挖与支护的二维有限元数值模拟研究为背景,对围岩开挖与支护方案的有效性和合理性进行全面论证。

### 2 工程实例

某矿是我国最大的在建地下开采铝土矿,该矿区矿体呈缓

倾斜与似水平状产出,开采区的水平投影面积大,矿床围岩体为坚硬、半坚硬、软弱及松散岩类为主组成的层状矿床,是一个具有复杂开采环境的矿山。矿山井下开拓基建设计单轨和双轨运输巷道,本文仅针对双轨运输巷道进行分析。双轨运输巷道设计为直墙三心圆拱形,毛洞跨度 5.1m,洞高 3.225m,深埋巷道埋深自底板标高算起 231m,采取全断面一次开挖,开挖后使用 C20 混凝土进行衬砌支护,支护厚度为 120mm。双轨巷道设计参数如图 1 所示:

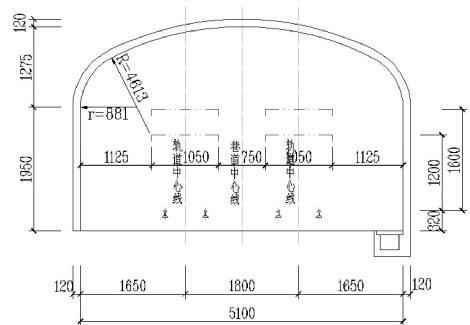


图 1 双轨巷道设计参数

### 3 计算模型的建立

#### 3.1 模型范围

由于横断面尺度比轴向尺度小得多,即巷道的横断面相对

作者简介: 徐宏斌,男,1985年9月出生,研究生,研究方向: 岩土工程,主要从事于岩土工程相关的研究。  
收稿日期: 2009- 08- 06



于纵向长度来说很小,可以假定在围岩荷载作用下,其轴向没有位移,只有横向发生位移的二维平面应变问题来考虑<sup>[4]</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倍巷道开挖宽度(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>[5]</sup>,因此本巷道模拟的地层范围取为25m×25m的平面应变模型,巷道处在模型的中部。

3.2 模型边界条件

边界条件定为:左右两侧水平向约束,下部垂直向约束,上部为应力边界<sup>[6]</sup>。

3.3 初始地应力场

本次模拟计算只考虑自重荷载下的初始应力场。垂直应力与水平应力满足下列表达式:

$$\sigma_z = \gamma h \tag{1}$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \lambda \gamma h \tag{2}$$

经计算,作用在模型上边界的自重应力为10400kN/m。

3.4 计算参数

依据岩石力学性质室内试验结果,现场岩体工程地质评价,获得岩体力学参数,并根据混凝土材料的力学性质确定衬砌混凝土的参数。岩体和混凝土的力学参数取值如表1所示。

表1 有限元计算物理力学参数表

	密度 g/cm <sup>3</sup>	弹性模量 GPa	泊松比 ν	粘聚力 MPa	内摩擦角 °	抗拉强度 MPa
围岩	2.75	26	0.24	10.0	54	5.4
混凝土	2.3	26	0.18			1.1

3.5 本构模型

目前相对使用较多的是理想弹塑性本构模型,本文的数值模拟也是使用这一模型。

3.6 屈服准则

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

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \tag{3}$$

$$\alpha I_1 + \sqrt{J_2} = k \tag{4}$$

式中,α、k为与材料性质有关的参数, I<sub>1</sub> 为第一应力不变量, J<sub>2</sub> 为第二偏应力不变量, 即有:

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \tag{5}$$

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

在平面应变状态下:

$$\alpha = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3} \sqrt{3 + \sin^2 \varphi}} \tag{7}$$

$$k = \frac{\sqrt{3} \cos \varphi}{\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}} \tag{8}$$

3.7 方法及步骤

采用数值模拟方法进行地下结构稳定性分析时,巷道开挖与支护过程分析流程如图2所示。

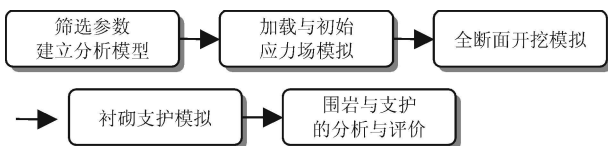


图2 巷道开挖与支护过程分析流程图

目前围岩稳定性评价主要使用的判断准则为结构控制破坏和应力控制破坏准则。应力控制破坏发生在软弱结构和节理发育层岩内,或埋藏很深的高应力环境中的地下结构。本文研究对象为地下埋深200~300m的巷道围岩,故使用应力控制破坏准则为判断标准。

3.7 有限元网格剖分

采用四节点四边形单元,未支护状态下单元总数为2488个,节点总数为2533个,支护状态下单元总数为2704个,节点总数为2703个,下面给出未支护状态下的网格剖分图:

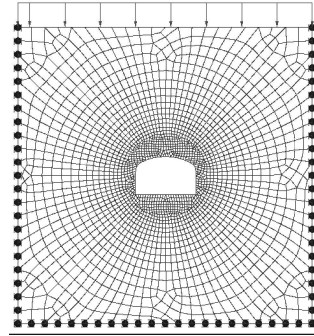


图3 未支护状态下网格剖分图

4 有限元计算结果及分析

4.1 未支护状态

未支护状态下有限元模型计算结果如图4~图6所示,限于篇幅,只列出一部分结果:

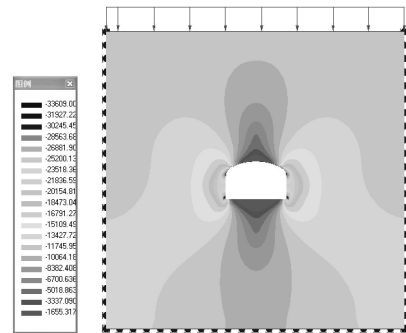


图4 未支护状态下最大主应力云图

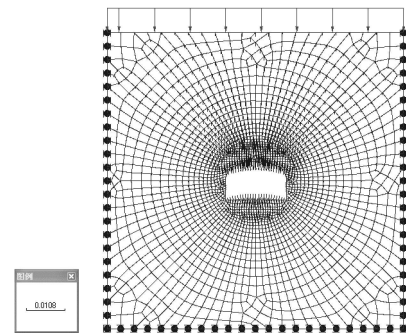


图5 未支护状态下位移矢量图

充分了解和掌握岩体的初始力学状态,是设计和实施有效的岩体控制技术的基础和依据。通过模拟计算,得出巷道开挖后围岩体的力学状态。

如图3所示,在未进行任何支护情况下,拱顶部位出现了卸荷拱,在底板处同样存在着一个较大范围的反向卸载拱。巷

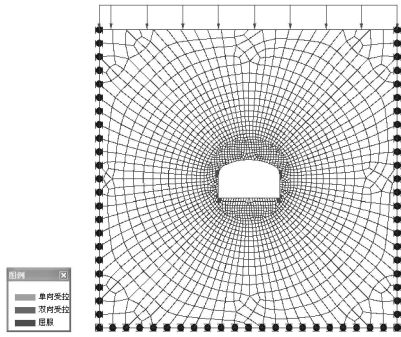


图6 未支护状态下塑性区  
注: 应力单位为 kPa

道围岩最大主应力  $\sigma_1$  为  $-37210\text{kPa}$  是该处深度岩体自重的 3.4 倍, 巷道周围应力集中现象明显; 巷道顶板和底板出现拉应力, 最小主应力  $\sigma_3$  为  $3864\text{kPa}$ 。

如图 5 所示, 巷道开挖后周边围岩总的移动趋势: 拱顶下沉、边墙内敛、底板向上移动, 位移主要发生在巷道周围 1~2 倍巷道宽度的范围, 巷道顶板以垂直下沉为主, 其值为  $2.65\text{mm}$ , 拱肩的岩体兼有垂直和水平方向的移动, 其值为  $1.70\text{mm}$ , 拱腰周围的岩体则主要以水平方向运动为主, 其值为  $0.53\text{mm}$ , 在巷道底板有底鼓产生。

如图 6 所示, 巷道开挖后, 塑性区主要分布在边墙四个拐角部位, 塑性区小, 未形成贯通, 其他部位均未屈服, 未出现拉破坏。

由以上分析可知, 采取全断面开挖后, 巷道位移小, 无贯通破坏区, 采取全断面开挖是可行的。

#### 4.2 衬砌支护状态

衬砌支护状态下有限元模型计算结果如图 7~ 图 9 所示, 限于篇幅, 只列出一部分结果:

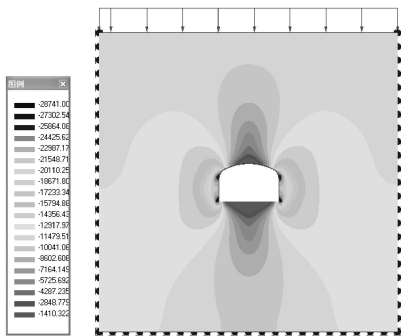


图7 衬砌支护状态下最大主应力云图

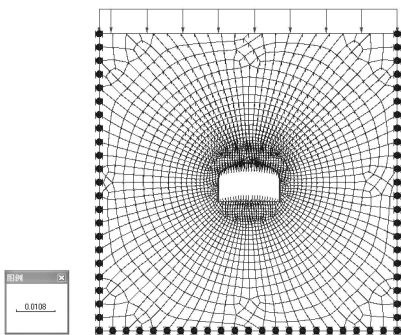


图8 衬砌支护状态下位移矢量图

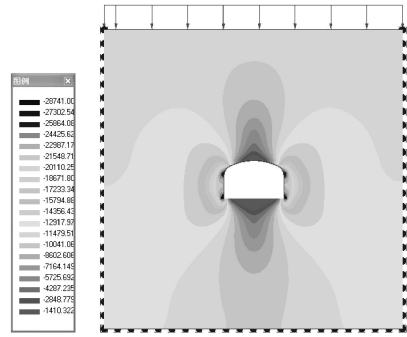


图9 衬砌支护状态下塑性区  
注: 应位移单位为 m

为便于进行直观的比较, 在巷道周围取 7 个特征点, 特征点位置见图 10, 将特征点支护前后的 y 方向应力、位移和屈服度用图表绘出, 见图 11~ 图 13:

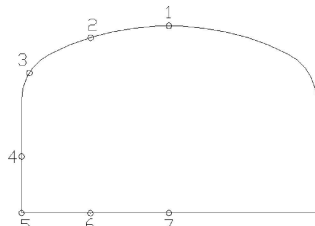


图10 特征点位置

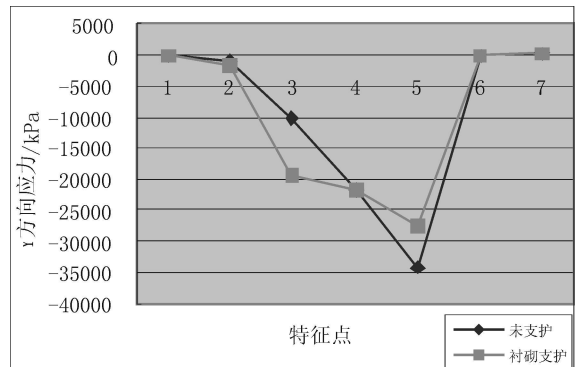


图11 支护前后特征点 y 方向应力对比图

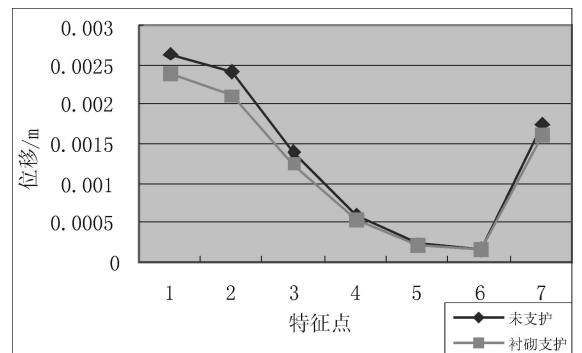


图12 支护前后特征点位移对比图

如图 7、图 11 所示, 在衬砌支护措施完成后, 拱顶部位附近仍然存在着正向卸载拱, 卸载拱内应力值较开挖完成后的数值要大, 四个直墙角部位置应力集中现象得到缓解, 应力集中范围与数值均有不同程度的减小, 可见, 支护对围岩起到了强化作用, 提高了围岩的整体性。

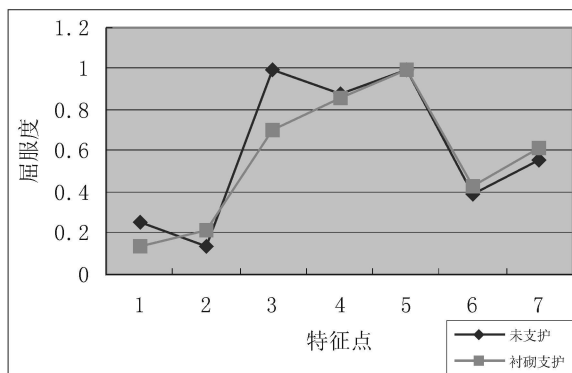


图 13 支护前后特征点屈服度对比图

如图 8、图 12 所示,巷道的位移在毫米级范围内,巷道边墙位置的位移较巷道顶部和底部小的多;支护的施加能有效的减小拱顶下沉、底板上移和边墙内敛的现象,对位移的限制大约在 10% 至 20% 之间。

如图 9、图 13 所示,衬砌支护后,边墙上部两个塑性区基本上消失,只在底板两侧位置有两块塑性区域存在。衬砌支护后,巷道顶部和边墙部位的应力集中得以减少,围岩的整体性得到提高,受力更均匀。

由以上分析可知,衬砌支护有效的提高了围岩的受力性能,围岩更稳定安全。采用 120mm 厚度混凝土支护是合理的。

支护的有限元模型计算结果如图 14~ 图 16 所示:

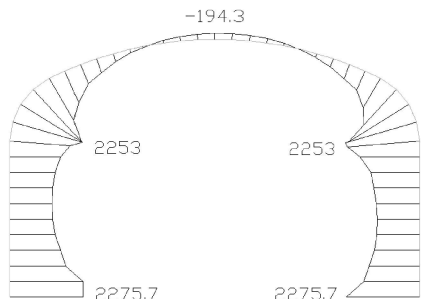


图 14 支护轴力图,单位 kN

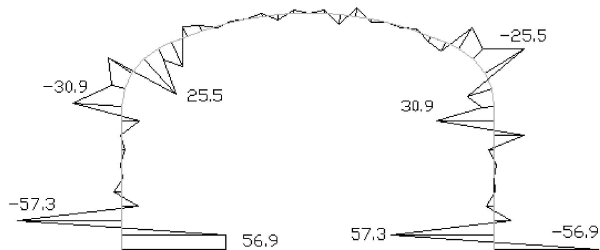


图 15 支护剪力图,单位 kN

从支护结构的内力图所示,最大的拉力为 194.3kN,最大

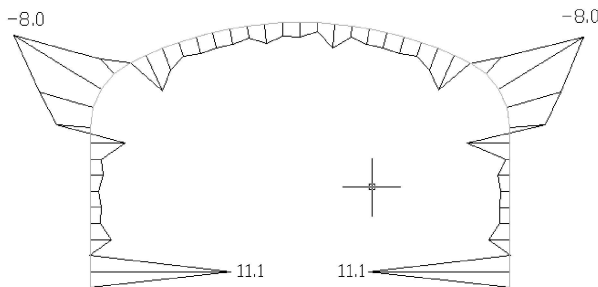


图 16 支护弯矩图,单位 kN·m

压应力为 2275.7kN,最大的剪力为 56.9kN。设计中巷道支护采用的是 C20 普通硅酸盐水泥,其抗拉设计值是 1 MPa,抗压设计值是 9.6MPa,抗剪设计强度是 4.0MPa。通过和设计值对比,说明采用全断面开挖方法修建该巷道,设计所选定的支护参数满足设计要求。

### 5 结论

通过对该巷道的开挖与支护进行二维有限元仿真分析,与设计参数进行比较,得出了如下结论:

(1) 采取全断面开挖后,拱顶、底板出现卸荷拱,有拉应力产生,围岩应力集中现象明显;巷道开挖后围岩总体移动趋势是拱顶下沉、边墙内敛、底板向上移动,巷道位移在毫米级范围内;塑性区小,无贯通破坏区,采取全断面开挖是可行的。

(2) 衬砌支护能有效的缓解应力集中现象,减小围岩位移和塑性区,围岩的整体性得到提高,受力更均匀,采用 120mm 厚度混凝土支护是合理的。

(3) 初期支护的内力值远小于其设计值,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] 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

[2] 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

[3] 何满潮,黄润秋,王金安等. 工程地质数值法[M]. 科学出版社,2006. 4

[4] 阎龙海,于丽艳,刘宝良. 深部矿井围岩应力变形的 ANSYS 数值模拟[J]. 黑龙江科技学院学报,2007, 17(1): 59 - 61

[5] 胡夏嵩,赵法锁. 低地应力区地下洞室围岩变形破坏有限元数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005, 24(10): 1708- 1714

[6] 孙民伟,于立新,房后国. 边界条件对软岩力学有限元计算的影响[J]. 人民黄河,2008, 30(10): 94- 95.

[7] 朱万成,唐春安. 地下洞室开挖与支护有限元分析[J]. 岩土工程技术,2000, (1): 2- 6

(上接第 97 页)

3、通过施工监测,科学地确定预压和卸载时间,对保证路面施工质量,控制工后沉降等起到至关重要。在路面施工期间,根据软基的不均匀沉降变化情况,对路面施工进行信息化管理,确保路面质量。

4、本次沉降的计算和预测利用实测的荷载- 时间- 沉降成果曲线,采用传统的“双曲线法”推算路基的最总沉降,并根据实际沉降观测成果计算残余沉降(工后沉降),并对 3 年、5

年、10 年的工后沉降进行预测,可供设计和养护参考。

### 参考文献

[1] JTJ017- 96. 公路软土地基路提设计与施工技术规范[S].

[2] 丁岩. 沪宁高速公路软土地基沉降观测方法[J]. 山西建筑,2007(8): 356- 357.

[3] 杨清连. 双曲线法在软基沉降计算中的应用与分析[J]. 山西建筑,2006( 22): 140- 141.