

裂隙岩体局部化破坏多重势面分叉模型及其应用*

刘元高 周维垣 赵吉东 杨若琼

(清华大学水利水电工程系 北京 100084)

摘要 采用多重势面弹塑性分叉理论对裂隙岩体的破坏机制进行计算模拟。基于多重势面弹塑性理论分析局部化问题,构造了适用于裂隙岩体破坏的多重势面不连续分叉模型,建立了求解局部化方向的数值方法。在有限元方法的基础上,使用该模型计算了裂隙岩体的局部化破坏条带,即主开裂条带。相关的算例分析表明,这一模型用于分析裂隙岩体的局部化破坏是有效的。

关键词 岩石力学, 裂隙岩体, 多重势面, 局部化, 不连续分叉

分类号 TU 452

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2003)03-0358-06

MULTIPLE POTENTIAL DISCONTINUOUS BIFURCATION MODEL FOR JOINTED ROCKS AND ITS APPLICATION

Liu Yuangao, Zhou Weiyuan, Zhao Jidong, Yang Ruoqiong

(Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084 China)

Abstract In the framework of the multiple potential surface elasto-plastic theory, the discontinuous bifurcation model used to simulate the failure of the jointed rocks is presented in this paper. Classical localization analysis is performed to the tangent stiffness tensor, thus the condition for discontinuous bifurcation is derived. Numerical method is formulated to calculate localization directions. With the aid of FEM, analysis is made on several corresponding specimen with initial distributed cracks under tension and compression.

Key words rock mechanics, jointed rocks, multiple potential surface, localization, discontinuous bifurcation

1 引言

损伤局部化现象是岩土类材料和结构破坏的开始,局部化问题的特征在于局部化区域变形率场的突变。当局部化带在弹塑性材料中出现时,这样的突变往往集中在一个很窄的条带内,也就是局部化条带。局部化条带与未发生局部化的区域的交界面两侧会发生变形率场的突变,这一交界面就是奇异面。在分析局部化问题时,奇异面是一个重要的概念。奇异面上的变形场的突变可以当作分叉问题来处理^[1, 2]。奇异面上发生的分叉不仅包括变形梯度速率,还包括变形速率。文[3]从材料的特征切线模

量张量的分析入手,根据特征切线模量的特征问题的频谱特性,给出了局部化分叉方向和硬化模量的解析解。文[4]曾就混凝土的局部化现象进行物理和数值分析,给出了一个解析方法的模型。在局部化分叉的理论分析和试验研究方面,近年来取得了很大进展^[5~8]。

在岩体中,由于分布裂隙组的大量存在,使得岩体在发生破坏时往往与裂隙构造有很大关系。不同的裂隙结构面常常出现不同的破坏面,但是岩体的最终破坏往往是沿一个局部化破坏条带进行的。岩石类准脆性材料的破坏往往包括线弹性、非线性强化、应力跌落和应变软化4个阶段,从微观角度来看,这4个阶段分别对应于该类材料中的微裂纹

2001年8月10日收到初稿,2001年9月25日收到修改稿,2002年6月23日收到改定稿。

* 国家自然科学基金重点资助项目(59939190)和Sohlumberger BGC资助项目。

作者 刘元高 简介:男,24岁,1998年毕业于清华大学水利系,现为清华大学水利系博士研究生,主要从事岩石破坏方面的研究工作。

的弹性变形、稳定扩展、失稳扩展和汇合等细观机制^[9]。在大型岩石工程中，微裂纹在荷载作用下的变形、扩展和汇合往往导致结构中主裂纹的出现，从而造成工程结构的破坏。采用多重势面理论可以很好地模拟裂隙岩体在加载过程中裂隙的发展、汇合直到主裂纹的贯通，并最终表现为一个局部化的条带。

在岩土材料中，岩土的体积塑性应变不但在三向压缩下产生，而且在剪切时也会产生；切应变不但在剪切时产生，而且在静水压力下也会产生。为了更精确地描述土的复杂性质，早在 20 世纪 70 年代就有人提出了采用两个屈服面的理论^[10~12]；80 年代以来，又提出了部分屈服和多重屈服面的概念^[13, 14]。而文[15]则从数学角度出发，提出了建立土体本构模型的数学理论，用坐标变换和矢量拟合的方法提出了广义塑性理论或多重势面理论。本文基于多重势面理论框架，分析了裂隙岩体的局部化分叉现象，给出裂隙岩体发生局部化分叉时的判断条件，并建立了用于求解局部化分叉的方向的数值方法；在单元分析中则引入非连续变形模式来模拟单元局部化变形^[16, 17]。这一模型由于直接从多重势面理论得出，在模拟具有复杂性质的裂隙岩体方面，具有更强的适用性。基于有限元方法的算例分析表明，采用多重势面理论的局部化分叉条件来分析裂隙岩体的局部化破坏现象是有效的。

2 裂隙岩体弹塑性多重势面理论

2.1 多重势面理论

裂隙岩体在发生变形时，由于材料内部广泛分布的微裂隙和微孔洞的存在，使得岩体的变形特征与金属材料有明显的不同，这里引入多重势面理论进行计算分析。在经典的弹塑性力学中，应力增量可以表示为

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl}^e (d\varepsilon_{kl} - d\varepsilon_{kl}^p) \quad (1)$$

式中： D_{ijkl}^e 为弹性刚度张量， $d\varepsilon_{kl}$ 和 $d\varepsilon_{kl}^p$ 分别为总应变增量和塑性应变增量。

多重势面理论认为，利用应力增量张量 $d\sigma_{ij}$ 和应变张量 $d\varepsilon_{ij}$ 的对称性，可以将塑性应变增量的 3 个主应变分量 $d\varepsilon_i^p$ ($i = 1, 2, 3$) 看作为一个三维矢量 $d\varepsilon^p$ 的 3 个分量，从而可以利用矢量拟合的方法，用任意 3 个线性无关的三维矢量的线性组合来唯一地表示，而线性无关的矢量则可以选择为 3 个线性无关的势函数的梯度矢量。对于 3 个势函数(对应于

常规弹塑性理论的屈服函数) φ_i ($i = 1, 2, 3$)，选取时要求其梯度线性无关，即

$$d\varepsilon_i^p = \sum_{k=1}^3 d\lambda_k \frac{\partial \varphi_k}{\partial \sigma_i} \quad (2)$$

在一般的坐标系空间中，可以得到其一般坐标空间上的张量形式：

$$d\varepsilon_{ij}^p = \sum_{k=1}^3 d\lambda_k \frac{\partial \varphi_k}{\partial \sigma_{ij}} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)可得塑性加载时弹塑性本构关系的表达式：

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl}^e (d\varepsilon_{kl} - d\varepsilon_{kl}^p) = D_{ijkl}^e \left(d\varepsilon_{kl} - \sum_{m=1}^3 d\lambda_m \frac{\partial \varphi_m}{\partial \sigma_{kl}} \right) \quad (4)$$

取用如下的屈服面硬化规律：

$$\psi_k(\sigma_{ij}, H) = 0 \quad (k = 1, 2, 3) \quad (5)$$

$d\lambda$ 可以通过一致性条件得到，一致性条件可以表达为

$$d\psi_k = \frac{\partial \psi_k}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} + \frac{\partial \psi_k}{\partial H} dH = 0 \quad (k = 1, 2, 3) \quad (6)$$

$$d\lambda_m = A_{mn}^{-1} \frac{\partial \psi_n}{\partial \sigma_{ij}} D_{ijkl}^e d\varepsilon_{kl} \quad (7)$$

式中： $A_{mn} = -\frac{\partial \psi_m}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial \sigma_{ij}} \frac{\partial \varphi_n}{\partial \sigma_{ij}} + \frac{\partial \psi_n}{\partial \sigma_{ij}} D_{ijkl}^e \frac{\partial \varphi_n}{\partial \sigma_{kl}}$ ； H_m 为硬化参量，可以根据相应的硬化律求解。

这样，材料满足的增量本构关系 $d\sigma_{ij} = D_{ijkl}^e \varepsilon_{kl}$ 中， D_{ijkl} 可以表示为

$$D_{ijkl} = \begin{cases} D_{ijkl}^e & \text{弹性} \\ D_{ijkl}^e - D_{ijqr}^e \frac{\partial \varphi_m}{\partial \sigma_{qr}} A_{mn}^{-1} \frac{\partial \psi_n}{\partial \sigma_{st}} D_{stkl}^e & \text{塑性} \end{cases} \quad (8)$$

采用如下多重势面的加载准则：

$$\max(\bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2, \bar{\varphi}_3) \begin{cases} > 0 & \text{加载} \\ = 0 & \text{中性变载} \\ < 0 & \text{卸载} \end{cases} \quad (9)$$

式中： $\bar{\varphi}_k = \frac{\partial \varphi_k}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij}$ ， $k = 1, 2, 3$ 。

2.2 裂隙岩体的多重势面理论

在岩石中，由于存在大量裂隙，因而岩石工程在发生破坏时与裂隙构造有关，破坏时常常会沿已经存在的裂隙发生剪切错动或拉裂等扩展现象。若干水工结构的破坏证实了这一点，比如法国的玛尔帕赛拱坝，就是由基岩中的多组初始裂隙扩展造成

的。同样，在裂隙岩石或其他有初始裂隙的脆性试件的试验中也可以观察到同样的现象。据此，可以认为裂隙岩体在发生屈服破坏时都将沿初始的裂隙面进行。设岩石内存在的初始裂隙可以概化为3组法向单位矢量为 $\mathbf{v}^{(k)}$ ($k=1, 2, 3$) 的裂隙组。工程地质上的3要素，即走向、走向角 α 、倾角 β 与球坐标的 θ ， φ 之间存在如下的关系：

$$N\alpha E \begin{cases} SE & \beta: \varphi = 180 - \alpha, \theta = 180 - \beta \\ NW & \beta: \varphi = 180 - \alpha, \theta = \beta \end{cases} \quad (10a)$$

$$N\alpha W \begin{cases} SE & \beta: \varphi = \alpha, \theta = 180 - \beta \\ NE & \beta: \varphi = \alpha, \theta = \beta \end{cases} \quad (10b)$$

上两式中：角度单位为($^{\circ}$)。通过以上两式，可以根据概化节理组的平均走向角 α 和倾角 β ，得出球坐标下的平均单位法向矢量 \mathbf{v} 。

采用多重势面理论可以反映裂隙岩体在发生局部化破坏时表现出的多重屈服面性质。对于二维问题，本文中势函数的个数 k 从1到2。这一模型对应于双屈服面模型，此时，单轴压缩试件的破坏模式示意图1。对于三维情况，试件的破坏模式参见图2。

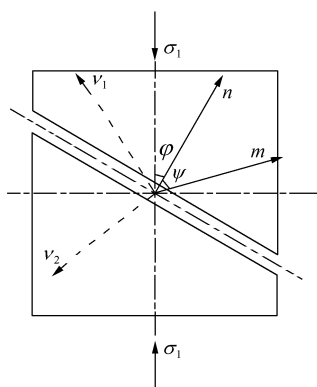


图1 单轴压缩试件的破坏模式

Fig.1 Failure mode of specimen in uniaxial compression

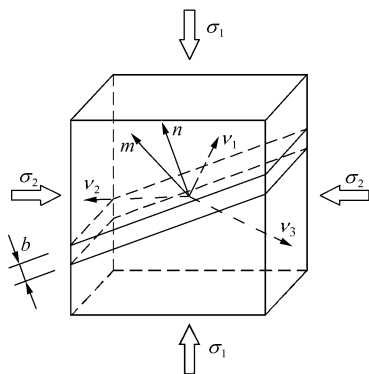


图2 三维试件的破坏模式

Fig.2 Failure mode of 3-D specimen

对于3组裂隙，一般可以采用常用的 Rankine 准则或莫尔-库仑准则。如果采用 Rankine 准则，势函数如下所示：

$$\varphi_k = \sigma_1^{(k)} - \sigma_i^{(k)} = 0 \quad (k=1, 2, 3) \quad (11)$$

如果采用常用的莫尔-库仑准则，针对不同的节理组可以采用不同的粘聚力和摩擦系数。也就是说，势函数如下：

$$\varphi_k = f_k \sigma^{(k)} + c_k - \tau^{(k)} = 0 \quad (k=1, 2, 3) \quad (12)$$

上述两式中： $\tau^{(k)} = \sqrt{\sigma_{ij}^{(k)} \sigma_{ij}^{(k)} - (\sigma^{(k)})^2}$ ； $\sigma^{(k)} = \mathbf{v}_i^{(k)} \cdot \sigma_{ij} \mathbf{v}_j^{(k)}$ ， $\sigma_i^{(k)} = \sigma_{ij} \mathbf{v}_j^{(k)}$ ，这几个量是应力在裂隙面方向上的投影； f_k 和 c_k 分别为对应于第 k 个屈服面的摩擦系数和粘聚力。将对应于各组裂隙的屈服函数的表达式代入式(9)可以得到相应的加卸载条件。代入式(8)可以得到相应时刻的切线刚度张量。

3 局部化分叉分析

3.1 局部化分叉的条件

裂隙岩体内出现局部化带时，表现为特征切线刚度张量出现奇异。利用这一特点可以分析裂隙岩体中的局部化分叉条带；假定现时的准静平衡态可以由连续的位移 u_i 、应力 σ_{ij} 和应变 ϵ_{ij} 来表征；继续加载时，位移率 \dot{u}_i 和位移率的梯度 $\dot{u}_{i,j}$ 的非连续分叉就可能在体内一奇异面 Ω 上发生，用法向单位矢量 n_i 来表征奇异面 Ω 的方向， x_i 来表示沿 Ω 的位置矢量，在奇异面 Ω 的两侧，位移场保持连续；而位移场的梯度则会出现不连续的跳跃，即

$$[\dot{u}_{i,j}] = u_{i,j}^+ - u_{i,j}^- \neq 0 \quad (13)$$

式中： $[\dot{u}_{i,j}] = \frac{\partial [\dot{u}_i]}{\partial x_j}$ ，“+”表示不连续奇异面的正侧，“-”表示其负侧。根据 Maxwell 相容性条件，要使得上述不连续跳跃成立，位移率梯度必须满足如下形式：

$$[\dot{u}_{i,j}] = c_i n_j \quad (14)$$

式中： c_i 为待求矢量。根据变形的几何关系，在小变形情况下，可以得到如下的应变率场：

$$[\dot{\epsilon}_{ij}] = \frac{1}{2} (c_i n_j + c_j n_i) \quad (15)$$

如果定义沿矢量 c_i 的方向的单位矢量 m_i 如下式：

$$m_i = \frac{c_i}{|c|} \quad (16)$$

则向量 \mathbf{n} 和 \mathbf{m} 就定义了不连续的位移率梯度场的特征方向。对于两种极端情况可以说明如下：

(1) 如果 $\mathbf{m} \cdot \mathbf{n} = 0$ ，表征材料在单剪情况下的变形模式，此时表现为材料的局部化剪切带破坏模式；

(2) 如果 $\mathbf{m} \cdot \mathbf{n} = 1$ ，表示出现的局部化带沿不连续奇异面垂直的方向发展，在特定的条件下可以表示材料的受压劈裂模式。

考虑到平衡条件，通过奇异面 Ω 的应力率是连续的，所以有

$$[\dot{\sigma}_{ij}]n_j = 0 \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (17)$$

由式(8)给出的切线刚度张量 D_{ijkl} 在奇异面 Ω 的两侧取相同的值，利用对称性，由式(8)，(15)和(16)可以得到

$$n_j D_{ijkl} n_k m_i = 0 \quad (18)$$

定义特征切线刚度张量 $\mathbf{T} = T_{ii}(\mathbf{n}) = n_j D_{ijkl} n_k$ ，式(18)就成为

$$T_{ii}(\mathbf{n})m_i = 0 \quad (19)$$

局部化分叉发生的条件就是在变形历史中存在式(19)的非零解，问题就转化成求解张量 T_{ii} 的零特征值问题，局部化的条件就成为

$$f(\mathbf{n}) = \det[T_{ii}(\mathbf{n})] \quad (20)$$

3.2 局部化分叉的数值算法

式(20)要从解析角度给出其解析解是非常困难的。在一些特定的简单情况下，文[3]所讨论的情况才有可能。下面讨论如何求其数值解，以得到表征局部化分叉方向的单位向量 \mathbf{m} 和 \mathbf{n} 的值。对于各向同性弹性材料，由于 $D_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu(\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk})$ ，函数 $f(\mathbf{n})$ 成为如下的简单形式：

$$f(\mathbf{n}) = (\lambda + 2\mu)\mu^2 \quad (21)$$

式中： λ 和 μ 为 Lamé 常数。此时 $f(\mathbf{n})$ 满足 $f(\mathbf{n}) > 0$ 而且与向量 \mathbf{n} 无关，也就是各向同性弹性材料不会发生局部化分叉现象。但是随着荷载的增加，材料性质劣化，材料丧失了各向同性弹性的性质，此时必然伴随着函数 $f(\mathbf{n})$ 随荷载的增加而减少，直至 $f(\mathbf{n})$ 等于零甚至出现负值，这就意味着局部化的发生。显然，在具有裂隙的岩石材料中，式(21)中的 λ 和 μ 仅代表初始加载时刻材料的 Lamé 常数。

为了得到发生局部化分叉发生的条件，求解式(21)的问题实际上就转化成下面的约束非线性规划问题：

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{n}) &= \det[T_{ii}(\mathbf{n})] \\ \text{s.t.} \quad &|\mathbf{n}| = 1 \end{aligned} \quad (22)$$

式中： $T_{ii}(\mathbf{n})$ 为当前时刻的切线刚度张量。

对式(22)中所示的非线性规划问题，采用 Langrange-Newton 方法，该问题可以变成如下等价形式的特征方程^[18]：

$$\nabla f(\mathbf{n}) - \nabla |\mathbf{n}|^2 \Lambda = \nabla f(\mathbf{n}) - 2\Lambda \mathbf{n}_i = 0 \quad (23)$$

式中： Λ 为 Langrange 乘子。

将函数 f 的表达式代入，并定义 $S_{ii}(\mathbf{n}) = \det(\mathbf{T}(\mathbf{n})) \cdot D_{ijkl} T_{kj}^{-1}(\mathbf{n})$ ，式(23)可以表示为如下的简单形式：

$$S_{ii}(\mathbf{n})\mathbf{n}_i - \Lambda \mathbf{n}_i = 0 \quad (24)$$

至此，可以构造如下的算法来得到式(24)的解：

(1) 为求解方便，将方向向量 \mathbf{n} 表示成球坐标下的量，也就是 $\mathbf{n} = (\cos \phi \cos \theta, \cos \phi \sin \theta, \sin \phi)$ 。这样就可以在 (ϕ, θ) 的变化范围 $[0, 2\pi] \times [0, 1/2\pi]$ 上按照一定的间隔(比如以 5° 为间隔)取值，求出对应于 λ 的最小值的矢量 $\mathbf{n}^{(0)}$ 作为近似的初始值。

(2) 使用上述初始值作为迭代求解的初值。可以按照如下方程进一步迭代求解：

$$S_{ii}(\mathbf{n}^{(k)})\mathbf{n}_i^{(k+1)} - \Lambda^{(k+1)}\mathbf{n}_i^{(k+1)} = 0 \quad (25)$$

根据第 k 步迭代得出的结果 $\mathbf{n}^{(k)}$ ，每次都可以重新计算张量 $\mathbf{S}(\mathbf{n}^{(k)})$ 的值，代入式(25)可以解出其最小的特征向量，该特征向量即作为下一次迭代计算的 $\mathbf{n}^{(k+1)}$ 。这样，可以在两次迭代结果的误差达到精度要求时停止。

一旦得出向量 \mathbf{n} 的值，也就是得出了发生不连续的局部化分叉的方向，相应的向量 \mathbf{m} 即可通过求解式(19)得出。

3.3 单元分析的有限元格式

在进行有限元分析时，采用了如下所示的位移插值形式，可以反映局部化发生后单元内位移的不连续：

$$\boldsymbol{\varepsilon} \approx \mathbf{B}d + \mathbf{G}e \quad (26)$$

式中： \mathbf{B} 为标准的应变插值矩阵(包含形函数的导数)； \mathbf{G} 分别为包含位移、应变不连续变形模式的附加插值矩阵； d 和 e 分别为反映结点位移和增加的应变模式的自由度。

通过运算，可以将单元内部包含不连续变形模式的增量形式的本构方程简化成如下形式：

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{bb} & \mathbf{K}_{bg} \\ \mathbf{K}_{gb} & \mathbf{K}_{gg} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d \\ e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{f}}_{\text{int}} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (27)$$

式中： $\mathbf{K}_{bb} = \int_{V_c} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV$ ， $\mathbf{K}_{bg} = \int_{V_c} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{G} dV$ ， $\mathbf{K}_{gb} = \int_{V_c} \mathbf{G}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV$ ， $\mathbf{K}_{gg} = \int_{V_c} \mathbf{G}^T \mathbf{D} \mathbf{G} dV$ ， $\dot{\mathbf{f}}_{\text{int}}$ 为单元的外力

率。如果其中的矩阵 K_{gg} 非奇异，可以通过静力凝聚方法^[15, 16]消去 $\dot{\epsilon}$ ，得到如下的单元刚度矩阵：

$$K = K_{bb} - K_{bg} K_{gg}^{-1} K_{gb} \quad (28)$$

当 D 对称时，刚度矩阵也对称，此时的有限元基本方程可很容易改写为著名的 \bar{B} 形式。将式(26)代入式(27)的应变率形式：

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon} &\approx B\dot{d} + G\dot{\epsilon} = B\dot{d} - GK_{gg}^{-1}K_{gb}\dot{d} = \\ &(B - GK_{gg}^{-1}K_{gb})\dot{d} \equiv \bar{B}\dot{d} \end{aligned} \quad (29)$$

上式中定义的 \bar{B} 就是著名的 \bar{B} 矩阵。相应的单元刚度矩阵可直接通过计算改写为

$$K = \int_{V_e} \bar{B}^T D \bar{B} dV \quad (30)$$

上面推导中， D 是当前状态的切线刚度张量。以上得出了局部坐标下的单刚矩阵的计算方法，通过单刚集成可以得到结构的总刚矩阵。

在有限元分析中，超过势函数的应力增量则转化成单元内的不平衡节点力转移，各级荷载进行迭代计算。使用前述的局部化分叉发生的条件进行判断，如果发生了局部化分叉，则采用数值方法得出其方向，并在单元内采用上述包含非连续变形模式的插值函数，否则使用常规的有限元插值模式。

4 算例分析

本文的算例将分析有初始缺陷的裂隙岩石试件，试件尺寸为 1 000 mm×1 500 mm，网格剖分为 100×120，在单轴或者双向受荷载时分析发生的局部化破坏现象。试件中存在着随机分布的均匀的初始裂隙，概化裂隙组的方向特征则根据随机分布的裂隙通过式(10a、b)计算得出。材料参数取为：初始弹模 $E = 30$ GPa，泊松比 $\mu = 0.2$ 。根据文中提出的多重势面理论的模型，为简单起见，只选用下列势函数进行计算模拟：

$$\varphi_k = \sigma_1^k - \sigma_2^k = 0 \quad (k = 1, 2) \quad (31)$$

$$\varphi_k = f_k \sigma_1 + c_k - \tau^k = 0 \quad (k = 1, 2) \quad (32)$$

势函数参数为 $\sigma_1^1 = 3.36$ MPa， $\sigma_1^2 = 3.60$ MPa， $f_1 = \tan 30^\circ$ ， $f_2 = \tan 35^\circ$ ， $c_1 = 0.80$ MPa， $c_2 = 0.90$ MPa。

通过几种不同加载方式的对比，说明了不同的荷载条件下试件不同的局部化破坏模式。对同样的试件，采用横行和纵向的加载比例。图 3 是计算采用的初始网格形式，图 4~6 分别为试件承受两方向

拉伸时的局部化破坏模式。加载时采用位移限制加载，其纵向和横行的位移之比 U_v/U_h 分别为 1/0，5/1 和 1/1，从中可以看出，荷载比例不同时局部化破坏模式的区别，特别是局部化条带方向的差别。如果采用压缩加载方式，同样采用位移之比为 -1/0，-5/-1 和 -1/-1，仅当 U_v/U_h 之比为 -1/0 时，出现了如图 7 所示的局部化现象。另外各加载比例没有看到局部化破坏现象。这一结果与相关的试验结果是吻合的^[19]。

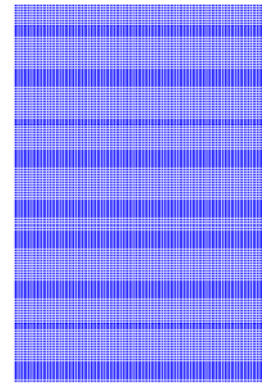


图 3 裂隙试件的网格形式
Fig.3 FEM mesh

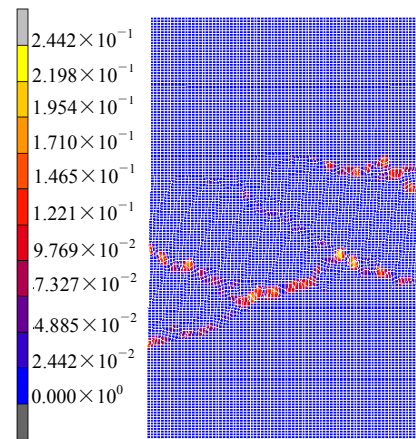


图 4 $U_v/U_h=1/0$ 时局部化变形结果
Fig.4 Localization results for $U_v/U_h=1/0$

5 结 论

本文在多重势面弹塑性理论框架下，采用不连续分叉方法分析裂隙岩体的损伤局部化破坏现象，并建立了多重势面下不连续分叉的分析方法。通过对裂隙岩体的特征切线刚度张量的特征值分析，采用数值方法，可以得出裂隙岩体发生局部化破坏时的破坏模式和局部化方向。在有限元分析程序中进行

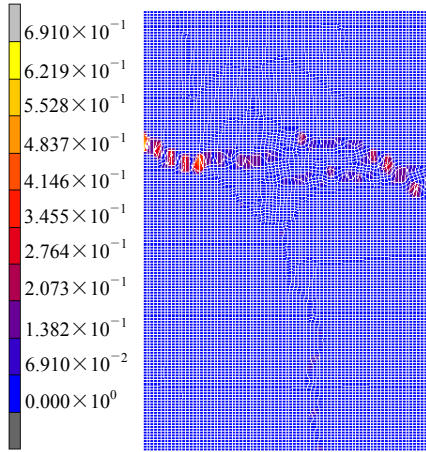


图 5 $U_v/U_h = 5/1$ 时局部化变形结果
Fig.5 Localization results for $U_v/U_h = 5/1$

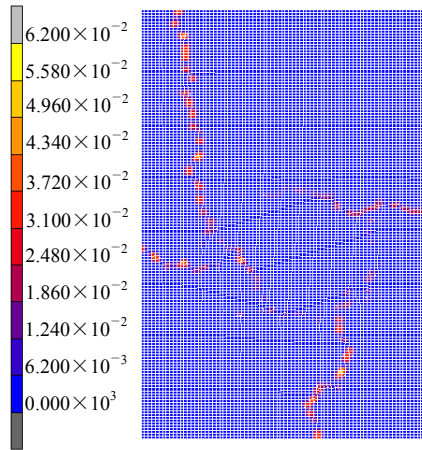


图 6 $U_v/U_h = 1/1$ 时局部化变形结果
Fig.6 Localization results for $U_v/U_h = 1/1$

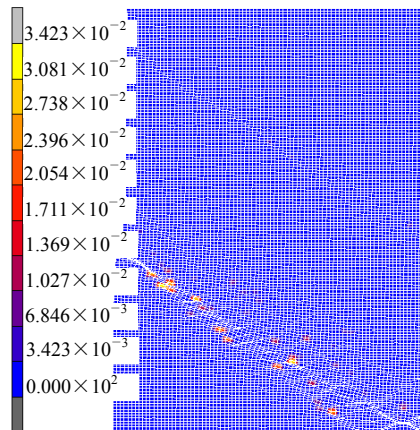


图 7 $U_v/U_h = -1/0$ 时局部化变形结果
Fig.7 Localization results for $U_v/U_h = -1/0$

行一定的改造,增加了求解多重势面的特征切线刚度张量,使用数值迭代算法得出了发生局部化的方向。对二维拉压试件的分析表明,该分析模型用于裂隙岩体的局部化破坏分析是有效的。

参考文献

- 1 Rudnicki J W, Rice J R. Conditions for the localization of deformation in pressure-sensitive dilatant materials [J]. *J. Mech. Phys. Solids*, 1975, 23(6): 371~394
- 2 Hill R, Hutchinson J W. Bifurcation phenomena in the plane tension test [J]. *J. Mech. Phys. Solids*, 1975, 23(4): 239~264
- 3 Ottosen N S, Runesson K. Properties of discontinuous bifurcation solutions in elasto-plasticity [J]. *Int. J. Solids Structures*, 1991, 27(4): 401~421
- 4 Ortiz M. An analytical study of the localized failure modes of concrete [J]. *Mechanics of Materials*, 1987, 6(2): 159~174
- 5 Chau K T, Rudnicki J W. Bifurcation of compressible pressure-sensitive materials in plane strain tension and compression [J]. *Transactions of the ASME, J. Mech. Phys. Solids*, 1990, 38(6): 875~898
- 6 Chau K T. Anti-symmetric bifurcation in a compressible pressure-sensitive circular under axisymmetric tension and compression [J]. *J. Appl. Mech.*, 1993, 60(2): 282~289
- 7 Murota K, Ikeda K, Terada K. Bifurcation mechanism underlying echelonmode formation [J]. *Comput. Methods Appl. Engrg.*, 1999, 107(3~4): 423~448
- 8 徐松林, 吴文, 李廷等. 三轴压缩大理岩局部化变形的试验研究及其分岔行为[J]. *岩土工程学报*, 2001, 23(3): 296~301
- 9 余寿文, 冯西桥. *损伤力学*[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996
- 10 Prvcost J H, Hoeg K. Effective stress-strain model for soils[J]. *J. Geot. Eng. Div., ASCE*, 1975, 101(3): 305~314
- 11 Lade P V. Elasto-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surface[J]. *Int. J. Solids and Structures*, 1977, 13(11): 892~907
- 12 Seiki Ohmaki. A mechanical model for the consolidated cohesive soil [J]. *Soils and Foundations*, 1979, 19(3): 248~256
- 13 沈珠江. 土的重屈服面应力-应变模式[J]. *固体力学学报*, 1984, 5(2): 163~174
- 14 殷宗泽. 一个土体的双屈服面应力-应变模型[J]. *岩土工程学报*, 1988, 10(4): 64~71
- 15 杨光华. 土的本构模型的数学理论及其应用[博士学位论文][D], 北京: 清华大学, 1998
- 16 Ortiz M, Leroy Y, Needleman A. A finite element method for localized failure analysis [J]. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 1987, 61(2): 189~214
- 17 Jirásek M. Comparative study on finite elements with embedded discontinuities [J]. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 2000, 188(1~3): 307~330
- 18 袁亚湘. *非线性规划数值方法*[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1993
- 19 Robinson G S. Behavior of concrete in biaxial compression [J]. *J. Struct. Div., ASCE*, 1967, 93(2): 71~78