

地质体渐进破坏面的计算模型与剪切面破坏准则

李世海, 周 东

(中国科学院 力学研究所, 北京 100190)

摘要: 提出地质体渐进破坏的多尺度计算框架, 确定不同尺度的计算条件和物理参数的选取方法。将工程地质模型分为 3 级尺度: (1) 工程地质模型的实际尺度, 从百米到千米量级; (2) 满足计算精度的数学网格, 即等应力应变单元的尺度, 通常为米量级; (3) 描述地质体破坏的特征尺度, 可以选为实验室试样尺度, 通常分米量级。在该多尺度计算框架下, 地质体材料的破坏可以采用实验室测得强度参数进行描述。提出适用于多尺度计算的一种基于剪应变强度分布的新的强度准则, 该准则以应变作为强度指标, 定义剪应变强度在材料中服从某种分布, 未达到强度部分保持线弹性, 超过强度的部分用库仑摩擦描述。该强度准则可以表述材料的非线性屈服和软化现象, 得到材料的渐进破坏过程。当应变强度区间变化时可以自然得到脆断模型、软化模型以及理想弹塑性模型。通过离散元的算例计算表明, 该模型中将材料的内部细观状态表述为弹性微元面和破裂微元面, 并用线弹性和库仑摩擦参数分别表达是合理的。

关键词: 工程地质; 渐进破坏; 多尺度; 破坏准则; 应变强度分布

中图分类号: P642

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2013)增 2 - 3009 - 07

COMPUTATIONAL MODEL OF PROGRESSIVE FAILURE PLANE IN GEOLOGICAL BODY AND FAILURE CRITERION OF SHEAR PLANE

LI Shihai, ZHOU Dong

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China*)

Abstract: Multiscale computational framework is proposed to describe progressive failure of geological body. Calculation condition and determination method of physical parameters in multiscale are established. Engineering geological model is divided into three computational scales, which include size of actual model from hundreds to thousands meters, size of mathematical mesh with meter scale and characteristic size of fracture corresponding to experimental sample scale. Strength parameters from lab can be used to describe failure in this multiscale computational framework. A new strength criterion based on distribution of shear strain strength on shear plane is introduced, in which strain is used as the strength index and shear strain strength complies with a certain distribution law. Area where shear strain is below the shear strain strength keeps linear elastic, while the rest turns into Coulomb's friction. Nonlinear behavior of material such as yielding and strain softening can be described. Elasto-brittle model, strain softening model and ideal elasto-plastic model can be naturally obtained through the variation of the interval of upper limit and lower limit of strain strength. Numerical result of discrete element method shows that it is reasonable to describe the internal microscopic damage with elastic microplane and fracture microplane which are expressed with linear elastic and Coulomb's friction parameters, respectively.

Key words: engineering geology; progressive failure; multiscale; failure criterion; strain strength distribution

1 引言

地质体材料是非均匀材料, 内部结构复杂, 通常有大量结构面或既有裂纹等^[1], 其破坏的本质是

材料内部结构面或既有的大量裂纹在外加荷载或者内部软化条件下发生的整体破坏, 为描述这样的物理过程, 采用宏观试验参数获得材料特性的基本规律, 得到非线性本构关系, 形成了基于连续介质力学的塑性力学模型。应当说, 连续介质力学是将材

收稿日期: 2012 - 01 - 17; **修回日期:** 2012 - 04 - 17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB731500)

作者简介: 李世海(1958 -), 男, 1982 年毕业于河北工业大学物理专业, 现任研究员、博士生导师, 主要从事非连续介质力学及工程地质灾害方面的教学与研究工作。E-mail: shli@imech.ac.cn。通讯作者: 周 东(1985 -), 男, 现为博士研究生。E-mail: zhoudong@imech.ac.cn

料内部复杂的几何问题转化为复杂的物理问题。塑性力学的模型^[2-7]主要包括：理想弹塑性模型、脆断模型、应变软化模型、含有强化过程的应变软化模型等。这些模型主要适用于材料裂纹的尺度远小于研究尺度的情况。地质体中，结构面是一个非连续面，完整材料的内部也往往出现裂纹长度远远大于其厚度(宽度)的情况，与研究区域的尺度相比不是足够小，塑性力学的应用受到很大的限制。

材料内部的裂缝不满足连续模型的条件，但未断裂部分仍然可以用连续模型描述，因此，裂缝的尖端是连续模型和非连续模型的突变点。用连续介质的方法描述裂纹尖端的扩展，是断裂力学^[8-11]研究的内容，常见的模型包括：损伤裂纹模型、凝聚裂纹模型、桥裂纹模型、微观裂纹相互作用模型等。断裂力学研究裂纹尖端的特性反映在数值模拟或者计算力学中，面临的问题包括：(1) 分析结果依赖于网格的尺度；(2) 研究单裂纹特性的结论应用于地质体的整体失稳受到限制。

岩土二元介质模型^[12-13]是一种较新的计算不均匀地质体的抽象理论模型。该模型将岩土材料抽象为由结构体和结构带组成的二元介质复合材料或由弹脆性元和弹塑性元组成的二元介质材料，并以2种介质的比例描述材料的破损率。该模型未考虑介质的空间分布特性以及材料参数的分布特性，2组介质不足以描述复杂非均匀地质体特征。

模拟地质体复杂内部结构的计算方法^[14]有离散元方法和有限元、离散元相结合的各种计算方法，这些方法中基本上都采用应力强度准则。没有建立和断裂力学之间的联系，集中研究宏观特性和微观颗粒相互作用模型的计算方法还不具有实用性。根本的原因在于地质尺度和微观尺度，或者说跨尺度计算的模型还有待于新的尝试。

本文的工作主要集中在建立地质尺度和缺陷尺度之间联系的计算框架，并在此框架下建立一套新的描述地质体非均匀性和渐进破坏过程的强度准则。

2 连续和非连续模型的尺度界定及其基本假设

基于连续模型的有限元或者其他的数值方法是将连续模型用单元或者网格离散。在单元尺度上，材料内部的非连续特性是借助均匀化的方法给出平均的物理量，当微裂纹和缺陷的尺度不可以忽略时，

单元尺度就不能满足连续条件。在连续模型中，裂纹尖端的应力是无限大的。而单元是平均的概念，因此，含有尖端的单元应力就自然和单元尺寸有关，单元越小应力就越大。解决问题的关键是寻求一个特征尺度，用于表述裂纹的发展。可以有2条途径：(1) 微观分析方法：划分尖端处的单元尺寸和微裂纹的尺寸相同，随机给出裂纹的分布以及缺陷之间的黏结强度；(2) 多尺度分析方法：划分含有大量裂纹的单元，给出其平均强度。单元的破裂与周围应力场的分布及更小尺度的材料特性有关。本文采用了多尺度均匀化的分析思路。

多尺度方法基于如下的假定：

(1) 单元划分基于连续介质力学模型。单元内部包含大量的微裂纹，其弹性模量和强度都是该尺度下的宏观材料特性。单元尺寸的大小取决于数学上离散网格表述连续模型的误差。基本上单元尺寸越小，精度越高。当单元尺寸再细化，研究区域内的应力场、位移场变化不大时，说明找到了单元的最大容许尺度。同一单元内部的应力相同或者与平均应力接近：在三角形和四面体单元中，应力是相等的；在四边形和六面体的等参元中，单元应力是用高斯点上的应力表示的，可以认为在高斯点代表的面积上应力是相等的。

(2) 材料内部的破坏不是一个面，而是一个层，破坏层的中性面是破坏面。破坏面的2个尺度和单元尺度相同，破坏层内是等应变的。单元界面或者单元内部的破坏面是破坏层的中性面。在假设(1)中单元应力相同、材料常数相同的条件下，单元的破坏面在单元的界面上或者是切割单元的平面内。破坏面的尺寸与单元尺寸相同，且具有相同的应变值。

(3) 破坏层的厚度与微裂纹的三维尺度有关，可以是剪切带的厚度，其长度比微裂纹的间距高一个量级。

(4) 在材料的破坏面内，材料的应变强度满足一定的分布规律。在破坏面内划分若干微单元，考虑裂纹的分布特征，每个单元内裂纹的分布不同，导致微元的整体强度不同。在破坏面的应变相同的条件下，应变强度不同的微元就不能同时破坏。破坏面的破坏过程是渐进的。

(5) 破坏面内微单元的破坏强度与更小尺度材料的结构性有关，可以通过给定位移边界条件获得。如果微单元可以由已知材料特性的最小尺度的颗粒表述，则可以完成整个多尺度的计算。如果还需要更小尺度的计算，则可以按照假设(1)进一步划分等

应力单元，进而给出破坏面和更小尺度的微单元。循环计算，直至获得已知材料特性的单元尺度。

上述假设(1)，(2)为材料特性均匀化及在单元尺度下的定义的材料参数。假设(3)，(4)为小一级尺度的材料特性。

研究区域是指研究的边界所包围的区域，对于地质灾害通常尺寸为 100~1 000 m。

最大单元尺寸：能够保证在研究区域内，位移场和应力场基本上不随网格在加密而改变的单元尺寸。边长是研究区域边长的 1/50~1/100(即 1~10 m)。

等应变破坏面：单元确定后，单元的边界面或单元破坏后的断裂面上，应变基本相等的面。三角形或者四面体单元的边界面或单元破坏后的断裂面应力处处相等；双线性单元中，高斯点所代表的面积可以认为是等应力面积。

等应变面内的微单元：在可能的破坏面上，化分若干微单元，不同微单元的强度不等。微单元的面积是代表面单元的 1/100 左右，即 0.1~1 m。

微元的厚度：微单元的厚度与破坏面的粗糙度有关，表征剪切带的宽度。该厚度可以取滑动面的厚度，或者与微单元的尺寸具有相同的量级。可以取值为 0.01~1 m。

3 多尺度计算框图

多尺度的计算主要是用于解决不同尺度下材料的破坏服从不同准则的问题。在宏观尺度下，材料特性是采用了均匀化的本构关系和强度准则。在小尺度下，材料的本构关系就不能再用均匀化的本构关系了。然而，如何界定这样的尺度，不同尺度下的本构关系怎样获得，这些仅仅用数学模型是不能够解决的，需要试验支持。这里笔者提出了一种简化的模型，试图利用试样尺度上的试验结果，通过数值模拟看到工程尺度上的破坏现象，给出定量化的表述方法；并且在更小的尺度上给出一种模型假设，使得该模型在统计意义上能够与试样尺度的试验结果吻合。

图 1 为给定单元下不同尺度的计算框图，完成这样的过程可以获得给定单元的断裂计算，是在一个尺度计算内的计算过程。图 2 为单元逐级破裂的计算过程，往复实现这样的过程，可以将计算的尺度不断缩小，直至发现宏观现象与工程吻合，给出地质体内部的破坏状态。图 3 为同一尺度内计算的

单元划分条件。

图 1 给定单元下不同尺度的计算框图
Fig.1 Computational framework for multiscale in a given element

图 2 单元逐级破裂和尺度更新计算框图
Fig.2 Computational framework for fracture of element and scale updating

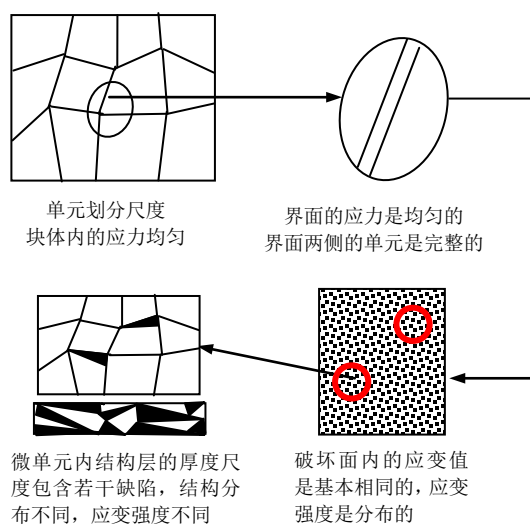


图 3 同一尺度内计算的单元划分条件
Fig.3 Condition of element division in the same scale

4 破坏面的计算模型

从上述的计算框架中，单元尺度的计算属于常规的有限元、离散元或者2种方法结合的计算。因为给定了固定的尺度，采用均匀化的模型，用宏观的参数计算。在微单元的尺度上，是按照给定边界应变获得复杂内部结构的宏观边界力的计算模型，内部结构的复杂性可以用随机的方法实现，结构之间的作用形式，要通过宏观的试验结果去反分析。关键是如何建立破坏面的计算模型，获得工程尺度、实验室尺度和更小尺度模型之间的联系。本节从均匀化的莫尔-库仑准则出发，提出了一种新的本构关系和计算模型。

莫尔-库仑强度准则为

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \tag{1}$$

式中： σ_n 为剪切面上的法向应力。

式(1)是通过试验获得的拟合曲线的表达式。试验是在给定等应力状态下，试样形成破裂面，记录了破裂时的加载应力。式(1)中引入了正压力、内摩擦角及与摩擦无关的部分。从试样内部含有微裂纹的角度来看，裂纹面上形成了破坏面后，强度应该完全服从摩擦定律，不能有 c 值；而没有断裂的部分属于弹性部分(或者细观的结合力)的破坏就不应该和摩擦力有关。事实上，试样中2种情况都有，所以，给出了这样的表达式，应该说是一个平均意义下的结果。

在破坏面内，应该将摩擦部分和非摩擦部分分开表述。式(1)中，当正压力为0或完全剪断后， c 值应该为0。反之，若没有摩擦面，内摩擦角部分的影响也应该不考虑。为此，式(1)可以表述为

$$\tau = \alpha c + (1 - \alpha) \sigma_n \tan \varphi \tag{2a}$$

其中，

$$\alpha = A_f / A \tag{2b}$$

式中： α 为单位剪切面上没有破坏的面积， A 为剪切面的面积， A_f 为没有破坏的面积。

式(2)将已经破坏产生的摩擦力与弹性部分的强度区别开来，公式不再是平均意义上的强度准则，物理上更加清楚。

c 的物理意义和确定方法。 c 值是表征材料内部的弹性部分，可以用由弹性到断裂的材料参数来表征。在有弹性常数的假设下，可以引入剪切应变强度表征 c 值。式(2)可写为

$$\tau = \alpha G \gamma_f + (1 + \alpha) \sigma_n \tan \varphi \tag{3}$$

式中： γ_f 为破坏应变。

式(3)应用了剪应变准则，如果剪应变是平均应变，达到该应变值材料就断裂，之后就转化为摩擦力；没有断就完全处在弹性状态。在节2中已经假设：在破坏面上，剪应变是常数。因此，如果式(3)中的剪应变是平均应变，该公式就只能描述脆断问题，而不能表述应变软化的规律，也不能表述材料的渐进破坏。

应变软化的物理本质。从剪切面的微元尺度上认识问题，在微元内部，含有大量的微结构。每个微元内的结构不同，即使是相同的尺寸、相同的边界条件、相同的结构缺陷和“晶体(核)”特性，表现出的强度也不会相同。因此，可以认为剪切面上，剪切强度服从某种统计规律。如果是正态分布，则有

$$\tau = \alpha G \gamma_f (\bar{\gamma}, \mu) + (1 - \alpha) \sigma_n \tan \varphi \tag{4}$$

式中： $\bar{\gamma}$ ， μ 分别为 γ 正态分布的数学期望和均方差。

假设服从均匀分布，则有

$$\tau = \alpha G \gamma_f (\gamma_{\max}, \gamma_{\min}) + (1 - \alpha) \sigma_n \tan \varphi \tag{5}$$

式中： γ_{\max} ， γ_{\min} 分别为 γ 均匀分布的最大和最小值。

事实上，式(4)，(5)建立了宏观强度与微元内部的材料结构特性之间的联系。不失一般性，讨论应变强度均匀分布模型，可以获得剪切面上的破坏面积和剪切应变之间的关系。

未破坏的面积比为

$$\alpha = \frac{1}{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}} \int_{\gamma}^{\gamma_{\max}} d\gamma = \frac{\gamma_{\max} - \gamma}{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}} \tag{6}$$

破坏的面积比为

$$1 - \alpha = \frac{1}{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}} \int_{\gamma_{\min}}^{\gamma} d\gamma = \frac{\gamma - \gamma_{\min}}{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}} \tag{7}$$

将式(6)，(7)代入式(5)，可得

$$\tau(\gamma) = \begin{cases} G\gamma & (\gamma \leq \gamma_{\min}) \\ \frac{\gamma_{\max} - \gamma}{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}} G\gamma(\gamma_{\max}, \gamma_{\min}) & (\gamma_{\min} < \gamma < \gamma_{\max}) \\ \sigma_n \tan \varphi & (\gamma > \gamma_{\max}) \end{cases} \tag{8}$$

式(8)即为考虑了剪切面内强度分布的强度准则。该准则还表述了材料的应力-应变关系。利用式(8)，给定具体的参数，在剪应变强度均匀分布下

可以得到图 4。

图 4 理论公式对应的剪应力 - 剪应变曲线

Fig.4 Shear stress-shear strain curve corresponding to theoretical formula

图 4 中曲线包括了线弹性阶段、非线性阶段、材料软化阶段和完全塑性阶段。当最大剪应变和最小剪应变相等时，可以得到脆性本构关系；当最大剪应变和最小剪应变相等，并且最大剪切强度等于正应力和摩擦系数乘积时，为理想弹塑性本构关系。

5 计算实例

采用基于连续介质力学的离散元方法 CDEM^[15-16] 可以模拟在本文假设下的本构关系。

如图 5 所示，块体中部有一结构面，现固定结构面下部分块体，给上部分块体施加均匀增大的 X 方向的位移载荷和顶面均布压力，以模拟结构面的压剪破坏。本文将研究结构面上的抗剪强度具有某种分布特征时，结构面的平均剪应力和剪应变之间的关系。该算例中，结构面的抗剪强度所对应的最大剪应变在 0.002 5~0.020 0 范围内均匀分布，即 $\gamma_{\min} = 0.002 5$ ， $\gamma_{\max} = 0.02$ 。顶面的压力为 5 MPa。其余各参数见表 1。

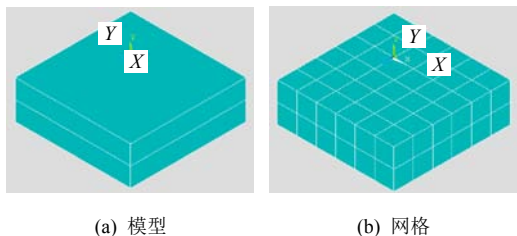


图 5 计算模型和网格
Fig.5 Computational model and mesh

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

介质	E/GPa	ν	γ_{\min}	γ_{\max}	$\phi/(\text{°})$
块体	3	0.3	-	-	-
结构层	3	0.3	0.002 5	0.02	45

结构面上剪应力 - 应变关系如图 6 所示。当 $\gamma \leq \gamma_{\min}$ 时，结构面没有出现破裂，处于弹性状态，此时， $\tau = G\gamma$ ；当 $\gamma_{\min} < \gamma \leq \gamma_{\max}$ 时，结构面开始出现局部破裂，破裂区域的作用方式转化为摩擦，未破裂的区域仍然保持弹性；当 $\gamma > \gamma_{\max}$ 时，结构面完全破裂，结构面上只剩下摩擦力的作用，即 $\tau = \sigma_n \tan \phi$ 。破坏前后的位移云图见图 7。

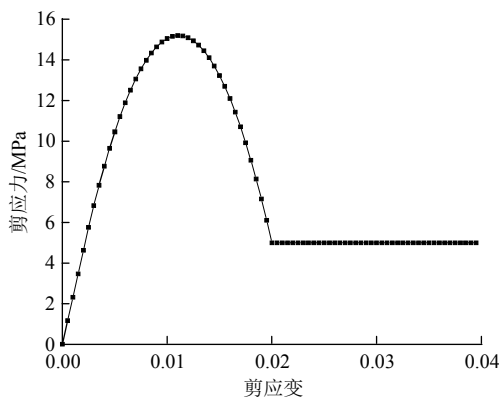
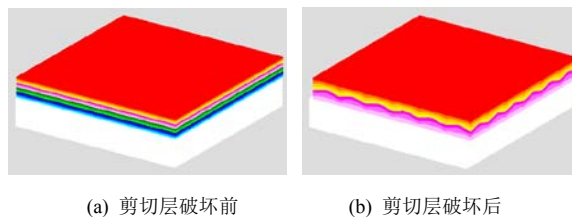


图 6 结构面上剪应力与剪应变的关系

Fig.6 Stress-shear strain relationship on structural plane



(a) 剪切层破坏前 (b) 剪切层破坏后

图 7 结构层剪坏前后的位移云图

Fig.7 Displacement nephograms before and after failure of structural plane

其他条件不变，只改变顶面的均布压力值，分析结构面的剪应力 - 剪应变关系随正应力的变化曲线，如图 8 所示。当 $\gamma \leq \gamma_{\min}$ 时，不同正应力下的剪应力 - 剪应变曲线重合，正应力的大小不影响结构层的剪应力 - 剪应变关系；当 $\gamma > \gamma_{\min}$ 时，同一剪应变 γ 所对应的剪应力 τ 会随正应力的增加而变大。

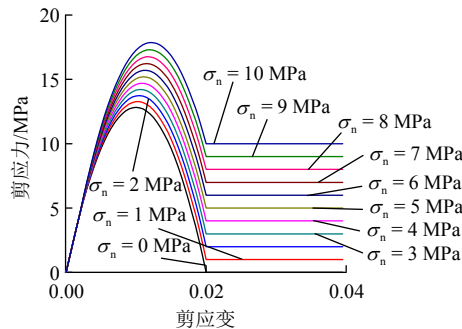


图 8 不同正应力下结构面的剪应力 - 剪应变曲线

Fig.8 Stress-shear strain curves on structural plane under

different normal stresses

当 $\gamma = \gamma_{max}$ 时，结构面上只剩摩擦力，在内摩擦角一定的情况下，结构面上的剪应力应该与正应力成正比，图 9(a)的结果也描述了这种现象。当 $\gamma_{min} < \gamma < \gamma_{max}$ ，给定 γ 值，剪应力与正应力成正比，图 9(b)的结果与式(8)吻合。图 9(c)给出了不同正应力所对应的最大剪应力，即考虑剪应变强度分布时，计算得到的结构面的抗剪强度包络线。

(a) $\gamma = \gamma_{max}$ 时

(b) $\gamma = 0.01$ 时

(c) 最大剪应力包络线

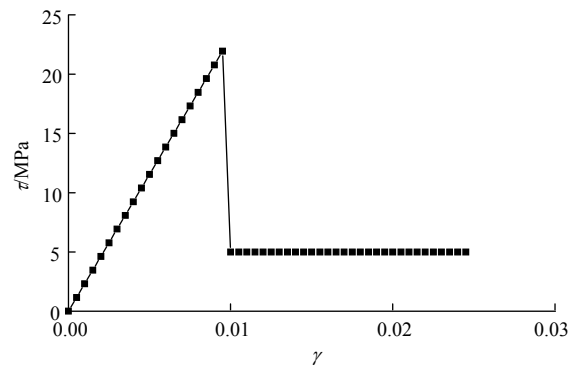
图 9 不同条件下剪应力与正应力的关系曲线

Fig.9 Relationship curves between shear stress and normal stress under different conditions

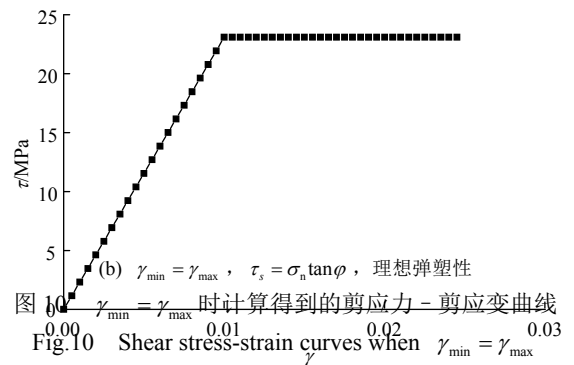
当改变剪应变强度分布，使 $\gamma_{min} = \gamma_{max}$ ，计算模型的剪应力 - 剪应变关系曲线见图 10。

图 10 表明：当最大剪应变和最小剪应变相等

时，计算得到的剪应力 - 剪应变曲线服从弹脆性本构关系；当最大剪应变和最小剪应变相等，且最大



(a) $\gamma_{min} = \gamma_{max}$, $\sigma_n = 5$ MPa, 脆性破坏



(b) $\gamma_{min} = \gamma_{max}$, $\tau_s = \sigma_n \tan \phi$, 理想弹塑性
 图 10 $\gamma_{min} = \gamma_{max}$ 时计算得到的剪应力 - 剪应变曲线
 Fig.10 Shear stress-strain curves when $\gamma_{min} = \gamma_{max}$

剪切强度等于正应力和摩擦系数乘积时，计算结果服从理想弹塑性本构关系。

6 结 论

(1) 本文建立了描述地质体破坏的多尺度计算框架，以及适用于这种多尺度模型的新的应变强度分布准则。

(2) 该模型将工程地质计算模型分为 3 个尺度：
 ① 模型的实际尺度，通常是百米到公里量级；
 ② 满足连续性计算的数学网格尺度和剪切面的尺度，通常为米的量级；
 ③ 刻画剪切面破坏的特征长度即剪切面内微单元的尺度，可以选择试验试样的尺度，通常为 0.1~1 m 的量级。不同尺度的计算先定的几何条件和物理参数的选取不同。在连续模型中，采用等应力单元；在剪切面上，给定边界应变值，剪应变强度随机；在剪切面内的微单元上，给定应变边界，获得剪切强度值。在该多尺度模型下计算地质体破坏只需采用实验室尺度下的材料强度参数，尺度易划分，参数易确定。

(3) 本文提出的剪应变强度分布破坏准则可以很好地用于该多尺度模型的计算。该强度准则以应

变作为强度指标, 定义剪应变强度在剪切面上服从某种分布, 未达到强度的部分保持线弹性, 超过强度的部分用库仑摩擦来描述, 可以自然表述材料的屈服和软化现象。当应变强度区间变化时可以得到脆断模型、软化模型以及理想弹塑性模型。在该准则下, 细观材料属性并没有改变, 只是不同状态下材料各部分作用方式发生变化, 便可自然得到复杂的宏观材料力学行为。通过离散元的算例计算, 表明该模型中将弹性材料破坏和破坏后用库仑摩擦参数分别表达是合理的。

参考文献(References):

- [1] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 16 - 19.(SUN Guangzhong. Rock structural mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1988: 16 - 19.(in Chinese))
- [2] 王仁, 黄文彬, 黄筑平. 塑性力学引论(修订版)[M]. 北京: 北京大学出版社, 2006: 133 - 136.(WANG Ren, HUANG Wenbin, HUANG Zhuping. Introduction of plasticity(revised edition)[M]. Beijing: Peking University Press, 2006: 133 - 136.(in Chinese))
- [3] 刘洪永, 程远平, 赵长春, 等. 采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 358 - 365.(LIU Hongyong, CHENG Yuanping, ZHAO Changchun, et al. Constitutive model for elastic-brittle-plastic damage of coal rock mass due to mining and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 358 - 365.(in Chinese))
- [4] 沈新普, 岑章志, 徐秉业. 弹脆塑性软化本构理论的特点及其数值计算[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1995, 35(2): 22 - 27.(SHEN Xinpu, CEN Zhangzhi, XU Bingye. The characteristics of elasto-brittle-plastic softening constitutive theory and its numerical calculation[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1995, 35(2): 22 - 27.(in Chinese))
- [5] 郑宏, 葛修润, 李悼芬. 脆塑性岩体的分析原理及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(1): 8 - 21.(ZHENG Hong, GE Xiurun, LEE C F. Analysis principle for rock mass with brittle-plasticity and its applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(1): 8 - 21.(in Chinese))
- [6] 李文婷, 李树忱, 冯现大, 等. 基于莫尔-库仑准则的岩石峰后应变软化力学行为研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1460 - 1466.(LI Wenting, LI Shuchen, FENG Xianda, et al. Study of post-peak strain softening mechanical properties of rock based on Mohr-Coulomb criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1460 - 1466.(in Chinese))
- [7] SINGH U K, DIGBY P J. A continuum damage model for simulation of the progressive failure of brittle rocks[J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(6): 647 - 664.
- [8] VÁSÁRHELYI B, BOBET A. Modeling of crack initiation, propagation and coalescence in uniaxial compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2000, 33(2): 119 - 139.
- [9] HOEK E, BIENIAWSKI Z T. Brittle fracture propagation in rock under compression[J]. International Journal of Fracture Mechanics, 1965, 1(3): 137 - 155.
- [10] ANTONIO B, EINSTEIN H. Numerical modeling of fracture coalescence in a model rock material[J]. International Journal of Fracture, 1998, 92(3): 221 - 252.
- [11] 陈瑛, 姜弘道, 乔丕忠, 等. 混凝土黏聚开裂模型若干进展[J]. 力学进展, 2005, 35(3): 377 - 390.(CHEN Ying, JIANG Hongdao, QIAO Pizhong, et al. Advances in concrete cohesive crack models[J]. Advances in Mechanics, 2005, 35(3): 377 - 390.(in Chinese))
- [12] 沈珠江, 陈铁林. 岩土破损力学——结构类型与荷载分担[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2137 - 2142.(SHEN Zhujiang, CHEN Tielin. Breakage mechanics of geomaterial——structure types and load sharing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2137 - 2142.(in Chinese))
- [13] 刘恩龙. 岩土破损力学: 结构块破损机制与二元介质模型[J]. 岩土力学, 2010, 31(增1): 13 - 23.(LIU Enlong. Breakage mechanics for geomaterials: breakage mechanism of structural blocks and binary-medium model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Supp.1): 13 - 23.(in Chinese))
- [14] 李世海, 刘天苹, 刘晓宇. 论滑坡稳定性分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增2): 3309 - 3324.(LI Shihai, LIU Tianping, LIU Xiaoyu. Analysis method for landslide stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp.2): 3309 - 3324.(in Chinese))
- [15] LI S H, ZHAO M H, WANG Y N, et al. A new numerical method for DEM-block and particle model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(3): 436 - 436.
- [16] LI S H, LIU X Y, LIU T P, et al. Continuum-based discrete element method and its applications[C]// UK-China Summer School/International Symposium on DEM. Beijing: [s.n.], 2008: 147 - 170.

地质体渐进破坏面的计算模型与剪切面破坏准则

作者: 李世海, 周东, LI Shihai, ZHOU Dong

作者单位: 中国科学院 力学研究所, 北京, 100190

刊名: 岩石力学与工程学报

ISTIC EI PKU

英文刊名: Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering

年, 卷(期): 2013(z2)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_yslxygxcb2013z2004.aspx