

# 裂隙岩体损伤演化本构模型的实现及应用

柴红保<sup>1,2</sup>, 曹平<sup>1</sup>, 赵延林<sup>1</sup>, 林杭<sup>1</sup>

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 湖南科技大学能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 裂隙岩体在裂隙起裂、扩展损伤至失稳破坏过程中, 同时存在损伤和断裂两种缺陷的累积和发展, 且断裂又会造成损伤的进一步累积, 岩体的断裂与损伤密切相关。将裂隙岩体视为含损伤连续介质, 通过综合考虑压剪应力状态和拉剪应力状态下裂纹起裂、扩展损伤演化, 用初始损伤张量和裂纹扩展附加损伤张量描述裂隙岩体的损伤演化过程, 将压剪应力状态和拉剪应力状态下裂纹的初始损伤张量以及裂纹起裂扩展后附加损伤张量引入到自定义本构模型中, 用 VC++ 开发了可模拟裂纹在各种应力状态下起裂、扩展损伤演化的自定义本构模型动态链接库 (DLL), 该模型中用体积模量和剪切模量的损伤度来表示损伤。用该自定义本构模型对一隧道稳定性进行了分析。经分析发现: 隧道围岩的断裂损伤范围比屈服破坏的范围大一倍左右; 不考虑损伤的隧道围岩的最大位移量为 0.05 m, 考虑损伤的隧道围岩的最大位移量在达到 0.1 m, 断裂损伤区岩体的体积模量和剪切模量也有较大程度的降低。该自定义本构模型可以用来模拟裂隙岩体的损伤演化过程, 模拟的结果能够为工程实践提供合理建议。

**关键词:** 损伤演化; 压剪断裂; 拉剪断裂; 自定义本构模型

**中图分类号:** TU452

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2010)07-1047-07

**作者简介:** 柴红保(1977-), 男, 河南南阳人, 博士研究生, 主要从岩体工程稳定性的研究。E-mail: chbmooncsu@163.com。

## Implementation and application of constitutive model for damage evolution of fractured rock mass

CHAI Hong-bao<sup>1,2</sup>, CAO Ping<sup>1</sup>, ZHAO Yan-lin<sup>1</sup>, LIN Hang<sup>1</sup>

(1. School of Resource and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. School of Energy and Safety Engineering, Hunan Science and Technology University, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** The damage and rupture of fractured rock mass will accumulate and develop simultaneously during the process of its crack occurrence and growth and failure. The damage will be accumulated owing to the rupture. The damage is closely related to the rupture. Assuming the fractured rock mass as continuous mass with damage and considering the crack occurrence and growth under compressive-shear stress state and tension-shear state, the damage evolution is simulated by introducing the initial damage tensors and additional damage tensors. The two tensors are introduced into the user-defined constitutive model DLL (Dynamic Linked Library). The model is used to simulate one tunnel. Through simulation, the damage region is about twice the yield failure region. The maximum displacement of the rock mass is 0.05 m when the damage is not considered. The maximum displacement is 0.1 m when the damage is considered. The bulk and shear moduli are reduced to some extent. The proposed model is applicable for simulating the damage evolution of the rock mass. The simulated results can provide a reasonable recommendation to the engineering practices.

**Key words:** damage evolution; shear fracture; tension fracture; user-defined constitutive model

## 0 引言

节理岩体在裂隙起裂、扩展损伤至整体破坏的过程中, 同时存在着损伤和断裂两种缺陷的累积和发展, 而断裂又会造成损伤的进一步累积, 岩体的断裂与损伤密切相关。断裂力学将岩体中的断续节理裂隙模拟为裂纹, 岩体不再被看成完全连续均匀体。运用断裂力学方法, 可以追踪岩体中节理裂隙的起裂、扩展到相互贯通, 致使岩体局部破坏<sup>[1]</sup>, 从而揭示出岩体失

稳的渐进破坏机制。

岩体从开始变形直至破坏, 是一个逐渐劣化的过程。伴随外载的增加或环境的作用, 其损伤存在一个量变直至破坏的质变过程。在这个损伤演化过程中,

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (50774093, 10972238); 2006 年高等学校博士学科点专项科研资助项目 (20060533071)

**收稿日期:** 2009-03-30

损伤基元的存在和发展演化,使材料的实际强度降低。从 Kachanov 1958 年提出损伤力学思想,经过近 50 年的不断发展,一些理论已日益成熟并在各学科和工程技术领域得以应用。连续介质损伤力学(CDM)的共同特点就是引入损伤变量作本构关系的内变量。目前,CDM 理论基本上都是用张量形式的损伤变量进行表述。CDM 中引入损伤张量的最大优点是可以方便的处理各向同性或各向异性材料的各向异性损伤。对此国内外许多学者对裂隙岩体的损伤破坏机制进行了广泛的研究并取得了一些可喜的研究成果:文献[2]基于损伤力学中等效应变和有效应力的概念,建立考虑节理裂隙断裂损伤耦合的力学模型;文献[3~7]基于断裂损伤力学推导了裂隙岩体的本构关系及损伤演化方程;文献[8]从岩体结构力学和细观损伤力学的角度出发,根据裂隙发育与工程尺度的关系,建立合理且适用的裂隙岩体渗流-损伤-断裂耦合数学模型;文献[9,10]基于应变空间理论导出弹塑性损伤细观模型,采用有限元计算方法实现岩石三维破裂过程的数值模拟。文献[11,12]考虑初始损伤的演化,建立节理岩体采动损伤本构模型,该文只考虑裂隙的初始损伤,对裂纹扩展后的附加损伤没有考虑。

为了研究模拟岩体裂纹起裂、扩展断裂直至破坏的损伤过程,考虑了裂隙岩体裂纹对岩体的初始损伤以及裂纹起裂扩展后对岩体强度的附加损伤,综合考虑压剪应力状态下和拉剪应力状态下裂纹起裂、扩展损伤演化过程,将压剪应力状态下和拉剪应力状态下裂纹对岩体强度的初始损伤张量以及压剪应力状态下和拉剪应力状态下裂纹起裂扩展后损伤张量引入到自定义本构模型中,对某隧道在围压的作用下的裂纹起裂扩展损伤演化过程进行了分析。

## 1 损伤演化本构模型

### 1.1 裂隙岩体本构关系

损伤的宏观力学效果表现为损伤体的柔度或刚度发生变化,将有效应力张量理解为使无损伤体获得与损伤体在应力作用下一样的应变张量分量(Lemaitre 应变等效原理),设无损伤岩体的弹性柔度张量为  $C^o$ ,损伤材料的等效弹性损伤柔度张量为  $C^{o-d}$ ,并按 Lemaitre<sup>[13]</sup>和 Chaboche<sup>[14]</sup>的解释在本构关系中引入有效应力张量。

裂隙的存在及扩展损伤演化对柔度矩阵的影响主要取决于裂隙的相对大小以及裂隙面的传压系数、传剪系数、剪切刚度和法向刚度,裂隙对柔度矩阵的影响可通过坐标变换和叠加原理求得,即

$$C_{ijkl}^{o-d} = C_{ijkl}^o + C_{ijkl}^d + C_{ijkl}^{ad}, \quad (1)$$

式中,  $C_{ijkl}^{o-d}$  为裂隙岩体分析构元等效柔度,  $C_{ijkl}^o$  为无损材料的弹性柔度张量分量,  $C_{ijkl}^d$  为考虑裂纹初始损伤产生的损伤柔度张量分量,  $C_{ijkl}^{ad}$  为裂纹扩展后的附加柔度张量分量,  $i, j, k, l=1, 2, 3$ 。

无损材料的弹性柔度张量分量为

$$C_{ijkl}^o = \frac{1+m_0}{E_0} d_{ik} d_{jl} - \frac{m_0}{E_0} d_{ij} d_{kl}; \quad (2)$$

无损材料的弹性刚度分量分量为

$$E_{ijkl} = \frac{E_0 m_0}{(1+m_0)(1-m_0)} d_{ij} d_{kl} - \frac{E_0}{1+m_0} d_{ik} d_{jl}. \quad (3)$$

裂隙初始损伤柔度张量<sup>[15]</sup>可采用坐标变换表示为

$$[C^d] = [A_i^{-1}]^T [\Delta C_i] [A_i]^{-1}, \quad (4)$$

式中,  $[A_i]$  表示裂隙损伤张量坐标转换关系的矩阵。

裂隙初始损伤柔度张量分量为

$$C_{ijkl}^d = \frac{4\pi}{3} \frac{1-m_0}{E_0} [2F_1 n_i n_j n_k n_l + \frac{1}{2} F_2 (d_{jk} n_i n_l + d_{il} n_j n_k + d_{ik} n_j n_l - 4n_i n_j n_k n_l)], \quad (5)$$

式中,  $E_0$  为无损材料的弹性模量,  $m_0$  为无损材料的泊松比,  $F_1, F_2$  系数<sup>[15]</sup>,  $n_i$  为方向余弦,  $d_{ik}, d_{jl}, d_{ij}$  和  $d_{kl}$  为克罗内克尔(Kronecker)常数,可以取值为 1 或 0。

### 1.2 压应力作用下裂隙岩体损伤柔度张量

不连续面的强度主要是指不连续面上下表面抵抗外力的能力,可用莫尔-库仑准则表示为

$$t_s = C_s + f_s s_n, \quad (6)$$

式中,  $t_s$  为不连续面的抗剪强度(MPa),  $f_s$  为不连续面的摩擦因数( $\tan j$ ),  $C_s$  为不连续面的黏结力(MPa),  $s_n$  为不连续面的法向应力。

大量试验结果和理论计算表明压剪裂纹开始起裂是近似垂直于最大拉应力方向开裂,按 I 型扩展如图 1 所示。

$$s_{ne} = s_n = (1-C_n)(s_1 \sin^2 y + s_3 \cos^2 y), \quad (7)$$

$$t_{ne} = (1-C_v) \frac{s_1 - s_3}{2} \sin 2y, \quad (8)$$

式中,  $C_v, C_n$  分别为传剪、传压系数<sup>[6]</sup>。

在荷载作用下,垂直于最大主应力方向的不连续面会发生闭合,另一部分与最大主应力方向成某一角度的不连续面上则同时受法向和切向应力的作用,法向力使不连续面发生闭合并形成抵抗不连续面滑移的摩擦力,而切向力使不连续面产生切向变形并发生滑移破坏。由于不连续面的扩展必须克服不连续面上的黏结力与摩擦力的作用,因此最有可能首先发生扩展的不连续面的方向为有效剪应力最大的方向。根据最大周向正应力理论,初始裂纹沿周向最大正应力方向扩展,可求得开裂角  $q=70.5^\circ$ <sup>[16]</sup>,压应力作用下分支

裂纹尖端瞬时应力强度因子为<sup>[6]</sup>

$$K_{I(0)} = \frac{2}{\sqrt{3}} t_e \sqrt{\pi a} = \frac{2}{\sqrt{3}} (t_{ne} - s_{ne} f) \sqrt{\pi a} \quad (9)$$

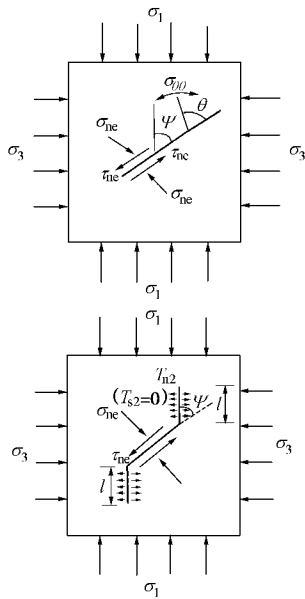


图1 压剪应力状态下支裂纹起裂、扩展示意图

Fig. 1 Crack occurrence and growth under compressive-shear stress state

扩展中的翼形分支裂纹逐渐沿平行最大压应力的方向稳定扩展。如图2(a)所示,当扩展长度 $l > a$ ,  $L = l/a > 1$ ,可将图所示的拐折裂纹系统用图2(b)所示的等效直裂纹系统来考虑<sup>[17-18]</sup>。

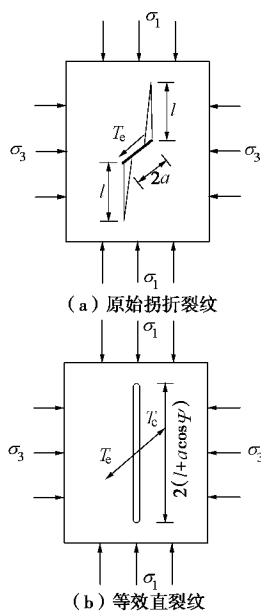


图2 压剪状态下分支裂纹等效示意图

Fig. 2 Branch cracks and equivalent ones under compressive-shear stress state

主裂纹的影响通过作用在等效裂纹中心的一对共

线集中有效剪切驱动力 $T_e$ 来反映<sup>[8]</sup>,

$$T_e = 2at_e = 2a(t_{ne} - s_{ne}f) = 2a(t_{ne} - s_n f) \quad (10)$$

分支裂纹尖端应力强度因子计算方法采用Kemeny<sup>[8, 19-20]</sup>计算模型:

$$K_I = (K'_1)_1 + (K'_1)_2 = \frac{2\sqrt{at_e} \cos y}{\sqrt{\pi L}} - s_3 \sqrt{\pi a L} \\ = \frac{\sin 2y - (1 + \cos 2y)f}{\sqrt{\pi L}} s_1 \sqrt{a} \cos y + \\ \frac{(\cos 2y - 1)f - \sin 2y}{\sqrt{\pi L}} s_3 \sqrt{a} \cos y - s_3 \sqrt{\pi a L} \quad (11)$$

压剪应力状态下的岩体裂纹扩展损伤引起的附加柔度张量:

$$C_{ijkl}^{ad} = \frac{F_2 t_{ne} + 2F_3 s_{ne} + F_5}{s_{ne}} a n_i n_j n_k n_l + \frac{2F_1 t_{ne} + F_2 s_{ne} + F_4}{4t_{ne}} \quad (12)$$

$$a(d_{jl} n_i n_k + d_{jk} n_i n_l + d_{il} n_j n_k + d_{ik} n_j n_l - 4n_i n_j n_k n_l) \quad (12)$$

$$C_{ijkl}^{o-d} = C_{ijkl}^o + C_{ijkl}^d + C_{ijkl}^{ad} \quad (13)$$

### 1.3 拉应力作用下裂隙岩体损伤柔度张量

由于拉剪状态下的裂纹受拉后往往张开,黏结力丧失而且不能传递拉应力,因此,受拉剪作用的不连续面的开裂和扩展较压剪状态下的简单。

按最大周向应力准则,当裂纹尖端的等效I型应力强度因子达到岩体的断裂韧度时,裂纹将扩展。因此,由于剪应力的作用,不连续面的扩展会偏离原来的方向,其扩展方向将垂直于拉应力最大的方向。

拉剪应力作用下裂纹尖端的等效I型应力强度因子为

$$K'_1 = \frac{3}{2} \sqrt{\pi c} \cos \frac{q}{2} (t_{ne} - s_{ne} \cos^2 \frac{q}{2}) \quad (14)$$

拉应力作用下开裂角 $q$ 满足关系式:

$$s \tan \frac{q}{2} - 2t \tan^2 \frac{q}{2} + t = 0 \quad (15)$$

拉剪应力状态下,裂纹扩展后裂纹尖端的应力强度因子为

$$K_1 = \frac{5.18a(t_{ne} \sin q + s_3 \cos q)}{\sqrt{\pi L}} + 1.12s_3 \sqrt{\pi L} \quad (16)$$

可以看出,拉应力作用下裂纹的扩展角度与裂纹所处的应力状态紧密相关的。

拉剪应力状态下的岩体等效损伤柔度张量为

$$C_{ijkl}^d = \frac{8(1-u_0^2)}{3E_0} [2a^3 r_j n_i^{(j)} n_j^{(j)} n_k^{(j)} n_l^{(j)} + \\ \frac{1}{2(1-m)} a^3 (d_{jl} n_i^{(j)} n_k^{(j)} + d_{jk} n_i^{(j)} n_l^{(j)} + \\ d_{il} n_j^{(j)} n_k^{(j)} + d_{ik} n_j^{(j)} n_l^{(j)} - 4n_i^{(j)} n_j^{(j)} n_k^{(j)} n_l^{(j)})] \quad (17)$$

拉剪应力状态下裂纹扩展后的岩体附加损伤柔度张量为

$$C_{ijkl}^{ad} = \frac{8(1-u_0^2)}{3E_0} [2L^3 r_j n_i^{(j)} n_j^{(j)} n_k^{(j)} n_l^{(j)} + \frac{1}{2(1-m)} L^3 (d_{jl} n_i^{(j)} n_k^{(j)} + d_{jk} n_i^{(j)} n_l^{(j)} + d_{il} n_j^{(j)} n_k^{(j)} + d_{kl} n_j^{(j)} n_l^{(j)} - 4n_i^{(j)} n_j^{(j)} n_k^{(j)} n_l^{(j)})] \quad (18)$$

#### 1.4 损伤描述

在岩石损伤力学研究中,大都采用连续损伤力学的方法。连续损伤力学认为,岩石在一定力学环境作用下,岩石内部存在的微裂纹、微孔洞等微缺陷导致了微应力集中。微缺陷间的相互作用使得原生裂纹或缺陷被激活,岩石颗粒间发生位错,微缺陷和颗粒间的位错演化必然导致岩石的弹性模量、屈服应力、密度、超声波波速等参数发生变化。为研究岩石的损伤演化特征,通常是用弹性模量、屈服应力、密度、超声波波速等宏观特征量的变化来描述岩石的损伤度 $D$ 。 $D$ 的范围应在 $[0 \sim 1]$ 之间,当 $D=0$ 时为无损伤状态;当 $D=1$ 时意味着材料完全破坏; $D$ 应为单调递增的函数,即损伤向着增大的方向发展,损伤是不可逆的。在岩石力学中,较为常用的损伤度主要有弹模损伤度,纵波波速损伤度,面积损伤度和密度损伤度。

岩石在一定应力环境作用下,其内部微观裂纹,缺陷的变化,会引起岩石体积模量和剪切模量发生相应变化。用体积模量的变化来描述岩石受损伤的程度而定义的损伤度,称为体积模量损伤度和剪切模量损伤度。

$$D_K = 1 - \frac{K'}{K} \quad (19)$$

$$D_G = 1 - \frac{G'}{G} \quad (20)$$

式中  $D_K$ ,  $D_G$  为体积模量、剪切模量对应的损伤变量; $K$ ,  $G$  分别为无损状态下材料的体积模量和剪切模量; $K'$ ,  $G'$  分别为损伤后材料的有效体积模量和有效剪切模量。

采用体积模量和剪切模量的损伤度来表示岩体的损伤则直观,并且用这个2个标量来表示岩体的损伤度也真实的反应力岩体损伤后抵抗体积变形和抵抗剪切变形强度的变化。

裂纹的初始损伤和裂纹扩展后的损伤用损伤用张量来表示为

$$W = I - (C^{0-d-ad})^{-1} : C^o \quad (21)$$

## 2 裂纹损伤演化自定义本构模型

FLAC中可以用VC++编写动态链接库(DLL)实现自定义本构模型。自定义本构模型的主要功能就是根据应变张量计算应力张量,并根据相应本构模型对计算后的应力是否符合强度准则进行判断,如果达到

屈服条件,则要根据相应的塑性流动法则进行应力的调整,使实际应力符合屈服准则。

用VC++编写自定义本构模型主要包括基类成员函数的定义、模型的注册、模型与FLAC间的数据传递以及模型状态指示器。基类成员函数主要是定义对模型属性进行赋值和取值、对属性及相关量进行初始化、计算主应力、计算最大侧限模量、计算剪切模量和体积模量、保存和恢复模型数据等,基类中还包括在模型运行过程中需要的相关私有变量,自定义本构与模型的私有变量可在基类中进行添加,并且可以定义新的成员函数。

编写FLAC连续介质自定义本构模型需要Stensor、Axes和ConTableList3个类支持,这3个类分别包含在“Stensor.h”、“Axes.h”、“Contable.h”文件中,Stensor类主要是存储对称张量并且包含对这些张量进行处理的函数如计算主应力等;Axes主要是指定一个特殊的坐标系统,在模型计算过程中,该类的函数可以转换对象的坐标系统(局部坐标和全部坐标系统);ConTableList类定义模型的接口,将模型中的ID转换为指标。

在裂纹损伤演化自定义本构模型中,为了考虑裂纹的初始损伤以及裂纹扩展后的附加损伤,定义以下一些变量来表征裂纹属性的相关参数:裂纹初始长度的一半、裂纹扩展后的相对长度、裂纹法向刚度、裂纹切向刚度、裂纹摩擦角、裂纹黏结力、裂纹条数、裂纹与最大主应力的夹角、裂纹密度、裂纹的相互作用系数、裂纹尖端应力强度因子、体积模量损伤度、剪切模量损伤度。

使用该本构模型在计算过程中,当模型处于弹性阶段时,采用式(13)的刚度张量进行计算,该刚度张量与莫尔-库仑模型利用应变增量计算应力增量使用的刚度张量是一致的,这样保证了弹性阶段计算的准确性,避免了利用柔度张量求逆矩阵得到刚度张量时计算机处理过大或过小数据所带来的截断误差(计算机所能处理的数据的精度是有限)。当裂纹应力强度因子超过断裂韧度时,计算裂纹扩展后的长度,再利用式(12)或式(18)来计算压剪裂纹或拉剪裂纹扩展所产生的附加损伤张量,将附加损伤张量加到柔度张量中,该本构模型计算流程见图3。

## 3 某隧道损伤演化模拟

计算模性参数:弹性模量 $E_0=15$  GPa,岩石内摩擦角 $\beta=30^\circ$ ,岩石黏聚力 $c_t=5$  MPa,岩石断裂韧度 $K_{IC}=2.3$ ,岩块蠕变柔度参量 $C=8 \times 10^{-5}$  MPa $^{-1}$ ,裂纹特征长度 $a=0.1$  m,裂纹内摩擦角 $\beta=11.5^\circ$ ,裂纹面轴向夹角 $\gamma=60^\circ$ ,裂纹面法向刚度 $K_n=2.5$ ,裂纹面切向刚

度 $K_0=1.15$ 。模型在水平方向的尺寸为50 m, 在竖直方向的尺寸为50 m, 圆形隧道半径5 m, 模型划分单元数为2500, 5200个节点; 模型左右两边约束水平位移, 底部固支, 模型顶部施加应力边界条件。

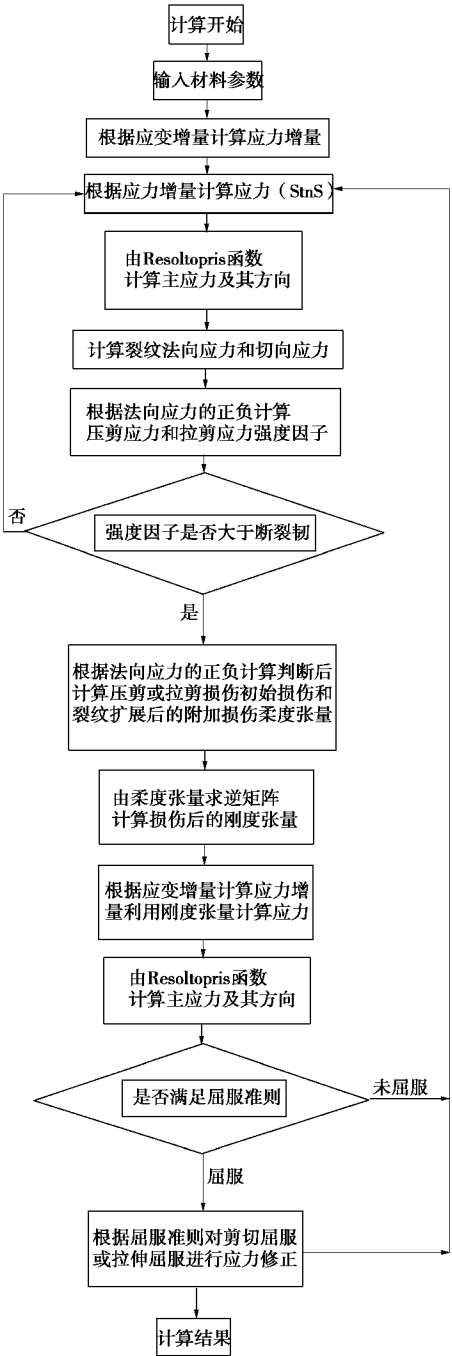


图 3 裂隙岩体损伤演化本构模型计算流程

Fig. 3 Flow chart of constitutive model for fractured rock

为了避免在对模型进行分析的过程中由于一次性加载对模型产生一定程度的冲击, 产生错误的分析结果, 采取分步加载的方式。在荷载加到 20 MPa 前 (图 4), 隧道的围岩没有出现屈服现象, 只是在隧道两帮一定范围内出现了应力强度因子比较集中的区域 (图 4), 应力强度因子都在 1.2 以下, 这也是应力集中的反应; 当荷载加到 20 MPa 时, 在隧道的两帮开

始出现了屈服破坏 (图 5 (a)), 应力强度因子超过 1.2 范围也扩大了很多 (图 5 (b)), 达到围岩内部深度达 9 m 左右。

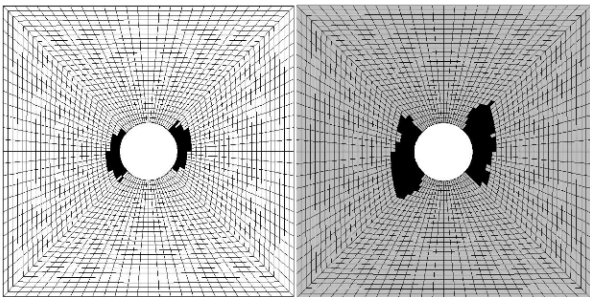


图 4 应力强度因子分布( $P=10,15$  MPa, 黑色:  $K_0>1.2$ )

Fig. 4 Distribution of stress intensity factor ( $P=10,15$  MPa, black:  $K_0>1.2$ )

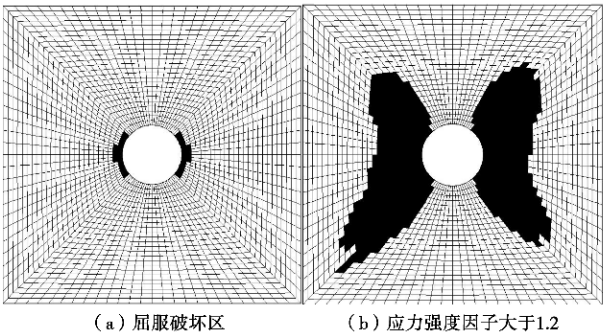


图 5 屈服破坏区和应力强度因子分布( $P=20$  MPa, 黑色:  $K_0>1.2$ )

Fig. 5 Distribution of damage region and stress intensity factor ( $P=20$  MPa, black:  $K_0>1.2$ )

当荷载达到 35 MPa 时, 隧道两帮出现较大范围的屈服破坏 (图 6 (a))。图中黑色显示的是应力强度因子超过断裂韧度的单元 (图 6 (b)), 隧道围岩中最大的应力强度因子为  $3.41 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , 应力强度因子最大值出现在隧道的左右两帮, 应力强度因子超过断裂韧度的区域比隧道围岩屈服破坏的范围稍大; 这也说明了隧道围岩首先出现断裂损伤累积后达到破坏的过程。隧道围岩屈服破坏的深度达到 4 m 左右, 隧道围岩应力强度因子超过断裂韧度的深度达到 8 m 左

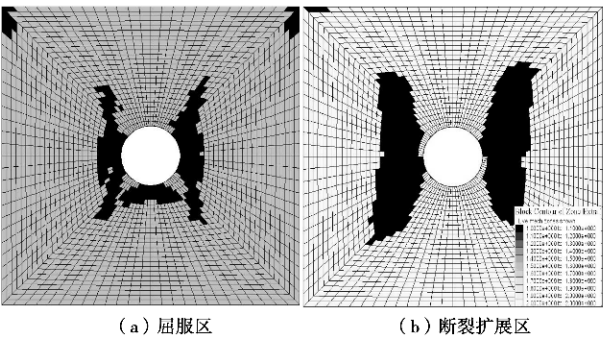


图 6 应力强度因子分布( $P=35$  MPa, 黑色:  $K_0>1.2$ )

Fig. 6 Distribution of damage region and stress intensity factor ( $P=35$  MPa, black:  $K_0>1.2$ )

右。利用莫尔-库仑模型分析的隧道两帮最大位移值为 0.05 m, 并且位移发展趋于稳定(图 7(a)); 利用 UDM 模型分析的隧道两帮最大位移值为 0.1 m, 并且有继续发展至突变趋势(图 7(b))。

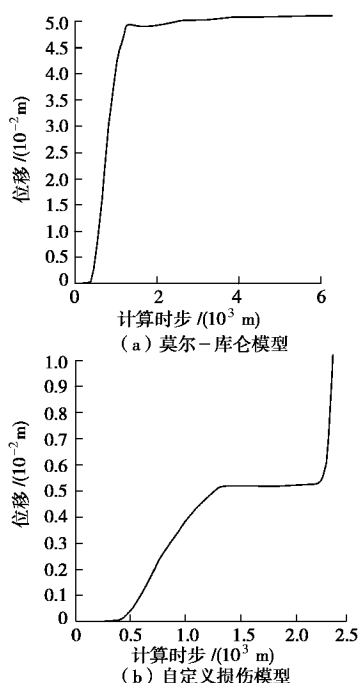


图 7 隧道侧壁位移曲线

Fig.7 Displacement of tunnel sidewall

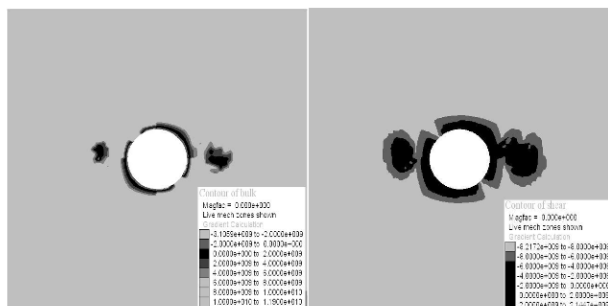


图 8 体积模量和剪切模量损伤分布

Fig. 8 Distribution of bulk and shear damage moduli

由图 8 可以看出, 隧道两帮体积模量和剪切模量都发生了一定程度的降低。体积模量初始值为  $1.19 \times 10^{10}$  MPa, 在隧道两帮体积模量则降低到  $4 \times 10^9$  MPa 甚至更低, 在断裂破坏区体积模量降低了 60% 左右, 剪切模量初始值为  $8 \times 10^9$  MPa, 在隧道两帮剪切模量则降低到  $4 \times 10^9$  MPa 甚至更低, 在断裂破坏区剪切模量降低了 50% 左右。表明隧道围岩破坏后抵抗体积变形和剪切变形的能力降低程度比较严重。

对该模型分别采用莫尔-库仑模型和自定义损伤演化模型进行了模拟。用莫尔-库仑模型分析隧道两帮的位移逐渐趋于稳定, 用自定义损伤演化模型分析隧道两帮的位移则出现了持续增大的突变现象, 这是

由于考虑损伤演化后, 在隧道围岩中出现了裂纹不断扩展, 且裂纹扩展逐渐向隧道深部延伸的结果, 这个也是隧道围岩中应力较高引起的, 所以对隧道进行支护的时候要及时采取措施改变隧道围岩内的应力分布状态, 避免裂纹失稳持续扩展。

## 4 结 论

(1) 根据几何损伤力学, 综合考虑压剪和拉剪应力状态下裂隙岩体的损伤演化规律, 开发了能够模拟裂隙初始损伤以及裂纹扩展后产生的附加损伤的节理岩体弹塑性损伤本构模型。

(2) 该本构模型在计算弹性阶段时, 采用的刚度张量与莫尔-库仑模型利用应变增量计算应力增量使用的刚度张量是一致的, 保证了弹性阶段计算的准确和高效, 避免了利用柔度张量求逆矩阵得到刚度张量时计算机处理过大或过小数据所带来的截断误差(计算机所能处理的数据的精度是有限), 保证弹性阶段计算的精确度。

(3) 通过对比隧道屈服破坏的区域和裂纹起裂扩展的区域, 可以看出, 断裂扩展的区域比屈服破坏的区域大, 这证明了该本构模型的合理正确; 表明该本构可以用于分析裂隙岩体裂纹扩展损伤演化过程中的规律, 也说明对岩土工程进行断裂损伤分析是很有必要的, 对于防止更大的岩土工程的失稳具有积极的意义。

(4) 提出了用体积模量和剪切模量的损伤来表示围岩损伤度, 体积模量和剪切模量的损伤反映了岩体抵抗体积变形和剪切变形能力的降低, 更准确的反应了岩石损伤破坏的实质和特点。

## 参考文献:

- [1] 谢和平. 基于断裂力学与损伤力学的岩石强度理论研究进展[J]. 自然科学进展, 2004, 14(10): 1086 - 1092. (XIE He-ping. The research progress of rock strength theory[J]. Natural and Science Progress, 2004, 14(10): 1086 - 1092. (in Chinese))
- [2] 李术才. 复杂应力状态下断续节理岩体断裂损伤机理研究及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 142 - 146. (LI Shu-cai. The crack and damage mechanism study of jointed rock with complex stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(2): 142 - 146. (in Chinese))
- [3] 陈卫忠, 李术才, 邱祥波. 断裂损伤耦合模型在围岩稳定性分析中的应用[J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 288 - 291. (CHEN Wei-zhong, LI Shu-cai, QIU Xiang-bo. The

- application of the crack and damage coupling model in the rock stability analyzing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(2): 288 - 291. (in Chinese))
- [4] 徐卫亚, 韦立德. 岩石损伤统计本构模型的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(6): 787 - 791. (XU Wei-ya, WEI Li-de. Study on statistical damage constitutive model of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(6): 787 - 791. (in Chinese))
- [5] 徐卫亚, 杨圣奇, 褚卫江. 岩石非线性黏弹塑性流变模型(河海模型)及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(3): 433 - 447. (XU Wei-ya, YANG Sheng-qi, CHU Wei-jiang. Nonlinear viscoelasto-plastic rheological model (Hohai model) of rock and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(3): 433 - 447. (in Chinese))
- [6] 郑少河, 朱维申. 裂隙岩体渗流损伤耦合模型的理论分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, **20**(2): 156 - 159. (ZHENG Shao-he, ZHU Wei-shen. Theory analyzing of the jointed rock fluid and damage coupling model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, **20**(2): 156 - 159. (in Chinese))
- [7] 郑少河. 裂隙岩体渗流场—损伤场耦合理论研究及应用[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2000. (ZHENG Shao-he. Research on coupling theory between seepage and damage of fractured rock mass and its application to engineering[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2000. (in Chinese))
- [8] 赵延林, 曹平, 汪亦显. 裂隙岩体渗流—损伤—断裂耦合模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(8): 1634 - 1643. (ZHAO Yan-lin, CAO Ping, WANG Yi-xian. Coupling model of seepage-damage-fracture in fractured rock masses and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(8): 1634 - 1643. (in Chinese))
- [9] 赵吉坤, 张子明, 刘仲秋. 大理岩破坏过程的三维细观弹塑性损伤模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(9): 1309 - 1315. (ZHAO Ji-kun, ZHANG Zi-ming, LIU Zhong-qiu. 3D numerical simulation of elasto-plastic damage and failure process of marble rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(9): 1309 - 1315. (in Chinese))
- [10] 赵吉坤, 张子明. 三维大理岩弹塑性损伤及细观破坏过程数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(3): 487 - 494. (ZHAO Ji-kun, ZHANG Zi-ming. 3D numerical simulation of elasto-plastic damage and failure process of marble rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(3): 487 - 494. (in Chinese))
- [11] 蓝航, 姚建国, 张华兴. 基于FLAC<sup>3D</sup>的节理岩体采动损伤本构模型的开发及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(3): 572 - 579. (LAN Hang, YAO Jian-guo, ZHANG Hua-xing. Development and application of constitutive model of jointed rock mass damage due to mining based on FLAC<sup>3D</sup>[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(3): 572 - 579. (in Chinese))
- [12] 常来山, 王家臣, 李慧茹. 节理岩体边坡损伤力学与FLAC<sup>3D</sup>耦合分析[J]. 金属矿山, 2004, **9**: 16 - 19. (CHANG Lai-shan, WANG Jia-chen, LI Hui-ru. Coupling analysis between damage mechanics of jointed rock mass slope and FLAC<sup>3D</sup>[J]. Metal Mine, 2004, **9**: 16 - 19. (in Chinese))
- [13] LEMATIRE J. A continuous damage mechanics model for ductile fracture[J]. J Eng Mater Tech, 1983, **107**(1): 83 - 89.
- [14] CHABOCHE J L. Continuous damage mechanics: a tool to describe phenomena before crack[J]. Initiation, Nuclear Engineering and Design, 1981, **64**(3): 233 - 247.
- [15] 徐靖南, 朱维申, 白世伟. 压剪应力作用下多裂隙岩体的力学性能—本构模型[J]. 岩土力学, 1993(4): 3 - 17. (XU Jin-nan, ZHU Wei-sheng, BAI Shi-wei. The mechanical properties of the fractured rock mass under shear stress action - constitutive model[J]. Rock and Soil Mechanics, 1993(4): 3 - 17. (in Chinese))
- [16] ASHBY M F, HALLAM S D. The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress states[J]. Acta Metall, 1986, **34**(3): 497 - 510.
- [17] STEIF P S. Crack extension under compressive loading engineering[J]. International Journal of Fracture Mechanics, 1984, **20**(3): 334 - 351.
- [18] LI Chun-lin. Micromechanics modelling for stress-strain behavior of brittle rocks[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1995, **50**(2): 331 - 344.
- [19] KEMENY J M. A model for nonlinear rock deformation under compression due to subcritical crack growth[J]. Int J RockMech Min Sci, 1991, **28**: 459 - 467.
- [20] KEMENY J M, COOK N G W. Crack models for the failure of rocks in compression, constitutive laws for engineering materials[M]// Theory and Applications. New York: Elsevier, 1987: 879 - 887.