

混凝土结构软岩大巷断裂过程 非线性数值模拟

来兴平¹⁾ 蔡美峰¹⁾ 伍永平²⁾

1)北京科技大学资源工程学院,北京 100083

2)西安科技大学,西安 710054

摘要 引入断裂力学原理,以某混凝土结构副大巷中复杂结构为研究对象,通过相似模拟实验和现场观测等手段对有关材料物理力学参数进行识别和修正,结合现场矿压观测结果和相似材料模拟试验结果,对该巷道内部应力破坏敏感部位的内力和变形机理进行了系统的分析、模拟计算.研究结果对现场支护设计、维护加固和提高岩层稳定程度具有重要的意义.

关键词 非线性;软岩大巷;本构模型;数值模拟

分类号 TD32 **文献标识码**:A

近年来,矿山岩体采动影响的理论研究取得了新的进展^[1].巷道围岩中存在许多微裂纹、裂隙和断续节理等,巷道开挖后,这些裂纹、节理有可能扩展或连通,造成损伤开裂破坏.研究材料在复杂应力状态下的力学特性,建立新的计算理论和方法是岩土工程学科的主要研究内容.90年代以来,主要以三轴试验为基础的三维本构模型处理空间问题的研究,在我国还是近几年的事情^[2].本文引入断裂力学原理对某副大巷加固(主要是锚固)进行过程分析,应用数值模拟过程分析方法,结合现场实际观测现象与相似材料模拟的试验结果,对巷道围岩的变形破坏机理进行了研究,为现场设计和施工提供了依据.

1 本构方程

1.1 围岩塑性区的应力与位移

考虑到在粘弹性巷道围岩中存在许多微裂纹、裂隙及断续节理等,巷道受力后,这些裂纹、节理有可能扩展或连通.因此,通过平衡方程、Mohr-Coulomb 塑性条件及弹塑性界面上应力协调条件,即可求得塑性区应力方程.

塑性与开裂区界面上的接触力 $P_1(t)$ 和塑性区半径 $R(t)$ 的关系式^[3]

$$\sigma_r^p = [P_1(t) + C \cdot \cos \phi] \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right) \left(\frac{r}{R_0(t)} \right)^x - C \cdot \cos \phi,$$

2000-02-21 收稿 来兴平 男, 28岁, 讲师, 博士生

$$\sigma_r^c = [P_1(t) + C \cdot \cos \phi] \left[\frac{r}{R_0(t)} \right]^x - C \cdot \cos \phi.$$

通常认为塑性区 $\mu \rightarrow 0.5$. 按塑性区体积变形为零条件,推演粘弹-塑性围岩中的位移公式.考虑粘弹-塑性界面上位移协调条件,即:

$$u_R^c = u_R^p,$$

$$P_1(t) = (P_0 + C \cdot \cos \phi)(1 - \sin \phi) \left[R_0(t)/R(t) \right]^x - C \cdot \cos \phi,$$

$$R(t) = R_0(t) \left[\frac{(P_0 + C \cdot \cos \phi)(1 - \sin \phi)}{P_1(t) + C \cdot \cos \phi} \right]^y,$$

$$x = \frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi}, \quad y = 1/x.$$

则得:

$$A(t) = \frac{MR^2(t)}{4G_\infty} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\eta_{te1}}\right) \right] +$$

$$\frac{MR^2(t)}{4G_0} \exp\left(-\frac{t}{\eta_{te1}}\right),$$

$$u_R^p = \frac{MR^2(t)}{4G_\infty r} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\eta_{te1}}\right) \right\} +$$

$$\frac{MR^2(t)}{4G_0 r} \exp\left(-\frac{t}{\eta_{te1}}\right).$$

1.2 开裂区的应力与位移

由于地质构造、采动、爆破影响,巷道围岩中存在许多微裂纹、裂隙及断续节理等,巷道受力后,这些裂纹、节理有可能扩展或连通.根据断裂力学原理进行分析:假设在围岩开裂区中有2组完全不相切的断续节理,其平均长度为 $a_i (i=1,2)$,其裂隙扩展符合线弹性断裂力学理论.若只考虑剪切破坏,其剪切应力强度因子为:

$$K = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2} \sqrt{\pi a_i}$$

可得围岩裂隙扩展的临界条件为:

$$\sigma_\theta - \sigma_r = 2K_c / \sqrt{\pi a_i}$$

将其代入平衡方程可得:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{2K_c}{\sqrt{\pi a_i} r} = 0$$

解此方程并考虑在开裂区与塑性区交界面径向应力相等的条件, 可得:

$$\sigma_r^p = \frac{2K_c}{\sqrt{\pi a_i}} \ln \frac{r}{R_0} + (P_0 + C \cdot \cos \phi)(1 - \sin \phi) \left[\frac{R_0(t)}{R(t)} \right]^r - C \cdot \cos \phi \quad (1)$$

由弹塑性理论本构方程和几何方程可得:

$$\sigma_\theta^p = \frac{2K_c}{\sqrt{\pi a_i}} \ln \frac{r}{R_0} + (P_0 + C \cdot \cos \phi)(1 - \sin \phi) \left[\frac{R_0(t)}{R(t)} \right]^r - C \cdot \cos \phi \quad (2)$$

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} = \frac{1 - \mu_0^2}{E_0} \left(\sigma_r - \frac{\mu_0}{1 - \mu_0} \sigma_\theta \right) \quad (3)$$

式中: E_0, μ_0 分别为围岩开裂区的弹性模量与泊松比。

将式(1)、式(2)代入式(3), 并考虑开裂区与塑性区交界面 R_0 处变形协调条件, 便可得到开裂区半径为 r 处的径向位移。

2 FLAC 对断裂破坏过程的数值模拟

2.1 FLAC 简介

目前在岩土力学中常用的数值分析方法有差分方法、有限元法、边界元法等几种。这几种方法都是以连续介质为出发点, 基于小变形的假设。它们虽然也可以用来解决由几种介质所组成的非介质的问题, 并且对于个别的断层和弱面, 也可以用设置节理单元的办法来解决, 但是用于解决富含节理和大变形的岩土力学问题, 往往所得的结果与设计的物理图景相差甚远。于是离散元和拉格朗日元法应运而生。但是国内现有的离散元程序一般又很难考虑复杂的本构关系, 且其迭代求解所花时间相当可观。美国 Itasca Consulting Group Inc, 1986 年开发出拉格朗日元法, 成功地将流体力学中跟踪运动的拉格朗日方法应用于解决岩体力学的问题, 并编制了 FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) 软件。FLAC 是连续介质显式有限差分程序, 该程序的基本原理和算法与离散元相似, 但它应用了节点位移连续的条件, 可以对大变形进行分析。主要是用于模拟结算岩土类工程材料的力学行为, 特别是岩土材料达到屈服极限后产生的塑性流动。材料通过单元和区域表示, 根据研究对象的形状构成相应的网络结构。每

个单元在外在和边界约束条件作用下, 按照约定的线性和非线性应力—应变关系产生力学响应。FLAC 软件建立在拉格朗日算法基础上, 特别是用于模拟材料的大变形和扭曲转动。FLAC 程序设有多种本构模型, 可模拟地质材料的高度非线性 (包括应变软化和硬化)、不可逆剪切破坏和压密、粘弹性 (蠕变) 空隙介质的流固耦合、热力耦合以及动力学行为等。另外, 程序还设有边界单元, 可以模拟断层、节理和摩擦边界的滑动、张开和闭合行为。支护结构, 如衬砌、锚杆、可缩性支架或板壳等与围岩的相互作用也可以在 FLAC 程序中进行模拟。同时用户根据需要在 FLAC 中创建自己的本构模型, 进行各种特殊的修正和补充。

FLAC 程序采用的是快速拉格朗日方法, 基于显式差分来获得模型的全部运动方程 (包括内变量) 的时间步长解。程序将计算模型划分为若干个不同形状的三维单元, 单元之间用节点相互连接。对某一个节点施加荷载之后, 该节点的运动方程可以写成时间步长的有限差分形式。在某一个微小的时间内, 作用于该点的荷载只对周围的若干节点 (相临节点) 有影响。根据单元节点的速度变化和时间, 程序可求出单元之间的相对位移, 进而可以求出单元应变; 根据单元材料的本构方程可求出单元应力。随着时间的推移, 这一过程将扩展到整个计算范围, 直到边界。这样程序可以追踪模型从渐进破坏直到整体垮落的全过程, 这对研究采矿过程非常重要。FLAC 程序将计算单元之间的不平衡力, 将此不平衡力重新加到各节点上, 再进行下一步的迭代运算, 直到不平衡力足够小或者各节点的位移趋于平衡为止。FLAC 计算循环过程如图 1 所示。

FLAC 程序可在计算过程中改变某个局部的材料参数, 增强了程序使用的灵活性, 极大地方便了模拟计算时的处理。基于上述计算功能和材料模型, FLAC 程序比较适合于工作面推进过程中顶煤或上部矿石的变形和破坏演化过

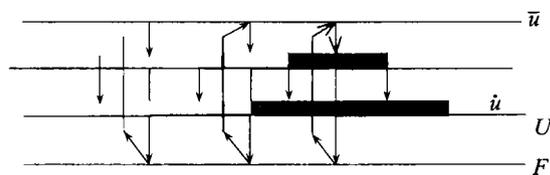


图 1 FLAC 程序中的计算循环
Fig.1 Computational loop in FLAC

程. FLAC 对非线性、大变形问题及岩土物理失稳的计算更有效. 起初 FLAC 是专门针对岩土工程开发的, 而目前在采矿工程和地下结构工程的设计和分析方面得到广泛的应用^[4]. FLAC 除了在采矿工程和地下结构工程应用外, 在地下水流动、边坡工程及岩石动力学方面, 如地震波作用下大坝的稳定性、土与结构的相互作用, 爆炸荷载的传播等都可应用 FLAC 进行模拟计算.

2.2 巷道地质条件与数值计算模型

某副大巷属于开拓巷道, 长度是 700 m, 主要用途是通风、运输. 该巷道与地面高差 350 m, 与工作面高差 90 m, 与工作面水平距离 110 m. 围岩为深灰色油页岩, 中夹薄层粉砂岩, 厚层状, 较稳定, 硬度系数为 6. 断面形状为直墙半圆拱, 净断面积 12.24 m², 净宽 4 m, 墙高 1.5 m, 坡度为 0.005, 岩层倾角为 60°~65°. 随着工作面的推进, 在动载荷作用下局部区位出现裂缝.

根据巷道围岩的地质条件建立的物理模型结构如图 2 所示, 各岩层介质的力学特性服从 Mohr-Coulomb 强度准则, 各层介质的力学参数如表 1 所示, 与水平不连续层理面的剪切模量为 2.8 GPa, 体积模量为 3.9 GPa. 计算中拟采用的支护材料力学参数如表 2 所示. 对于该副



图 2 非线性物理模拟模型

Fig.2 Non-linear physical simulation model

表 1 岩层材料力学参数

Table 1 Mechanics properties of material strata

材料及特性	粉砂岩	煤	炭质泥岩	灰白细砂岩	油页岩	煤	泥质砂岩
E/MPa	16 000	2 000	10 000	15 000	8 000	2 000	17 000
μ	0.30	0.30	0.28	0.25	0.30	0.30	0.24
σ_w/MPa	19.10	2.88	9.10	18.70	8.10	2.88	19.00
$\alpha_{NB}/(^{\circ})$	30	30	35	40	32	30	40
$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2 500	1 400	2 200	2 400	2 100	1 400	2 500
$\sigma_{\bar{w}}/\text{MPa}$	35.0	11.4	30.4	30.0	23.5	11.4	35.0

表 2 支护材料及其力学参数

Table 2 Support material and mechanics properties

材料及特性	300 号混凝土	200 号混凝土	底板砂岩
E/GPa	30	26	17
σ_w/MPa	78.3	75.1	35

大巷, 考虑到巷道围岩受采动支承压力的影响, 取采动应力集中系数为 1.5. 侧向应力集中系数为 0.85. 因此模型设置的边界条件为: 边界垂直应力为 18 MPa, 水平应力为 15 MPa, 并考虑岩石自身质量. 但值得注意的是混凝土单向压缩情况下的变形失效机理与三轴压缩应力状态下塑性变形失效机理并不相同, 为此模型常数选择时应当注意这一点.

2.3 计算结果与分析

通过计算可以看出, 图 2 是非线性物理模拟模型. 通过物理模拟和现场观测, 该巷道在未进行支护以前, 垂直方向的位移是最大的. 图 3

是巷道开挖后应力变化的趋势. 由于施加了支护结构(物)后, 随着时间的推移, 垂直方向上的位移逐渐减少, 应力也在动态发展, 最后趋于平衡, 岩层内部的应力随着与开挖中心距离的增加, 逐渐趋于稳定. 在动载作用下, 巷道有以下明显特征: 巷道两帮变形较大, 即由于巷道所处

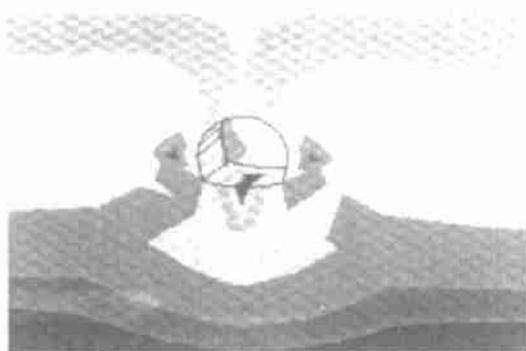


图 3 巷道开挖应力变化

Fig.3 Roadway excavation stress diversification

层倾角较大,在受到采动压力时,与岩层层理垂直或大角度相交的巷道边缘将首先出现塑性屈服点,并随动载加剧和时间延长而扩展,进一步在巷道靠顶板帮大部分区域及靠底板帮下部和边角处出现塑性变形区,该区域随动载加剧而不断扩大;巷道顶部与底板出现拉破坏区,该破坏点随动载强度增大而沿层理面相当方向延伸和扩展.采用锚注加固,利用中空锚杆兼做注浆管,对岩体实施外锚内注加固方式,充分利用锚杆加固的各自优点,把2种加固技术有机地结合起来,解决该副大巷的维护问题,所以采用锚注加固支护方式是可行的.

3 结论

通过引入断裂力学的有关原理,结合模拟实验,现场观测,同时对有关物理力学参数进行验证和修正,利用物理和数值模拟方法对实际

工程中受采动影响的混凝土砌碛巷道进行分析,为现场设计和施工提供了一些确定性依据;并建议在该巷道断裂的敏感部位采用声发射(AE)仪器进行实时监测,达到巷道稳定和安全使用的目的.但是在研究过程中没有考虑尺寸效应的损伤统计演化性质,这在以后的研究中进行.

致谢: 对中国矿业大学北京研究生部分形研究室的周宏伟博士后对作者的帮助表示由衷感谢.

参考文献

- 1 刘天泉. 矿山岩体采动影响与控制工程学及其应用. 煤炭学报,1995,20(1): 1
- 2 刘华,江见鲸,杨菊生. 混凝土结构三维损伤开裂破坏全过程非线性有限元分析. 工程力学,1999(2): 45
- 3 郑颖人,刘怀恒. 隧洞粘弹-塑性分析及其在锚喷支护中的应用. 土木工程学报,1982(4):73
- 4 王金安,谢和平. 建筑物下厚煤层特殊开采的三维数值分析. 岩石力学与工程学报,1999,18(1): 126

Nonlinear Numerical Simulation for the Concrete Zone of Fracture in the Process of the Developing Load at Soft-Rock Roadway

LAI Xingping¹⁾, CAI Meifeng¹⁾, WU Yongping²⁾

1) Resource Engineering School, UST Beijing, Beijing 100083, China 2) Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China

ABSTRACT Inducting rupture mechanics principles, comprehensive research on the inside of stress distortion and its mechanism has been developed at auxiliary concrete structures roadway. Both situation result and resemble simulacrum ending, the property parameters of support material have been identified. It is important to design, reinforce, enhance the strata cohesion in practical project.

KEY WORDS nonlinear; soft rock roadway; constitutive model; numerical simulation