

文章编号: 1000-7598 (2011) 05-1575-08

基于应变能密度理论的岩石破裂 数值模拟方法研究

孙 倩, 李树忱, 冯现大, 李文婷, 袁 超

(山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061)

摘 要: 采用双线性应变软化本构模型结合能量耗散原理建立了损伤本构方程, 并通过应变能密度理论建立了细观单元岩石破坏的能量判别准则。当某一单元所存储的应变能超过某固定值时, 单元进入损伤状态, 同时单元的损伤程度随着能量耗散的增加而增加, 损伤单元的材料属性也随之改变, 直到变为具有一定残余强度的单元。随着荷载增加, 单元损伤的程度变大, 当单元储存的应变能超过所建立的能量判别准则时, 定义单元破坏, 随着破坏单元的数目不断增多, 破坏单元相互连通形成宏观裂纹, 实现了利用线性计算完成非线性计算的过程, 避免了数值计算在单元断裂时的奇异性, 模拟了岩石的峰后破裂行为。对上述算法利用 FLAC 中的 FISH 语言开发了岩石破裂化计算程序, 并将该程序成功应用于巴西劈裂和中间裂隙拉伸试验的破裂模拟过程中, 其模拟结果与相应的理论和试验结果吻合较好, 说明该方法对于模拟岩石破裂过程的正确性和可行性。

关 键 词: 应变能密度; 能量耗散; 岩石破裂; FLAC^{2D}

中图分类号: O 241

文献标识码: A

Study of numerical simulation method of rock fracture based on strain energy density theory

SUN Qian, LI Shu-chen, FENG Xian-da, LI Wen-ting, YUAN Chao

(Research Center of Geotechnical & Structural Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: For the nonlinear fracture phenomena of rock, many numerical methods are carried out for study, but the numerical simulation methods for cracked rock are still being studied. Therefore, this paper combines the bilinear strain softening constitutive model with energy dissipation principle to establish damage constitutive equations; and through the strain energy density theory, energy failure criterion of mesoscopic element is established. When the strain energy of an element stored exceeds a fixed value, the element comes into damage situation and the damage degree increases with the increasing of energy dissipation. Simultaneously, the material properties of the damaged element change until it becomes the element with residual strength. As load increases, the element's damage degree increases. When the strain energy of the element stored exceeds the established value of the energy criterion, the element gets into fracture. With the increasing of fractured elements, macro-crack generates. This method implements linear calculation instead of the process of nonlinear computation, avoids the singularity of the numerical calculation in element fracture, and simulates the post-peak fracture behaviour of rock. The algorithm can be used to develop a rock fracture process computer program by the FISH language in the fast Lagrangian analysis of continua (FLAC). This program is successfully applied to the simulation of Brazilian splitting and tensile test with cracks. The simulation results agree well with the experimental results. It indicates that the simulation method of rock failure process is correct and feasible.

Key words: strain energy density; energy dissipation; rock fracture; fast Lagrangian analysis of continua in 2D (FLAC^{2D})

1 引 言

岩石作为地质作用的产物, 是一种具有复杂力

学性质的非均质材料。岩石介质在变形破坏过程中一般会表现出很强的非线性特征^[1], 物理和力学性质随着破坏的进行也会具有不可逆性, 在这一不可

收稿日期: 2010-06-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目 (No. 2010CB732002); 山东省自然科学基金资助项目 (No. 2009ZRB02285); 山东大学自由探索 (No. 2010TS038)。

第一作者简介: 孙倩, 女, 1985 年生, 硕士研究生, 主要从事岩石破坏机理以及数值计算等方面研究。E-mail: ningyezi1227@yahoo.com.cn

通讯作者: 李树忱, 教授, 博士生导师。E-mail: shuchenli@sdu.edu.cn

逆过程中会产生各种形式的能量耗散。由热力学定律可知,能量转化是物质物理过程的本质特征,物质破坏是能量驱动下的一种状态失稳现象。因此,研究并建立岩石破坏过程中的能量变化规律及其与强度和整体破坏之间的联系,将更有利于反映外载作用下岩石强度变化与整体破坏的本质特征^[2]。

从最早引入势能概念来定义材料损伤的 Huber 到现在,已有众多国内外学者通过能量分析方法来描述岩石的变形破坏行为,并取得了巨大的进展^[3-8],其中大部分工作都集中在试验和理论研究上,通过能量分析得到岩体的宏观破坏行为。他们的研究都证明同样的问题:材料的破坏主要是由内部耗散引起的,并且是不可逆的,同时能量准则对于判断材料破坏具有普遍意义。

岩石的破裂是一个由损伤逐渐加剧导致材料渐进劣化,微观裂纹产生、扩展直到贯通的全过程。因此,从细观力学角度研究岩石破裂,分析岩石微小单元的损伤破坏规律,通过单元能量耗散和能量判别标准研究单元破坏,能够系统完整地展现整个岩石破裂过程。目前最有代表性的应变能破坏准则为畸变能密度理论(第4强度理论)^[9]。这一理论对于塑性材料是种较好的强度理论,但它只适用于拉压性质相同的塑性材料,而对三向等值拉伸无能为力,因此,除了畸变能之外,还必须考虑体积变形能^[10]。应变能密度理论的应用^[11]可以综合考虑上述问题,它把体积变形能密度与形状改变能密度之和即应变能密度作为材料破坏的准则。这一理论的优点是对于复杂几何结构和加载条件,以及混合裂纹发展情况都能得到很好的应用^[12]。

根据上述分析,为了模拟岩石破裂的局部破坏以及微裂纹萌生发展乃至整个断裂的全过程,考虑岩石的非线性破坏行为,参考文献[13]采用双线性应变软化本构模型,通过应变能密度理论和能量耗散原理建立了细观单元岩石的损伤及破坏的能量判别准则。当某一单元所存储的应变能超过某固定值时,单元进入损伤状态,根据应变能密度的大小确定单元的损伤程度,损伤单元的材料属性也随之改变,直到变为具有一定残余强度的单元。对于进入损伤状态的岩石单元,通过应变能密度的能量破坏准则,判断单元是否破坏。随着荷载增加,破坏单元的数目逐渐增多,破坏单元相互连通形成宏观裂纹,造成岩石试件的整体破裂。在数值模拟过程中,对到达应力极限后损伤单元的弹性模量折减进行离散化处理。上述方法实现了利用线性计算完成非线性计算的过程,避免了数值计算在单元断裂时的奇

异性,模拟了岩石的峰后破裂行为。此计算方法利用 Flac^{2D} 中的 FISH 语言开发了岩石破裂的计算程序,通过模拟巴西劈裂和中间裂隙拉伸试验,表明该方法对于模拟岩石破裂过程的正确性和可行性。

2 应变能密度理论

岩石破裂的方式受到很多因素的影响,比如加载类型、几何结构、材料性质等。而应变能密度理论可以综合考虑这些因素。假定岩石是由许多微小的结构单元组成的连续块体,每个结构单元包含单位体积的材料。当它在外力作用下发生变形时,单元内部将储存应变能,这样每个单元储存的能量就称之为应变能密度(dW/dV)。

不管单元体承受的是拉、压或是剪应力,应变能密度都能够综合反映单元体各应力分量的作用。在每一个给定时刻,每个单元能够储存的应变能是有限的,不同位置单元体中储存的应变能也不相同。因此,可以通过材料体本身不同单元体能量的变化过程来评价材料体的破坏形态。

2.1 考虑应变软化的应变能密度方程的确定

根据应变能密度理论,在等温条件下,每个单元体的应变能密度方程可由下式表示:

$$\frac{dW}{dV} = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (1)$$

上式表明,单元体内储存的应变能密度由其应力 σ_{ij} 和应变增量 $d\varepsilon_{ij}$ 的变形历史决定。这一理论通过应变能密度来判断材料单元的屈服失效,并规定,当单元体吸收的全部应变能等于单轴拉伸条件下发生断裂时吸收的能量(dW/dV)_c时,单元体就发生破坏。

这一理论表明,岩石在荷载作用下发生全局失稳破坏之前,局部破坏和裂纹扩展就已经发生,从而严重影响岩石结构的宏观破坏行为。岩石内部微裂纹的稳态扩展最终导致岩石的宏观破裂。

岩石内部的每一个单元体在变形破坏过程中会伴随着能量的耗散,这一耗散过程造成材料的渐进损伤,导致材料性质恶化和强度丧失^[2]。材料的力学损伤可以用应变软化来描述。考虑文献[13]岩石单轴拉伸的双线性应变软化本构模型,即将岩石的单轴拉伸应力-应变关系简化为图1。

岩石单元在外力作用下先发生弹性变形,在到达应力极限点 U 后,没有立即破坏,而是进入应变软化阶段,材料开始损伤。如图1所示,材料单元在到达 A 点时吸收的应变能密度为应力-应变曲线包围下的面积 $OUAC$ 。如果在 A 点进行卸载,卸载

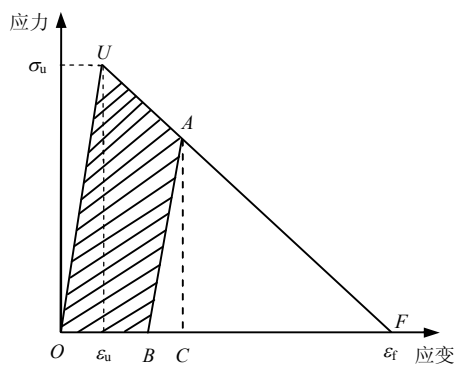


图1 双线性应变软化应力-应变关系

Fig.1 Bilinear softening stress-strain relation

路径沿着线段 AB 返回, 而新的加载路径会沿着 BAF 进行。在这一卸载和重加载过程中, 面积 $OUAB$ 所代表的能量就耗散掉了。因此, 材料单元吸收的应变能密度可由以下两部分组成:

$$\frac{dW}{dV} = \left(\frac{dW}{dV} \right)_d + \left(\frac{dW}{dV} \right)_e \quad (2)$$

式中: $(dW/dV)_d$ 为耗散应变能密度 $OUAB$; $(dW/dV)_e$ 为可恢复应变能密度 BAC 。

如果 A 点处于弹性段 OU 上, 卸载将沿着加载路径返回, 材料不发生损伤。对于没有发生损失的材料单元, 其临界应变能密度 $(dW/dV)_c$ 等于面积 OUF 。而当材料单元发生损伤后, 因为能量耗散的产生, 损伤后残余的临界应变能密度 $(dW/dV)_c^*$ 为单元卸载后可重新获得的应变能密度 BAF , 可用下式表示:

$$\left(\frac{dW}{dV} \right)_c^* = \left(\frac{dW}{dV} \right)_c - \left(\frac{dW}{dV} \right)_d \quad (3)$$

上式表明, 单元耗散的应变能密度越多, 单元损伤越厉害, 能够承受的临界应变能密度越低。

通过以上分析可以看出, 材料单元在外力作用下变形损伤越厉害, 吸收的应变能密度 (dW/dV) 越大, 临界应变能密度 $(dW/dV)_c^*$ 越小。当 $(dW/dV) \geq (dW/dV)_c^*$ 时, 破坏开始产生。当 (dW/dV) 等于材料单元初始临界应变能密度 $(dW/dV)_c$ (即面积 OUF) 时, 单元完全断裂, 不再承受任何荷载。

上述岩石单元的双线性本构关系通过单轴拉伸试验能够很容易得到。而一般岩石结构则是处于复杂的外力作用下, 内部岩石单元同时受到拉、压、剪应力的共同作用, 根据岩石单元的受力历史得到其应变能密度, 其大小能够综合反应单元的受力状态, 将其大小与单轴拉伸情况下不同阶段的应变能密度进行对比, 可以判断复杂应力状态下岩石单元

的损伤破坏情况。

2.2 能量耗散与损伤本构

按照能量观点, 当岩石产生非弹性变形后, 岩石所能承担的非弹性变形能已大大降低, 即岩石的本构能已降低, 这也是由于岩石微观结构发生变化而引起岩石性能劣化的一种表现^[14]。岩石单元在到达应力峰值点之后就进入了应变软化阶段, 产生了非弹性变形, 材料的强度降低。定义材料单元的强度降低为弹性模量的折减, 用等效弹性模量 E^* 表示。如图2所示, 随着能量的损失, 卸载峰值强度将从 U 点降到 G 、 H 、 I 、 L , 等效弹性模量分别为 E_1^* 、 E_2^* 、 E_3^* 、 E_n^* 。

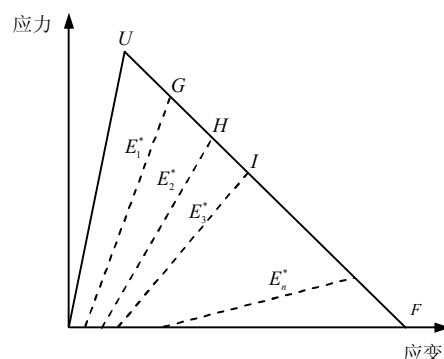


图2 能量耗散后的弹性模量折减

Fig.2 The decrease of elastic modulus after energy dissipation

为了方便计算, 将等效弹性模量进行离散处理, 离散成 20 个不同的值:

$$E^*(n) = \frac{(21-n)}{20} E, \quad n=1, 2, \dots, 20 \quad (4)$$

由连续介质损伤力学理论的本构关系^[15]:

$$\sigma = E \varepsilon (1 - D) \quad (5)$$

式中: E 为无损岩石的弹性模量。

可以得到, 本模型中岩石材料单元损伤参数 D 为

$$D = \frac{E - E^*(n)}{E} \quad (6)$$

式中: n 为材料单元损伤的程度。

当然上述对等效弹性模量的离散化处理, n 取值越大, 模拟结果越精密, 但计算效率会大大降低, 综合考虑这 2 个因素, n 取值为 20 已满足要求。

由能量耗散原理, 能量耗散与损伤和强度丧失直接相关, 耗散量反映了原始强度衰减的程度^[2]。由图1和式(2)可以看出, 到达应力极限点后, 岩

石单元的应变能密度越大, 能量耗散越多, 因此, 通过应变能密度作为岩石单元损伤和破坏的判别准则。

(1) 当 $(dW/dV) < (dW/dV)_u = 1/2(\sigma_u \varepsilon_u)$ 时, 材料单元处于弹性阶段, 没有发生损伤, 等效弹性模量和临界应变能密度都为单元的初始值, 即 $E^* = E$, $(dW/dV)_c^* = (dW/dV)_c = 1/2(\sigma_u \varepsilon_f)$ 。

(2) 当 $(dW/dV) \geq (dW/dV)_u$ 时, 材料单元开始进入损伤阶段, 用离散的等效弹性模量 $E^*(n)$ 作为材料单元损伤后的弹性模量, n 表示材料单元损伤的程度 ($0 \leq n \leq 20$), 其取值由应变能密度确定。由图 1 也可以看出, 进入损伤阶段后, 材料单元的临界应变能密度 $(dW/dV)_c^*$ 随着 (dW/dV) 增加而逐渐减少。

(3) 当 $(dW/dV) \geq (dW/dV)_c^*$ 时, 单元产生破坏, 标志材料内部裂纹开始形成。

(4) 当 $(dW/dV) \geq (dW/dV)_c = 1/2(\sigma_u \varepsilon_f)$ 时, 由式 (4) 可知, 材料单元的损伤程度 $n = 20$, 此时等效弹性模量和临界应变能密度全部为 0, 单元完全断裂, 失去承载能力。为了保持整个结构计算模型的完整性和单元的连续性, 不对单元进行挖去处理, 而是给予材料单元一个很小的残余模量 $E_c^* = 0.05E$ 。

3 数值实现

采用 FLAC^{2D} 有限差分数值软件, 根据上述理论建立岩石单元的损伤破坏方程, 通过 FISH 语言开发岩石破裂的计算程序。模型加载采取荷载控制分级加载方式, 即依次在模型上累积增加等量微小荷载, 每次计算平衡后, 计算所有单元的应变能密度, 并根据上述应变能密度判别准则判断单元的损伤程度和破坏情况。在施加第 1 步荷载后, 因荷载较小, 所有单元都处于弹性阶段, 此时每个单元的应变能密度为

$$\frac{dW}{dV} = \frac{1}{2E} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + 2\tau_{xy}^2 - 2\nu(\sigma_x \sigma_y - \tau_{xy}^2)] \quad (7)$$

设施加分级荷载至第 i 步, 则此时每一个单元的应变能密度为

$$\begin{aligned} \left(\frac{dW}{dV} \right)_i &= \left(\frac{dW}{dV} \right)_{(i-1)} + \Delta \left(\frac{dW}{dV} \right) = \left(\frac{dW}{dV} \right)_{(i-1)} + \\ &\frac{1}{2} (\sigma_x^i + \sigma_x^{i-1})(\varepsilon_x^i - \varepsilon_x^{i-1}) + \frac{1}{2} (\sigma_y^i + \sigma_y^{i-1}) \cdot \\ &(\varepsilon_y^i - \varepsilon_y^{i-1}) + \frac{1}{2} (\tau_{xy}^i + \tau_{xy}^{i-1})(\gamma_{xy}^i - \gamma_{xy}^{i-1}) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $n \geq 2$; σ_x^i 、 σ_y^i 、 τ_{xy}^i 为第 i 加载步时单元的应力, σ_x^{i-1} 、 σ_y^{i-1} 、 τ_{xy}^{i-1} 为上一个加载步时单元的应力。同理, 应变表达方式相同。

当某一个单元的应变能密度 $(dW/dV) > (dW/dV)_u = 1/2(\sigma_u \varepsilon_u)$ 时, 其损伤程度 n 为

$$n = \frac{(dW/dV) - (dW/dV)_u}{\frac{1}{20} [(dW/dV)_c - (dW/dV)_u]} = \frac{20 \frac{2(dW/dV) - \sigma_u \varepsilon_u}{\sigma_u \varepsilon_f - \sigma_u \varepsilon_u}} \quad (9)$$

其中, n 取等式右边结果的整数部分, n 的取值范围为 0, 1, 2, ..., 20。当 $n = 0$ 时, 表明单元仍处于线弹性阶段, 没有发生损伤; 当 $n = 20$ 时, 损伤值最大, 表明单元完全断裂, 失去承载能力。同时单元的弹性模量 E^* 由式 (4) 得到。

此时, 单元耗散的应变能密度为

$$(dW/dV)_d = (dW/dV) - \frac{1}{2E^*} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + 2\tau_{xy}^2 - 2\nu(\sigma_x \sigma_y - \tau_{xy}^2)] \quad (10)$$

因此, 单元的临界应变能密度为

$$\begin{aligned} (dW/dV)_c^* &= (dW/dV)_c - (dW/dV)_d = \frac{1}{2} \sigma_u \varepsilon_f - \\ (dW/dV) &+ \frac{1}{2E^*} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + 2\tau_{xy}^2 - 2\nu(\sigma_x \sigma_y - \tau_{xy}^2)] \end{aligned} \quad (11)$$

基于应变能密度损伤本构模型的计算流程见图 3。

4 岩石破裂的数值模拟

4.1 巴西劈裂数值模拟

本算例以文献[16]中施加径向集中荷载的巴西劈裂为例。计算模型见图 4, 圆盘直径 $D = 50$ mm, 共划分了 7 860 个单元。模型材料采用文献[16]中的大理岩, 弹性模量 $E = 66.8$ GPa, 泊松比 $\nu = 0.33$, 密度 $\rho = 2.62$ g/cm³, 单元拉伸极限应力 $\sigma_u = 20$ MPa, 极限应力时应变 $\varepsilon_u = 1.3 \times 10^{-5}$, 发生断裂时应变 $\varepsilon_f = 1 \times 10^{-4}$ 。模型顶部和底部分别施加 y 负方向和 y 正方向的荷载, 荷载大小以 2 kN 递增。

第 1 次施加 2 kN 荷载后, 圆盘内没有损伤发生, 各单元都处于线弹性阶段, 此时巴西圆盘内部的应力分布如图 5 所示, 将其分布规律与文献[16]中圆盘内部应力分布的理论结果进行对比, 结果表明, 模拟的应力分布规律与理论分布基本吻合。

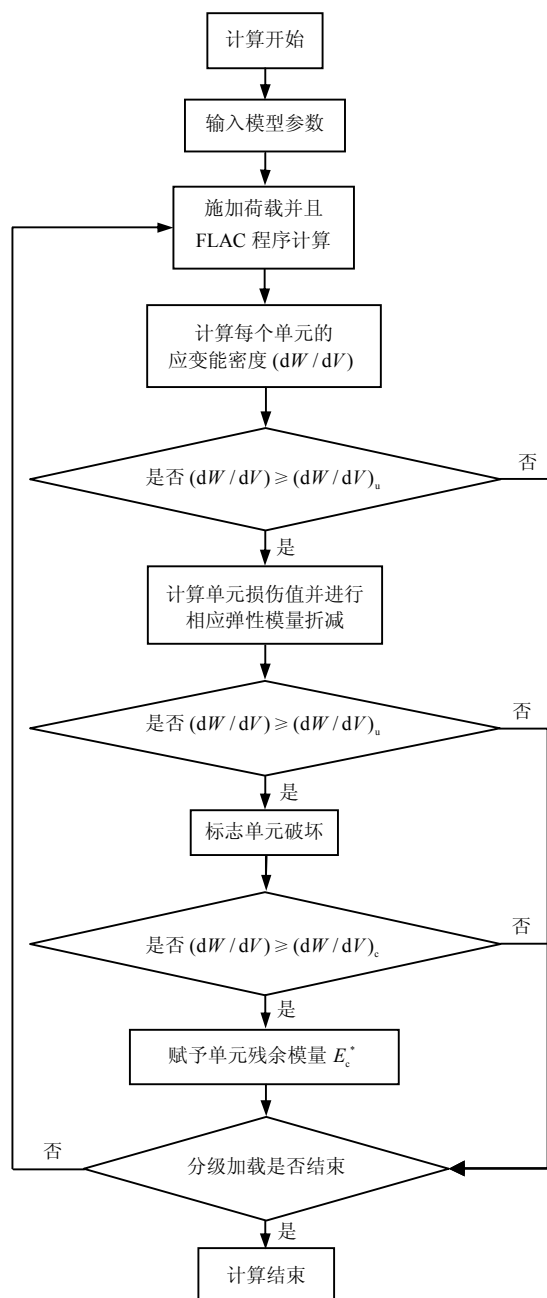


图3 岩石破裂的数值模拟计算流程

Fig.3 Calculation flow of numerical simulation of rock fracture

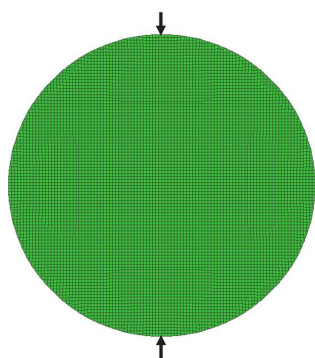


图4 数值模型图

Fig.4 Numerical model

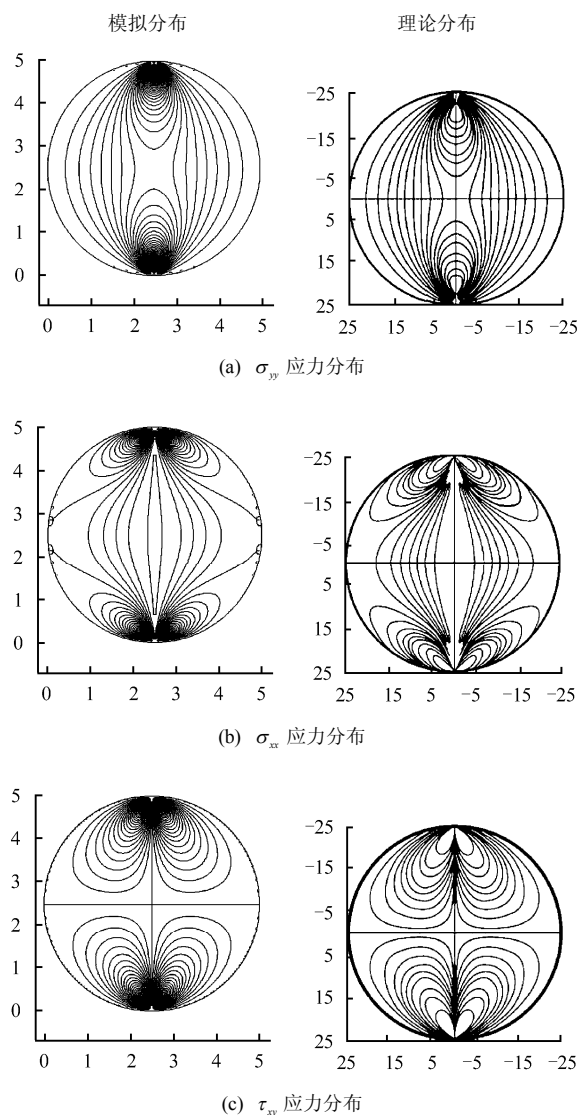


图5 巴西圆盘内部应力分布对比

Fig.5 Comparison of the stress distributions in Brazilian disc

随着荷载的增加,各单元吸收的应变能逐渐增加,记录圆盘顶部中间单元的能量变化过程,如图6所示,单元吸收的应变能密度(dW/dV)从0逐渐增加,临界应变能密度(dW/dV)_c从(dW/dV)_c = 1 000逐渐减少,当两者相交时,标志单元破坏。

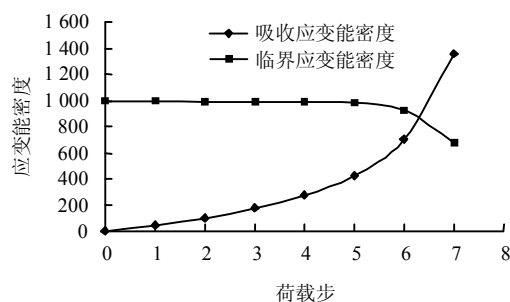


图6 单元应变能密度随荷载变化曲线

Fig.6 Element's strain energy density against load

从图 6 看出, 当计算到第 7 个荷载步, 即施加荷载为 14 kN 时, 圆盘顶部中间单元的 $(dW/dV) \geq (dW/dV)_c^*$, 表明圆盘两端点处单元开始破坏。当计算到第 15 个荷载步, 即施加荷载为 30 kN 时, 试件由两端的局部损伤破坏突然发展到试件中间完全贯穿破坏, 同时圆盘两端存在局部破坏区。试件加载到第 7、12、14、15 个荷载步时的破坏情况见图 7。

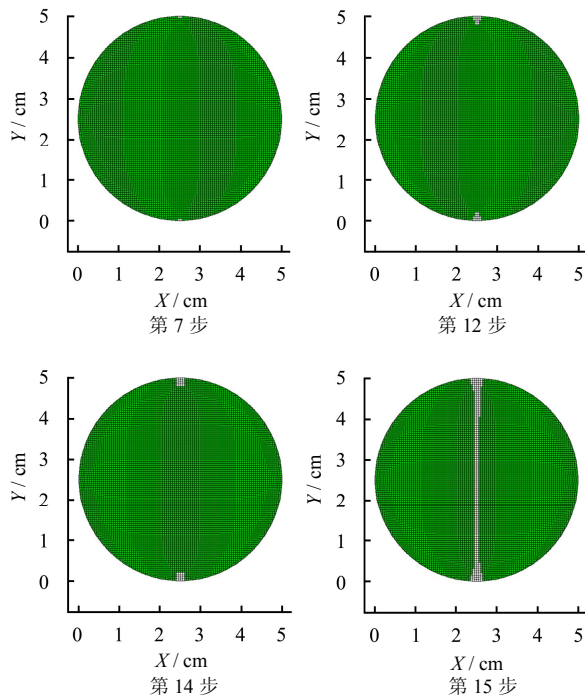


图 7 巴西劈裂单元破坏过程
Fig.7 Failure process of Brazilian splitting

试件破坏时, 各单元的损伤情况见图 8, 损伤值 n 通过单元的内置变量 ex_5 表示 (取值范围为 1~20)。从单元的损伤云图中可以看出, 圆盘中间贯穿破坏处各单元的损伤值都达到了最大值 20, 表明圆盘中间处单元已经发生完全断裂, 失去承载能力。圆盘两端除了一部分单元发生完全断裂外, 周边单元也发生了不同程度的损伤。

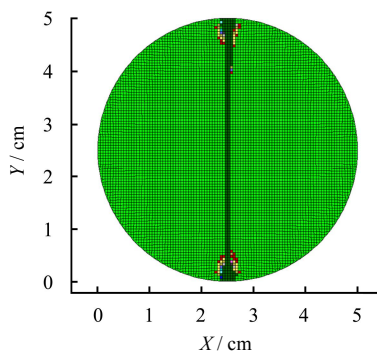


图 8 巴西圆盘内部各单元损伤情况
Fig.8 Element's damage distribution in Brazilian disc

文献[17—19]均进行了施加径向荷载的巴西圆盘试验研究, 结果表明, 脆性岩石在劈裂过程中, 由于施加荷载处产生应力集中, 圆盘两端首先发生破坏, 随着荷载的继续增加, 并最终沿着圆盘的中部产生贯穿破坏, 同时圆盘两端加载点处出现破坏扇形区。图 9 给出了文献[17]中大理石在两种垫条方式下劈裂破坏的素描图。对比图 7 与图 9 可以看出, 本文数值计算模拟的结果与文献中的试验结果能够很好地吻合, 说明本文方法模拟岩石破裂的正确性。

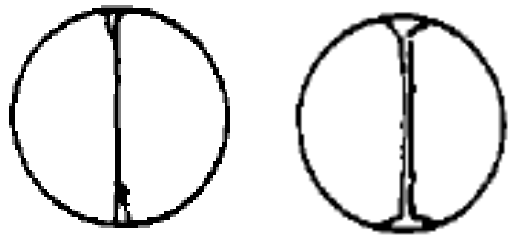


图 9 大理石巴西劈裂试验结果^[17]
Fig.9 The test results of Brazilian splitting for marble

4.2 内置裂隙拉伸试验数值模拟

本算例以文献[20]中内置裂隙拉伸试验为例。计算模型见图 10。试件尺寸 50 mm×100 mm, 内置裂隙长为 20 mm, 厚为 0.8 mm, 共划分了 9 772 个单元。试件材料为类岩石的砂浆材料, 弹性模量 $E=5.17$ GPa, 泊松比 $\nu=0.192$, 密度 $\rho=2.30$ g/cm³, 单元拉伸极限应力 $\sigma_u=2.7$ MPa, 极限应力时应变 $\varepsilon_u=5.8 \times 10^{-4}$, 发生断裂时应变 $\varepsilon_f=7 \times 10^{-4}$ 。模型顶部和底部分别施加均匀的拉伸荷载, 荷载大小以 100 N 递增。

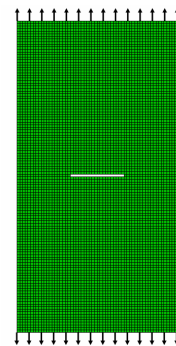


图 10 数值模型图
Fig.10 Numerical model

经计算得到以下结果, 在拉伸荷载作用下裂纹尖端发生应力集中, 当计算到第 4 个荷载步, 即荷载为 400 N 时, 裂纹两端的单元开始发生破坏。图

11 为裂纹左端第1个单元的应变能密度随荷载变化的情况, 从图中可以看出, 在第4荷载步时 $(dW/dV) \geq (dW/dV)_c^*$, 表明单元破坏。

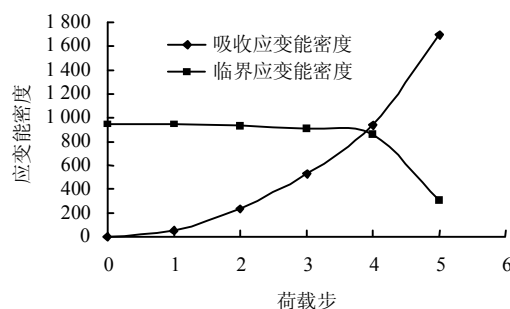


图 11 单元应变能密度随荷载变化曲线

Fig.11 Element's strain energy density against load

当计算到第5个荷载步, 即荷载为 500 N 时, 试件突然沿着裂纹方向向两边发生贯穿破坏。模型在计算到第4、5个荷载步时的破坏情况见图 12。

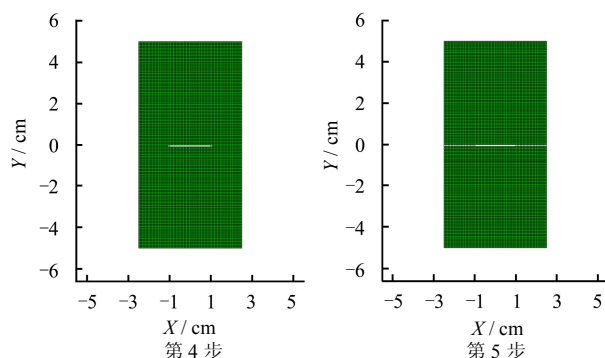


图 12 内置裂隙拉伸试验单元破坏过程

Fig.12 Failure process of center cracked tensile test

试件破坏时, 各单元的损伤情况见图 13, 从单元的损伤云图可以看出, 裂纹尖端周围因为应力集中各单元产生了不同程度的损伤; 裂纹两端延伸到模型边缘的一系列单元损伤值都达到了 20, 表明试件沿裂纹所在断面发生了完全断裂。

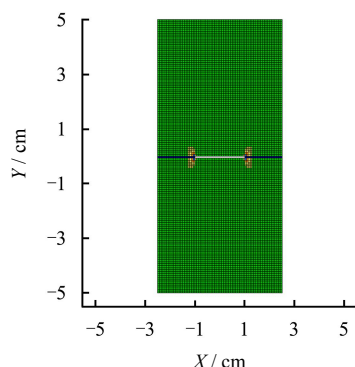
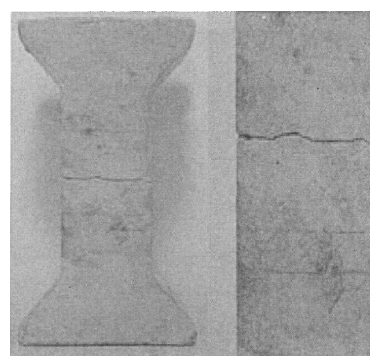


图 13 试件内部各单元损伤情况

Fig.13 Element's damage distribution in specimen

文献[20]在刚性伺服试验机上对预制不同裂隙倾角的砂浆材料进行了单轴拉伸试验。试验结果表明, 当拉应力达到一定程度后, 预制裂纹开始起裂, 然后迅速扩展, 导致试件的整体破坏。当裂隙为水平 (即裂隙倾角 $\alpha = 90^\circ$) 时, 在裂纹前缘产生翼裂纹, 并且沿着原裂纹方向扩展, 直至试件拉断, 最终断裂迹线与轴向拉应力方向垂直, 且断裂面较平整。图 14 为文献[20]中水平裂隙的拉伸破坏图。通过图 12 与图 14 对比可见, 本文数值计算模拟的内置裂隙拉伸试验破坏过程和损伤情况与试验结果基本吻合, 说明了本文方法模拟岩石破裂的正确性和可行性。



(a) 试件正面 (b) 断裂迹线

图 14 水平裂隙拉伸试验结果^[20]

Fig.14 The test results of horizontal cracked tensile test

5 结 论

(1) 从细观力学角度出发, 采用拉伸双线性应变软化本构模型, 分析岩石单元到达应力极限点后的能量损伤演化过程, 并通过应变能密度理论与能量耗散原理建立单元破坏的判断准则, 这一方法能够很好地模拟岩石损伤破坏的全过程。

(2) 岩体单元的应变能密度, 根据每次施加荷载后单元吸收能量的大小依次累加获得, 同时对损伤单元的弹性模量折减进行离散化处理, 从而实现线性计算完成非线性计算; 对于损伤达到最大值的单元 (即认为发生完全断裂), 赋予一个很小的残余弹性模量, 通过连续计算来实现岩石的非连续破裂行为, 避免了数值计算在单元断裂时的奇异性。

(3) 通过巴西劈裂和内置裂隙拉伸试验的数值模拟, 表明运用上述方法能够很好地模拟岩石从局部破坏到整体破裂的全过程, 并且可以得到破坏过程中岩石内部各单元的损伤演化过程。

(4) 从能量角度研究岩石破裂, 更能全面体现岩石强度变化与整体破坏的本质特征。本文通过 FLAC 中的 FISH 语言开发了岩石破裂的数值计算

程序,与理论和解析方法相比,该方法具有更广阔的应用前景,可直接求解各种复杂问题。

参 考 文 献

- [1] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [2] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003—3010.
XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(17): 3003—3010.
- [3] MIKHALYUK A V, ZAKHAROV V V. Dissipation of dynamic-loading energy in quasi-elastic deformation processes in rocks[J]. **Applied Mechanics and Technical Physics**, 1997, 38(2): 312—318.
- [4] STEFFLER E D, EPSTEIN J S, CONLEY E G. Energy partitioning for a crack under remote shear and compression[J]. **Int. J. Fracture**, 2003, 120: 563—580.
- [5] 尤明庆, 华安增. 岩石试样破坏过程的能量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 778—781.
YOU Ming-qing, HUA An-zeng. Energy analysis of failure process of rock specimens[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(6): 778—781.
- [6] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3565—3570.
XIE He-ping, PENG Rui-dong, JU Yang. Energy dissipation of rock deformation and fracture[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(21): 3565—3570.
- [7] 潘岳, 王志强, 李爱武. 岩石失稳破裂的综合刚度和综合能量准则[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3672—3676.
PAN Yue, WANG Zhi-qian, LI Ai-wu. Comprehensive rigidity and comprehensive energy[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(12): 3672—3676.
- [8] 张安康, 陈士海, 杜荣强, 等. 岩石类材料的能量基率相关弹塑性损伤模型[J]. 岩土力学, 2010, 31(增1): 207—215.
ZHANG An-kang, CHEN Shi-hai, DU Rong-qiang, et al. Energy-based elastoplastic damage model for rock materials with strain rate effects[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(Supp.1): 207—215.
- [9] 刘鸿文. 材料力学(上册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [10] 余熙莹. 对于第四强度理论的修正[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2002, 27(增): 63—69.
YU Xi-ying. The revision of the fourth strength theorem[J]. **Journal of Guangxi University (Natural Science)**, 2002, 27(Supp.): 63—69.
- [11] LI Q M. Strain energy density failure criterion[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2001, 38: 6997—7013.
- [12] GDOUTS E E. Problems of mixed mode crack propagation[M]. [S. l.]: Martinus Nijhoff Publ, 1982.
- [13] 王学滨, 海龙, 黄梅. 岩样单轴拉伸损伤不均匀性分析——第一部分: 基本理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1446—1449.
WANG Xue-bin, HAI Long, HUANG Mei. Inhomogeneity analysis of damage under uniaxial tension(I): —Basic theory[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(9): 1446—1449.
- [14] 金丰年, 蒋美蓉, 高小玲. 基于能量耗散定义损伤变量的方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 1976—1980.
JIN Feng-nian, JIANG Mei-rong, GAO Xiao-ling. Defining damage variable based on energy dissipation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(12): 1976—1980.
- [15] 李兆霞. 损伤力学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 16—19.
- [16] JIANHONG YE, WU F Q, SUN J Z. Estimation of the tensile elastic modulus using Brazilian disc by applying diametrically opposed concentrated loads[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2009, 46: 568—576.
- [17] 杨同, 王宝学, 孙林. 垫条方式对岩石劈裂试验的影响分析[J]. 勘察科学技术, 2002, (1): 3—7.
YANG Tong, WANG Bao-xue, SUN Lin. Effects of various spacer methods for rock split tests[J]. **Site Investigation Science and Technology**, 2002, (1): 3—7.
- [18] HUDSON J A, BROWN E T, RUMMEL F. The controlled failure of rock discs and rings loaded in diametral compression[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, 1972, 9: 241—248.
- [19] MARKIDES C H F, PAZIS D N, KOURKOULIS S K. Closed full-field solutions for stresses and displacements in the Brazilian disk under distributed radial load[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2010, 47: 227—237.
- [20] 杨磊. 岩体三维裂隙拉伸断裂机理的试验与数值模拟研究[硕士学位论文 D]. 济南: 山东大学, 2008.