

含孔岩体破裂过程的无单元法数值模拟

张鑫^{1,2}, 沈振中¹, 徐力群¹

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河北省水利水电第二勘测设计研究院, 河北 石家庄 050021)

摘要: 根据岩体损伤程度对其渗透性和强度的影响, 利用定义的损伤变量建立了应力-渗流-损伤的耦合分析模型. 综合考虑应力、渗流、损伤之间的相互作用影响, 模拟分析了含孔岩体在不同水压力作用下破裂的过程. 分析表明, 内水压力是促使裂纹扩展的一个重要因素, 内水压力增加可以使原来停止扩展的裂纹重新扩展或者使原来闭合的裂纹重新张开, 而且裂纹张开度的变化将导致裂纹内的渗流特性发生改变.

关键词: 岩体 无单元法 应力-渗流-损伤耦合分析 裂纹扩展

中图分类号: TU452 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2008)05-0722-05

研究岩体破裂或者水力劈裂的大多数理论和模型, 其一个重要缺点是模型中的研究材料都具有不透水性, 这样就无法考虑对于裂隙介质和水力劈裂具有重要影响的渗流水所产生的影响. 裂隙岩体在卸荷作用下应力场发生改变, 导致裂隙产生闭合、张开、开裂、扩展和贯通等几何特性发生变化. 这样, 一方面会使岩体力学性质产生显著弱化和强烈的各向异性, 并改变岩体的应力场; 另一方面有可能形成新的渗流裂隙网络, 影响岩体中渗透水头的分布, 进而引起整个岩体系统的渗流场发生很大的变化. 而渗流场的变化将改变渗透体积分力的分布, 也必将引起应力场的改变. 这种渗透与岩体裂隙损伤的相互作用是互为关联的, 其耦合效应可以成为大型水利工程岩质高边坡及引水隧洞失稳的主要因素.

由于裂纹萌生、扩展、连通以及闭合对岩体的渗透性都会有显著的影响, 且渗流水对于岩体的弱化作用使得岩体的刚度和强度都会有所降低, 所以考虑损伤机制对于岩体工程的稳定性具有重要意义. 李世平等^[1]通过应力-渗透率全过程的试验研究, 表明岩石的渗透系数或渗透率在全应力、应变过程中是应力、应变的函数, 发现最高渗透率多数发生在峰后区的软化段. 韩宝平等^[2-3]也发现岩体在损伤后渗透率会有一个突然的增大. 本文基于无单元法^[4-5], 考虑裂隙扩展、岩体损伤对于渗流的影响^[6], 采用损伤变量来描述岩体的损伤程度对岩体渗透性和强度的影响, 建立了应力-渗流-损伤的耦合分析模型, 并利用研制的计算程序, 对含孔岩体的破裂过程进行了详细的数值模拟.

1 渗流-损伤耦合^[7]

为使应力-渗流-损伤耦合分析模型的本构方程在考虑材料损伤因素后不太复杂, 采用 Lemaitre^[8]提出的损伤等效应变假设, 以材料受损伤前后弹性模量的变化来刻画和度量损伤效应, 即将全应力换成有效应力, 所获得无损材料的应变与全应力作用于受损材料产生的应变等价. 对于一维问题, 该假设可以表示为

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{E}} \quad (1)$$

式中: σ ——全应力(名义应力); $\bar{\sigma}$ ——有效应力; $\bar{E}$ ——受损材料的弹性模量; E ——无损材料的弹性模量.

基于这一假设, 经过推导, 可以定义基于弹性模量的损伤变量如下:

$$D = 1 - \frac{\bar{E}}{E} \quad (2)$$

岩体的渗透张量依赖于应力状态. 随着应力状态的改变, 裂隙的张开度也会发生变化, 进而影响到整个岩体和裂隙内渗流场的特性. 如果裂隙闭合, 则该裂隙方向上的渗透性将会降低. 相反, 如果在迭代过程中裂

隙发生劈裂,则该裂隙方向上的渗透性将会增大.处于压剪应力状态下的裂隙沿其裂隙面发生剪切位移时,如应力达到某一临界值,压剪起裂,使裂隙张开度增加,其渗透性也会有所提高.

在单轴拉伸以及单轴压缩作用下单元弹性损伤关系如图 1 所示.当某一点处的主应力达到材料的抗拉强度时,损伤变量为

$$D = \begin{cases} 0 & (0 < \epsilon \leq \epsilon_{t0}) \\ 1 - \frac{\sigma_{tr}}{E\epsilon} & (\epsilon_{t0} < \epsilon < \epsilon_{tu}) \\ 1 & (\epsilon \geq \epsilon_{tu}) \end{cases} \quad (3)$$

式中 σ_{tr} 为抗拉残余强度.

当岩体处于弹性状态时,损伤变量 $D = 0$,材料为无损状态,渗透系数和有效应力是负指数关系.当主应力达到岩体的抗拉强度时,材料开始损伤软化,此时 $0 < D < 1$,其渗透性有所提高.当材料发生断裂破坏时,完全失去承载能力,此时 $D = 1$,渗透系数将会大幅增大.因此,岩体的渗透系数可以表示为

$$k = \begin{cases} k_0 e^{-\alpha\sigma'} & (D = 0) \\ \xi k_0 e^{-\alpha\sigma'} & (0 < D < 1) \\ \xi' k_0 e^{-\alpha\sigma'} & (D = 1) \end{cases} \quad (4)$$
$$\sigma' = \sigma - p$$

式中 k_0 ——初始渗透系数; ξ, ξ' ——渗透系数增大系数; p ——孔隙水压力; α ——耦合试验参数.根据杨天鸿的试验成果^[5],可令 $\xi = 5, \xi' = 1000$.

剪切破坏的准则采用摩尔-库仑准则,则损伤变量的表达式为

$$D = \begin{cases} 0 & (\epsilon > \epsilon_{c0}) \\ 1 - \frac{\sigma_{cr}}{E\epsilon} & (\epsilon \leq \epsilon_{c0}) \end{cases} \quad (5)$$

式中 σ_{cr} 为抗压残余强度.

相应的岩体渗透系数的表达式为

$$k = \begin{cases} k_0 e^{-\alpha\sigma'} & (D = 0) \\ \xi k_0 e^{-\alpha\sigma'} & (D > 0) \end{cases} \quad (6)$$

与张拉破坏的情况相似, $D = 0$ 表示岩体无损.当某一高斯点的压缩应变达到 ϵ_{c0} 时 $D > 0$,该处岩体开始损伤,相应渗透性增大.当原来存在的裂隙在迭代过程中发生闭合时,相关区域的渗透性将会明显降低.

2 应力-渗流耦合分析

体积力仅考虑重力,并规定应力符号以拉应力为正,则可以得到以位移分量表示的耦合平衡微分方程:

$$(\lambda + G) \frac{\partial \epsilon_v}{\partial x_j} + G \nabla^2 u + \rho X_j + \beta \frac{\partial p}{\partial x_j} = 0 \quad (j = 1, 2, 3) \quad (7)$$

式中 β ——孔隙水压力系数; ϵ_v ——体积应变, $\epsilon_v = \epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}$; X_j ——体力分量; u ——位移; G, λ ——剪切模量和拉梅系数; ρ ——体力密度.

采用 Louis 根据钻孔压水试验得出的岩体渗透系数与正应力的经验关系式^[9]

$$k = k_0 e^{-\alpha(\sigma - p)} \quad (8)$$

3 迭代计算过程

渗流场、应力场以及损伤场之间的相互制约关系十分复杂,需要考虑的边界条件也各不相同,因此要直接求解其耦合方程是十分困难的.本文利用 3 场之间的相互耦合关系进行迭代循环,分别重复计算 3 场,以达到它们的动态平衡.建立起来的数值模型可以分析求解岩体裂纹扩展路径的追踪问题、非规则路径扩展过程中渗透率增大及其水压力跟踪传递问题以及裂纹闭合后渗透率降低问题等,从而用数值计算方法模拟岩体破裂和水力劈裂过程中水压力、应力和损伤变量相互作用的复杂机制.

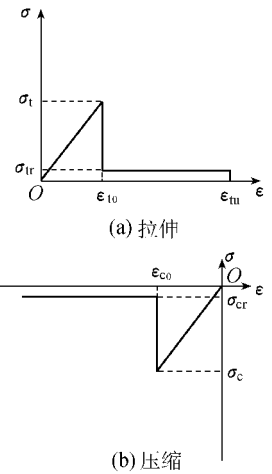


图 1 单轴拉伸和压缩的本构关系
Fig.1 Constitutive model of uniaxial tension and compression

由于无单元法可以随着裂尖位置的改变随意增加节点,因此将无单元法应用于应力-渗流-损伤耦合分析模型,既可充分发挥其在模拟裂纹扩展过程中的优势,又可体现由于损伤产生的岩体渗透率的突变对于渗流场的影响以及岩体刚度的弱化对于岩体应力场的影响.基于无单元法的应力-渗流-损伤耦合分析模型中的计算流程参见文献[10].

4 算例分析

考虑含孔岩体破裂过程的数值模拟问题^[11-12],建立如图2所示的均质岩体模型,模型中央为直径50 mm的圆孔.岩体的弹性模量为6 GPa,抗压和抗拉强度分别为60 MPa和6 MPa,渗透系数为 1.0×10^{-6} m/s,分别在水平方向和竖直方向施加1 MPa和2 MPa的围压.研究在不同内水压力作用下岩体裂纹的扩展规律和岩体的破裂过程^[13].

无裂纹模型无单元节点分布如图3所示.不考虑圆孔内水压力作用时,其水平方向和垂直方向正应力分布如图4所示.可见,在圆孔周围一定范围内存在应力集中现象,这是导致位于圆孔周边的裂纹发生开裂的重要原因.

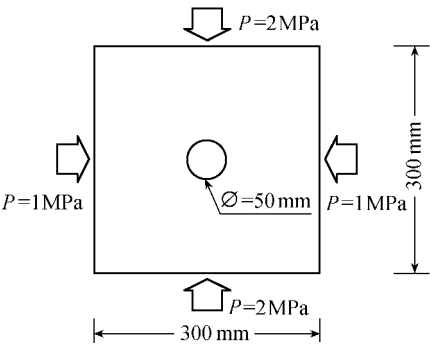


图2 岩体模型示意图
Fig.2 Sketch of rock mass model

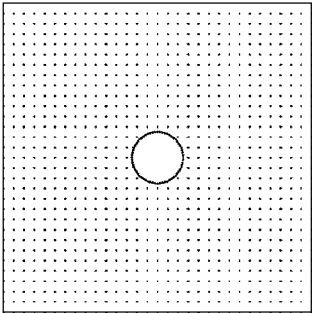
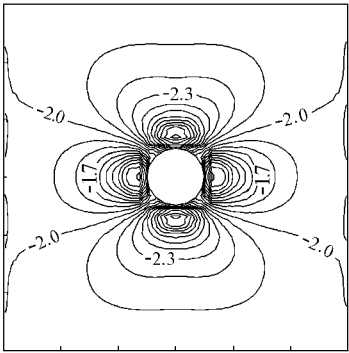
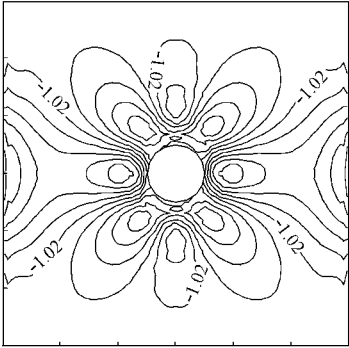


图3 无单元法节点分布
Fig.3 Sketch of node distribution of EFM



(a) 水平正应力



(b) 垂直正应力

图4 无裂纹时岩体的正应力分布(单位:MPa)

Fig.4 Normal stress distribution of rock mass without crack (unit:MPa)

在圆孔两侧分别设置一条长 $l = 20$ mm的水平方向的裂纹, l 为裂尖距离孔边的距离,即裂纹扩展的长度.变化水压力作用的大小,研究含有圆孔岩体的水力劈裂的发生条件和扩展规律.计算过程中内水压力的增幅为0.5 MPa.当内水压力增加到22.5 MPa时,岩体内预设的裂纹开始扩展,但在迭代3步后停止扩展.继续增大内水压力,当内水压力增加到26.5 MPa时,裂纹重新开始扩展,并一直到贯通整个岩体模型.

迭代计算过程中岩体裂纹长度如表1所示.可见,随着裂纹长度的增加,有效应力强度因子逐渐增大.然而随着裂纹的

表1 裂纹扩展长度统计

Table 1 Length of crack propagation

迭代 步数	内水压力/ MPa	有效应力强度 因子/ $(10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-\frac{2}{3}})$	裂纹长度 l/mm
0	22.5		20
1	22.5	0.164	28.85
2	22.5	0.185	37.21
3	22.5	0.172	47.30
4	22.5	0.166	不变
5	26.5	0.274	77.31
6	26.5	0.524	裂纹贯通

进一步扩展,其值又逐渐减小,迭代到第 4 步时,其值小于材料的断裂韧度,裂纹停止扩展.在提高圆孔的内水压力之后,裂纹重新开始扩展.裂纹尖端的有效应力强度因子在高内水压力的作用下有较大幅度的提高,开裂步长也有较大幅度的增加,直到裂纹贯通.

图 5 和图 6 为裂纹扩展过程中的裂纹长度和节点分布以及岩体水平正应力分布情况.图 7 为初始、迭代 3 步和迭代 6 步时的水头等值线图.当内水压力增加到 22.5 MPa 时,裂纹开始扩展,这时内水压力达到了裂纹扩展的阈值,裂纹的有效应力强度因子大于岩体断裂韧度.当迭代到第 4 步时,裂纹扩展停止.而当内水压增加到 26.5 MPa 时,裂纹重新开始扩展,且在重新扩展的第 2 步,裂纹贯通整个试件.从裂纹扩展过程来看,内水压力是促使裂纹扩展的一个重要因素,内水压力的增加可以使原来停止扩展的裂纹重新开裂,或是使得

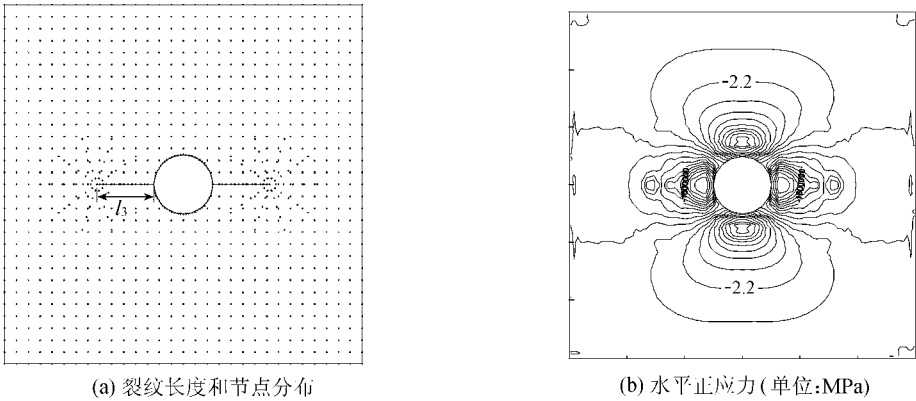


图 5 迭代 3 步时的裂纹和应力

Fig.5 Crack length and stress when iteration step = 3

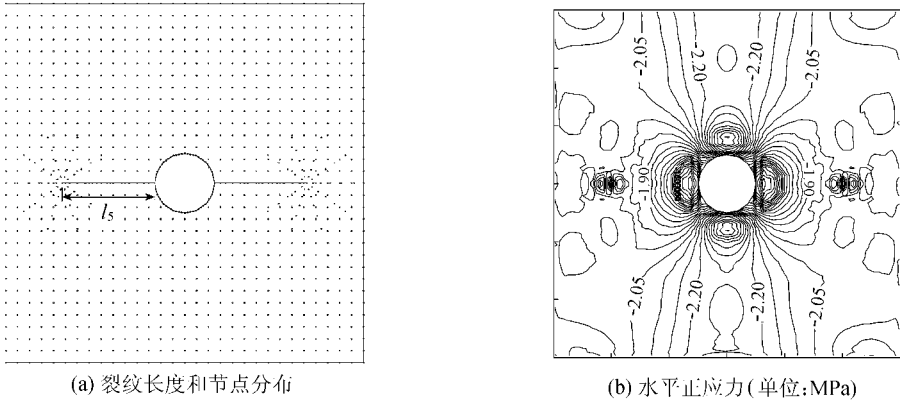


图 6 迭代 5 步时的裂纹和应力

Fig.6 Crack length and stress when iteration step = 5

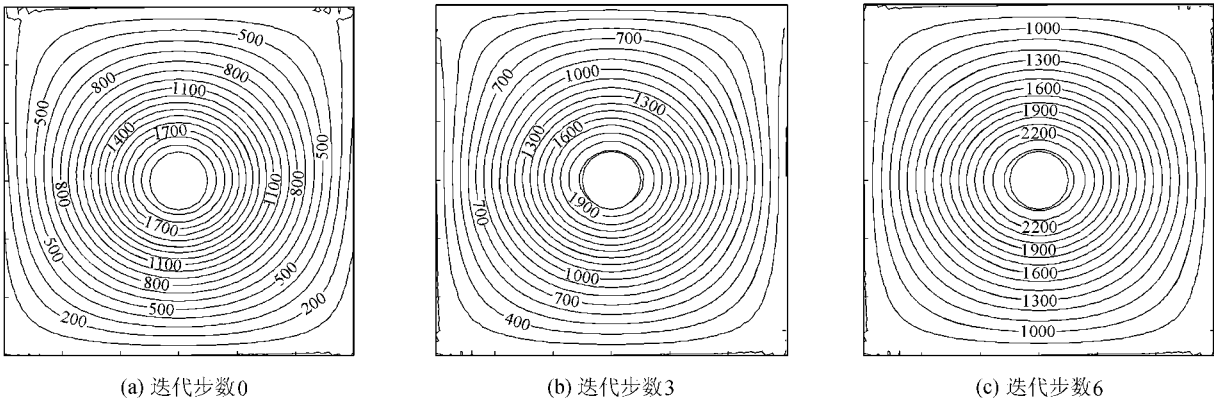


图 7 部分迭代步的水头等值线(单位 :m)

Fig.7 Water head contour for some iteration steps(unit :m)

原来闭合的裂纹重新张开;另一方面,裂纹张开度的变化使得裂纹内的渗流特性发生了改变.从计算的流速矢量分析可以看出,裂纹扩展区域内岩体的渗透系数增大,该区域内的流速矢量值比周围其他区域要大很多.流速矢量的方向与裂纹扩展方向基本一致.

上述数值模拟结果与文献[10]的试验结果接近.从计算过程来看,耦合分析模型和程序充分发挥了无单元法在追踪裂纹扩展方面的优势,为解决裂纹的非直线扩展、裂纹的张开闭合等问题提供了一个有效的数值模拟新方法.

5 结 论

a. 利用损伤变量描述了岩体的损伤程度对岩体的渗透性和强度的影响,阐述了岩体应力-渗流-损伤耦合的无单元法分析模型.

b. 综合考虑应力、渗流、损伤之间的相互作用影响,模拟分析了含圆孔岩体的破裂过程.计算表明,内水压力是促使裂纹扩展的一个重要因素,内水压力的增加可以使原来停止扩展的裂纹重新开裂,或是使得原来闭合的裂纹重新张开,同时,裂纹张开度的变化使得裂纹内的渗流特性发生改变.

c. 本文分析模型的计算结果与文献的试验结果更为接近.因此,耦合模型可以用来研究岩体的破裂或水力劈裂,具有理论意义和应用价值.

参考文献:

- [1] 李世平,李玉寿,吴振业.岩石全应力应变过程对应的渗透率方程[J].岩土工程学报,1995,17(2):231-235.
- [2] 韩宝平,冯启言,于礼山,等.全应力应变过程中碳酸盐岩渗透性研究[J].工程地质学报,2000,8(2):127-128.
- [3] 张金才,王建学.岩体应力与渗流的耦合及其工程应用[J].岩石力学与工程学报,2006,25(10):1982-1992.
- [4] BELYTSCHKO T, LU Y Y, GU L. Element-free Galerkin methods[J]. International Journal for Numerical Method in Engineering, 1994, 37:229-256.
- [5] LEE S H, YOON Y C. An improved crack analysis technique by element free Galerkin method with auxiliary supports[J]. International Journal for Numerical Method in Engineering, 2003, 56:1291-1314.
- [6] 张有天,张武功.裂隙岩石渗透特性渗流数学模型及系数量测[J].岩石力学,1982(8):41-52.
- [7] 朱珍德,徐卫亚.裂隙岩体渗流场与损伤场耦合模型研究[J].河海大学学报:自然科学版,2003,31(2):156-151.
- [8] LEMAITRE J. A Course on damage mechanics[M]. Berlin:Spring-verlag,1992.
- [9] LOUIS C. Rock hydraulics[G]//Muller L. Rock Mechanics. New York:Verlag Wien,1974:287-299.
- [10] 张鑫.基于无单元法的应力-渗流-损伤耦合模型的水力劈裂研究[D].南京:河海大学,2007.
- [11] 杨天鸿.岩石破裂过程渗流特性及其应力耦合研究[D].沈阳:东北大学,2001.
- [12] 杨天鸿,唐春安,朱万成,等.岩石破裂过程渗流与应力耦合分析[J].岩土工程学报,2001,23(4):490-494.
- [13] 谢兴华.岩体水力劈裂机理试验及数值模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2005,27(4):364.

Numerical simulation of cracking process of rock mass with hole by element-free method

ZHANG Xin^{1,2}, SHEN Zhen-zhong¹, XU Li-qun¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. The Secondary Institute of Water Conservancy and Hydropower of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: The influence of rock damage degree on the permeability coefficient and intensity of a rock mass was described by defining a damage variable, and a stress-seepage-damage coupling analysis model was established and used to simulate the cracking process of a rock mass with a hole. The results show that the inner water pressure is an important factor in the crack's propagation, and that the increment of inner water pressure can make the crack re-expand, or make the closed crack re-open. It is also indicated that the change of the crack width will result in the change of seepage characteristics within the crack.

Key words: rock mass; element-free method (EFM); stress-seepage-damage coupling analysis; crack propagation