

文章编号：1006-6616(2001)02-0139-05

# 孔隙流体对岩体变形局部化的影响 及数值模拟研究

王学滨<sup>1</sup>，潘一山<sup>1</sup>，丁秀丽<sup>2</sup>，盛 谦<sup>2</sup>

(1. 辽宁工程技术大学力学系，辽宁 阜新 123000；

2. 长江科学院岩基所，湖北 武汉 430007.)

**摘 要：**本文首先叙述了孔隙流体对固体变形局部化影响的若干研究进展，并利用三维连续体快速拉格朗日分析，模拟了孔隙压力对岩体变形局部化应变场（剪切带）的影响。数值模拟结果表明，孔隙压力对变形局部化应变场有较大影响，随着孔隙压力的增加剪切带趋于不明显，岩体试件倾向于发生拉伸破坏。

**关键词：**岩体；流体；变形局部化；剪切带；孔隙压力

中图分类号：TU451

文献标识码：A

## 0 引言

近年来，在非线性固体力学的研究中，局部化、分叉、稳定性和剪切带等问题已成为研究的热点之一。国际上对变形局部化的研究相当活跃，目前国内开展这方面的研究工作还较少。局部化现象是材料不稳定性的表现形式，是材料破坏的先兆，在金属材料、复合材料和岩土材料中都可以观测到<sup>[1]</sup>；局部化现象不仅存在于单相的材料中，而且在被多相流体饱和的多孔介质岩土材料以及由这些材料组成的结构中也广泛存在，流固耦合的局部化问题和单相固体的局部化问题相比，有着更广阔的工程应用前景和更大的实际意义。如：水电洞室岩爆、煤和瓦斯突出、边坡滑坡、油井抽注水、地震及砂土液化等，这些在能源的开发和利用中经常发生的自然灾害无一不涉及流体和固体的耦合作用问题，孔隙流体存在与否对固体变形和应力场有较大的影响，有时甚至起着决定作用，所造成的自然灾害也是单相固体不可比拟的。仅以煤和瓦斯突出为例，煤和瓦斯突出时抛出煤炭可以高达12780吨，煤体最远可被抛出近千米。这些自然灾害严重影响了能源工业的正常健康发展，采用变形局部化的数值模拟研究，可望对这些灾害的机理分析和控制提供新的思路<sup>[2-4]</sup>。

收稿日期：2001-03-11

基金项目：2000年国家教委骨干教师项目“地震及水渗流作用下大型岩体工程稳定性研究”

作者简介：王学滨（1975—），男，辽宁工程技术大学力学系助教，硕士，现从事岩石力学理论研究与岩土工程的数值计算工作。

# 1 孔隙流体对固体变形局部化影响的研究进展

Loret, B. 等假设固体正向扩容, 对流体饱和的多孔介质的平面应变问题进行了应变局部化的动态数值模拟<sup>[5]</sup>。认为流体的渗透率较高时, 允许固体和流体的扩散运动, 因此剪切带得以充分发展; 相反, 低渗透率流体使得液固两相被束缚在一起, 从而阻止了剪切带的充分发展。Larsson, R. 等认为, 流体的压缩模量较小时 (对应于排水情况), 固体具有强烈的局部变形; 反之, 则没有局部化现象<sup>[6]</sup>。Oka, F. 等对水饱和的粘土进行了准静态分析, 且仅考虑固体的负向扩容。数值模拟结果表明, 流体具有低渗透率时, 固体应变局部化强烈集中; 反之, 则应变局部化没有低渗透率时明显<sup>[7]</sup>。这一观点与 Loret, B. 等的结论相反。Hongwo, Z. 等认为, 低渗透率时局部化区宽度较大; 高渗透率时局部化区宽度较小<sup>[8]</sup>, 并研究了轴向压缩的一维土杆, 得出了随着渗透率的降低, 塑性区增加<sup>[9]</sup>。对矩形剖面的平面应变地质体的数值模拟研究表明, 塑性区面积随渗透率的降低而增加, 直到发展至整个矩形剖面。由模拟结果还可看出, 塑性区面积增加, 应变局部化不明显; 剪切带的倾角在渗透率较低时较大。Xiaobing, L. 等研究了饱和土体的剪切带演化规律, 得出剪切带的宽度随孔隙压力 (剪切带中心处) 的增加而减小, 孔隙压力的扩散逐渐引起剪切带的扩容<sup>[10]</sup>。Bauer, E. 等对平面应变的双轴压缩试样进行了分析, 得出剪切带的倾角 (和最小主应力方向) 随着初始孔隙率和压力的增加而减小; 最小主应力增加, 倾角变小<sup>[11]</sup>。Larsson, J. 等对平面应变的高陡边坡进行了数值模拟, 得出在全球排水条件下, 边坡坡面上的水压力的增加对整个边坡的变形模式影响不大; 在局部排水条件下, 随着渗透率的降低沿着剪切带滑动的块体的内切圆的半径加大, 且流体流向剪切带, 这是由于剪切带扩容, 从而引起了在剪切带内部流体压力降低<sup>[12]</sup>。流体运动的这一现象与 Loret, B. 等的模拟结果一致, 而与 Oka, F. 等的模拟结果相反。

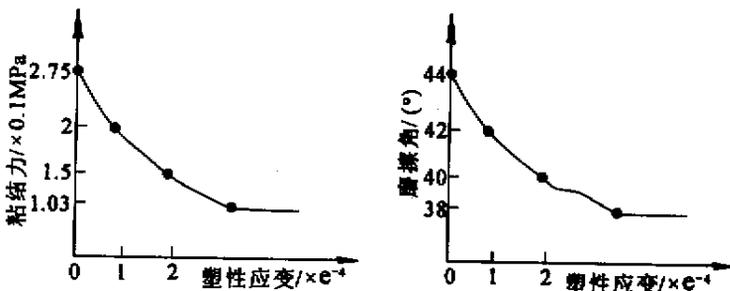


图 1 粘结力、摩擦角与塑性应变的关系

Fig.1 The relationship of cohesive force, frictional angle and plastic stain

# 2 力学模型及计算方案

取岩体试件长为 0.05m, 宽为 0.01m, 高度为 0.1m, 建立坐标系如图 2 所示。在上、下两端面施加压向岩体的常速度  $v$  (即位移边界条件), 端面加载速度为  $1.5 \times 10^{-8}$  m/s; 在前、

后两平面施加法向约束，由于岩体试件宽度较小，试件的受力状态近似于平面应变状态。网格形状为正方体，正方体边长为  $0.0025\text{m}$ 。在上、下两端面岩石质点仅允许有  $z$  方向位移，这适于模拟试件端面与压板之间摩擦力较大的情况。岩体的本构关系采用莫尔-库伦应变软化模型，屈服准则采用莫尔-库伦与拉破坏准则的复合准则。岩体试件体积模量为  $1.5 \times 10^4 \text{MPa}$ ，剪切模量为  $1.1 \times 10^4 \text{MPa}$ ，初始粘结力为  $0.272 \text{MPa}$ ，初始摩擦角为  $44^\circ$ ，抗拉强度为  $0.2 \text{MPa}$ ；粘结力、摩擦角与塑性应变的关系见图 2。每个单元均为正方体，试件的两个侧面的孔隙压力设置为零。

为初步模拟孔隙压力对变形局部化应变场的影响，取 6 种计算方案，岩体试件内的孔隙压力分别为： $P = 0, 0.1, 0.15, 0.17, 0.2$  和  $0.3 \text{MPa}$ 。数值计算时，动态监测上端面中点的应力 ( $\sigma_z$ ) 随加载时间步 ( $t$ ) 的关系， $\sigma_z$  愈软化，岩体试件剪切变形愈向某一区域 (试样中部 X 形区域) 强烈集中，剪切带渐趋稳定。当  $\sigma_z$  软化到接近岩石试样残余强度，岩体试件剪切变形局部化，依次记录此时的剪切应变率场如图 3 所示 (从左至右孔隙压力增加)； $P = 0$  时的固体速度场和位移场如图 4 所示； $P = 0.3 \text{MPa}$  时的固体速度场如图 5 所示； $P = 0$  和  $0.17 \text{MPa}$  时的  $\sigma_z - t$  的关系如图 6 所示。

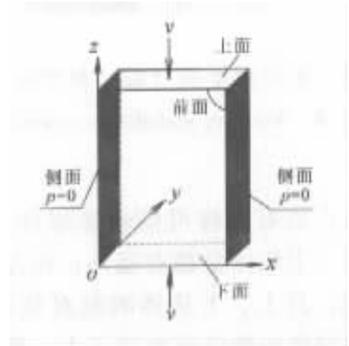


图 2 计算模型

Fig.2 Computing model

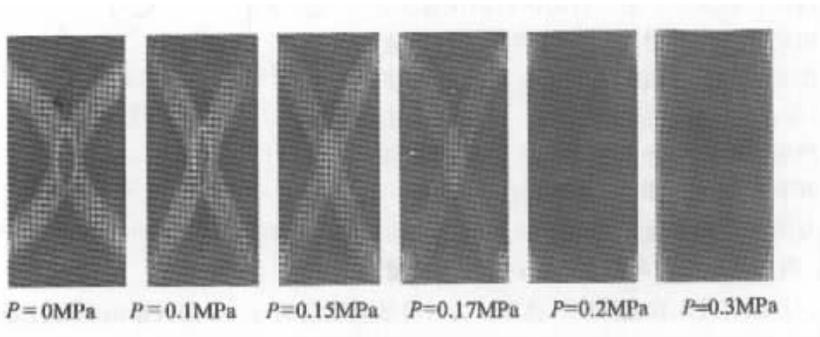


图 3 不同孔隙压力的应变场

Fig.3 Strain of different pore pressure

### 3 结果分析

由图 3 可见，随着孔隙压力的增加，剪切带倾角有增大的趋势，试件的脆性增强，且剪切带趋于不明显。在孔隙压力较低时 (或没有孔隙压力) 岩石试件在应力峰值后软化阶段出现明显的剪切带，试件将发生剪切破坏；当孔隙压力较高时，试件将发生拉伸破坏，而不会发生剪切破坏，由图 5 固体速度场也可看到这一点，当孔隙压力较高时，固体内速度场垂直于固体所受的轴力方向。由图 4 的固体速度场 (左图) 和位移场 (右图) 可见，当孔隙压力

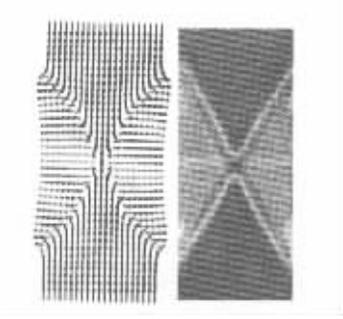


图4 固体速度场(左)和位移场(右)

Fig.4 Velocity and displacement of solid

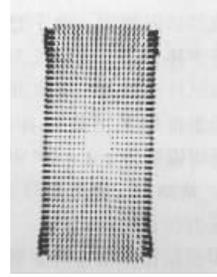


图5 固体速度场

Fig.5 Velocity of solid

较低时, 岩石试件可以明显划分为 4 个小块体, 其中上、下块体呈相对运动, 而左、右块体呈侧向运动, 且上、下块体的相对位移较大; 此外, 上、下块体内的位移相差不大, 剪切带内的岩石位移相差不大, 左、右块体内的位移相差不大, 但这三个区域的位移却有较大的差异, 即, 上、下块体内的位移最大, 左、右块体内的位移次之, 剪切带内的岩石位移最小。在剪切带附近的速度场将发生较大程度的改变(对应于较大的剪切变形), 试件在该位置将被剪切破坏。在模拟中还发现, 在给定的位移边界条件下, 应变率场和位移场虽然有着较强的规律性, 但最小主应力场、最大主应力场和中间主应力场规律性不明显。由图 6 可见, 当孔隙压力较高时,  $\sigma_z - t$  曲线的峰值强度较低, 且提前进入软化阶段, 孔隙压力对峰值强度前的  $\sigma_z - t$  曲线影响程度较峰值强度后要小, 孔隙压力越大, 软化段曲线总体上越陡, 试件的脆性增强, 这些规律性也与众多的实验结果比较一致(如 Robinson<sup>[13]</sup>, 梁冰<sup>[14]</sup>), 图 6 的横坐标为时间  $t$ , 例如  $t = 200$  即为 200 个加载时间步长。

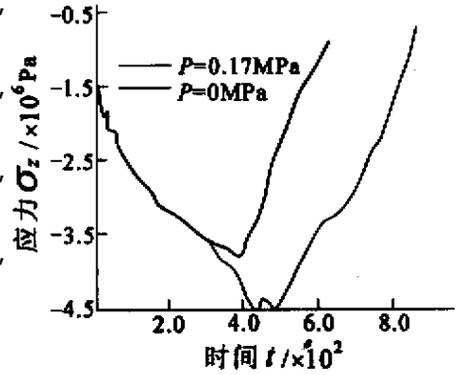


图6  $\sigma_z$  随  $t$  的关系

Fig.6 The relationship of  $\sigma_z$  and  $t$

### 4 结论

利用拉格朗日法初步模拟了孔隙压力对岩体变形局部化应变场的影响。模拟结果表明, 孔隙压力对变形局部化应变场和岩体的性质有较大影响, 随着孔隙压力的增加, 剪切带(剪应变局部化现象)趋于不明显, 剪切带倾角增加, 岩体试件发生拉伸破坏。更细致的关于流固耦合变形局部化的数值模拟研究有待进一步工作。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 陆明万, 罗学富, 郑长卿. 计算细观力学进展 [ A ]. 固体力学发展趋势 [ C ]. 北京: 北京理工大学出版社, 1994. 196 ~ 215.
- [ 2 ] 潘一山, 徐秉业, 王明洋. 岩石塑性应变梯度与 II 类岩石变形行为研究 [ J ]. 岩土工程学报, 1999, 21 ( 4 ): 471 ~ 474.
- [ 3 ] 潘一山. 岩土材料分叉与变形局部化研究 [ A ]. 岩土工程青年专家学术论坛论文集 [ C ]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. 51 ~ 58.
- [ 4 ] 潘一山. 岩土材料分叉分析及其在能源工程中的应用 [ A ]. 中国科协第 21 次“青年科学家论坛”报告文集 [ C ]. 北京: 石油工业出版社, 1997. 83 ~ 89.
- [ 5 ] Loret B, Prevost J H. Dynamic strain localization in fluid-saturated porous media [ J ]. Journal of Engineering Mechanics. 1991, 117 ( 4 ): 907 ~ 922.
- [ 6 ] Larsson R, Runesson K, Sture S. Embedded localization band in undrained soil based on regularized strong discontinuity-theory and FE-analysis [ J ], Int. J. Solids Structures. 1996, 33 : 3081 ~ 3101.
- [ 7 ] Oka F, Adachi T, Yashima A. A strain localization analysis using a viscoplastic softening model for clay [ J ]. Int. J. Solids Structures. 1996, 31 : 523 ~ 545.
- [ 8 ] Hongwo Z, Schrefler B A. Gradient-dependent plasticity model and dynamic strain localization analysis of saturated and partially saturated porous media : one dimensional model [ J ]. Eur. J. Mech. A/Solids. 2000, 19 : 503 ~ 524.
- [ 9 ] Hongwo Z, Sanavia L, Schrefler B A. An internal length scale in dynamic strain localization of multiphase porous media [ J ]. Mech. Cohes-Frict. Mater. 1999, 4 : 443 ~ 440.
- [ 10 ] Xiaobing L, Jiahua Z, Zhengsheng Y. The evolution of shear bands of saturated soil [ J ]. International Journal of Non-Linear Mechanics. 2000, 35 : 21 ~ 26.
- [ 11 ] Bauer E. Analysis of shear band bifurcation with a hypoplastic model for a pressure and density sensitive granular material [ J ]. Mechanics of Materials. 1999, 31 : 597 ~ 609.
- [ 12 ] Larsson J, Larsson Ragnar. Finite-element analysis of localization of deformation and fluid pressure in an elastoplastic porous medium [ J ]. International Journal of Solids and Structure. 2000, 37 : 7231 ~ 7257.
- [ 13 ] 耶格 J C, 库克 N G W. 岩石力学基础 [ M ], 科学出版社, 1981.
- [ 14 ] 梁冰. 煤和瓦斯突出的固流耦合失稳理论的研究 [ 博士学位论文 ] [ D ]. 沈阳: 东北大学, 1994.

## STUDY ON EFFECT OF PORE PRESSURE ON STRAIN LOCALIZATION OF ROCK AND DIGITAL SIMULATION

WANG Xue-bin<sup>1</sup>, PAN Yi-shan<sup>1</sup>, DING Xiu-li<sup>2</sup>, SHENG Qian<sup>2</sup>

( 1. Dept. of Mechanics and Engineering Sciences of Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China ;

2. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430007, China. )

**Abstract** : Firstly, a series of advance on effect of pore pressure on strain localization of solid has been introduced in this paper Secondly, the effect of pore pressure on strain localization ( shear bands ) of the rock has been modeled based upon fast Lagrangian analysis. The results modeled show that the pore pressure has an great influence on the strain localization ; The increase of pore pressure prevents shear bands from developing fully and causes tension failure of rock sample.

**Key words** : rock ; fluid ; strain localization ; shear bands ; pore pressure