

文章编号:0559-9350(2006)06-0722-05

基于二元介质模型的岩土类材料破损过程数值模拟

刘恩龙,沈珠江

(清华大学 水利水电工程系,北京 100084)

摘要:岩土类材料是非均质的具有微缺陷的天然材料,岩土破损力学将岩土材料抽象成由胶结元和摩擦元组成的二元结构体。本文在细观尺度上把胶结元看成理想弹脆性材料,把摩擦元看成硬化型弹塑性材料,计算时通过受荷过程中胶结元破损并逐渐向摩擦元的转化来模拟岩土材料的破损过程。最后进行平面应变受压应力状态下的数值计算,探讨不同侧向应力状态下岩土类材料的破损发展过程和相应的位移状态。结果表明,本文建议的模拟方法可以较好的模拟岩土类材料的破损过程和力学响应。

关键词:非均质性;细观尺度;二元介质模型;破损过程

中图分类号:TU43

文献标识码:A

1 研究背景

岩土类材料是一种非均质材料,内部存在大量的微、细观缺陷,在外部荷载的作用下,材料内部缺陷的成核、扩展和细观变形机制决定了其宏观变形特性和破损过程。Lattice 模型被广泛用于模拟非均质材料破损过程,如对岩石、混凝土类材料的断裂损伤过程的细观数值模拟^[1],对岩石的开裂过程进行数值模拟^[2,3]以及对非均匀脆性材料的破坏过程进行的三维数值模拟^[4],但 Lattice 模型对受压状态下的剪切带形成过程的模拟存在很大困难。于是,有学者将均匀化理论与有限元方法结合,考虑多孔材料的细观本构关系,对多孔材料的细观力学特性进行数值模拟研究^[5]。或从基本的能量传递定律出发,建立的物理元胞自动机理论,对岩石、混凝土等非均质材料的破坏演化进行模拟^[6]。还有些学者考虑到岩土类材料的细观非均匀性,通过对材料的参数进行随机赋值,利用有限元模拟岩石类材料的破裂过程^[7,8]。应用离散元方法研究砂岩中剪切带发展的控制因素并与试验过程中的微结构变化进行对比^[9,10]。利用离散的中心力弹簧模型^[11],模拟了高孔隙沉积岩中压缩带的形成。岩土类材料的工作应力状态大多是压剪应力状态,所以应该考虑岩土类材料的微观变形机理对岩土类材料在压剪应力状态下的变形破损过程进行模拟。因此本文基于二元介质模型^[12,13]概念,把岩土材料抽象成具有黏聚特性的胶结元和具有摩擦特性的摩擦元组成的二元结构体,在细观尺度上把胶结元看成理想弹脆性材料和把摩擦元看成硬化型弹塑性材料,通过受荷过程中胶结元破损并逐渐向摩擦元的转化来模拟岩土材料的破损过程,最后进行平面应变受压应力状态下的数值计算,探讨不同的侧向应力状态下岩土类材料的破损发展过程和相应的位移状态,研究不同的硬化参数对破损过程的影响。

2 岩土材料破损过程的模拟方法

根据岩土二元介质模型^[12,13]概念,可以将岩土材料在细观尺度上理想化为由大量的胶结元和摩擦

收稿日期:2005-07-25

基金项目:南京水利科学研究院开放流动研究基金资助项目(YK90506)

作者简介:刘恩龙(1976—),男,河南商丘人,博士,主要从事岩土材料的基本性质及数学模型方面的研究。

E-mail:lel02@mails.tsinghua.edu.cn

元组成的二元结构体,胶结元和摩擦元彼此独立并具有自己的变形特性;在受荷过程中,胶结元逐渐破损并转化为摩擦元,二者共同抵抗外部作用直至破坏,摩擦元的汇集增大会逐渐形成宏观的破碎带。因此,通过受荷过程中对胶结元的破损并向摩擦元转化的模拟就可以对宏观上岩土材料的破损过程进行模拟。

2.1 二元结构体的本构特性 胶结元主要是通过强黏聚力形成的材料,其变形过程具有脆性性质,在此假定胶结元为理想弹脆性材料,即在应力状态达到破坏强度以前其变性特性是线弹性的,达到破坏强度以后很快转化为摩擦元,如图 1 所示。图 1 中 σ_b 、 ε_b 为胶结元的应力和应变, σ_{bf} 、 ε_{bf} 为胶结元破坏时的应力和应变。摩擦元具有较弱的胶结强度,其变形过程具有弹塑性性质,可以是硬化型的,也可以是软化型的,在此假定为硬化型弹塑性的,即在应力状态点在屈服面以内($F_{(\sigma_{bf})} < 0$)时其变性特性是弹性的,当应力状态点在屈服面上时($F_{(\sigma_{bf})} = 0$)进入塑性状态。记 E_b 、 ν_b 分别为胶结元的弹性模量和泊松比,则胶结元的刚度矩阵为

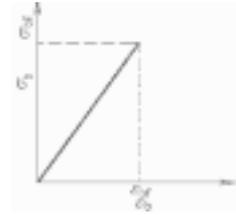


图 1 胶结元变形特性

$$D_b = \frac{E_b}{(1 + \nu_b)(1 - 2\nu_b)} \begin{bmatrix} 1 - \nu_b & \nu_b & \nu_b & 0 & 0 & 0 \\ \nu_b & 1 - \nu_b & \nu_b & 0 & 0 & 0 \\ \nu_b & \nu_b & 1 - \nu_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu_b}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu_b}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2\nu_b}{2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

记 $F_{(\sigma_{bf})}$ 为摩擦元的屈服函数,采用相适应的流动法则,则摩擦元的刚度矩阵为

$$[D]_{ep,f} = [D]_f - \frac{[D] \left[\frac{\partial F}{\partial [\sigma]_f} \left[\frac{\partial F}{\partial [\sigma]_f} \right]^T [D]_f \right]}{A + \left[\frac{\partial F}{\partial [\sigma]_f} \right]^T [D]_f \left[\frac{\partial F}{\partial [\sigma]_f} \right]} \quad (2)$$

式中: A 为硬化参数。

采用线性强化弹塑性时,如图 2 所示,则

$$A = \frac{E_T}{1 - E_T^2 E_0} \quad (3)$$

图 2 中 σ_f 、 ε_f 为摩擦元的应力和应变; σ_b 、 ε_b 为摩擦元屈服时的应力和应变; E_0 、 E_T 为摩擦元的初始和屈服后的弹性模量。

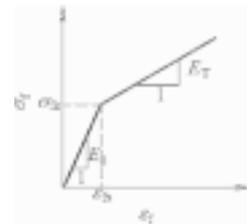


图 2 摩擦元硬化特性

2.2 屈服准则 受荷后,胶结元在达到其破坏强度后就会转化为摩擦元,应

该给出胶结元转化为摩擦元时应满足的应力条件,即破坏准则。此处考虑拉伸破坏和剪切破坏两种方式,当胶结元的最小主应力达到抗拉强度 σ_{bf} 时破坏,即为拉伸破坏,否则为剪切破坏。对胶结元的剪切破坏采用 Mohr/Coulomb 准则(压应力为正)

$$\sigma_{1b} - \sigma_{3b} = (\sigma_{1b} + \sigma_{3b}) \sin \varphi_b + 2 c_b \cos \varphi_b \quad (4)$$

式中: σ_{1b} 、 σ_{3b} 分别为胶结元的最大和最小主应力; φ_b 为胶结元的内摩擦角; c_b 为胶结元的内聚力。

同样,对于硬化型摩擦元也取与胶结元类似的 Mohr/Coulomb 屈服准则

$$\sigma_{1f} - \sigma_{3f} = (\sigma_{1f} + \sigma_{3f}) \sin \varphi_f + 2 c_f \cos \varphi_f \quad (5)$$

式中: σ_{1f} 、 σ_{3f} 分别为摩擦元的最大和最小主应力; φ_f 为摩擦元的内摩擦角; c_f 为摩擦元的内聚力。

2.3 计算方法 对于胶结元,可以对原状土样进行试验,利用初始值做为胶结元的参数;对于摩擦元,可以把原状土样完全加荷破损后反复剪切使其结构完全丧失,再进行试验得到的参数值作为摩擦元的

计算参数。

由于胶结元破损后会引起应力的重分布,所以直到没有胶结元破损为止才可达到新的平衡,故在每一步计算过程中都采用迭代算法,并在每一计算步中统计出胶结元破损的单元数。

3 模拟算例

基于上述基本原理作者编制了相应的平面有限元程序,进行应力、位移和试件的荷载一位移分析。下面对岩样在不同侧向应力状态下的平面应变压缩试验进行数值计算。计算的网格如图 3 所示,共采用 3200 个单元网格,试样尺寸为 10cm×20cm。由于岩土材料具有初始的缺陷,所以初始时在试样中间假定存在 1 个已破损单元。

胶结元所用的材料参数为:弹性模量 $E_b = 300\text{MPa}$,泊松比 $\nu_b = 0.25$,抗拉强度 $\sigma_{bt} = 5.05\text{kPa}$,内聚力 $c_b = 0.12\text{MPa}$,内摩擦角 $\varphi_b = 25.5^\circ$ 。摩擦元选用的材料参数为:弹性模量 $E_f = E_0((\sigma_{1f} + \sigma_{3f}) / (2.0 P_a))^{0.8}$,其中 $E_0 = 120\text{MPa}$, P_a 为标准大气压;泊松比 $\nu_f = 0.33$,内聚力 $c_f = 0.0\text{kPa}$,内摩擦角 $\varphi = 47.9^\circ$,硬化参数 $A = A_0((\sigma_{1f} + \sigma_{3f}) / (2.0 P_a))^{0.7}$, $A_0 = 20\text{MPa}$ 。共进行 5 组模拟,侧向应力分别为 0.05、0.2、0.5、0.75 和 1.0MPa。图 4~图 7 分别为不同的侧向应力下的破损过程图,其反映了随着外荷载的施加胶结元逐步破损并向摩擦元转化的过程。

在图 4~图 7 中,深颜色的表示已破损的胶结元转化成的摩擦元。从图中可以看出,不同侧向应力作用下破损发展都是由胶结元的破损逐渐转化为摩擦元,最后形成宏观的破碎带,只是在不同的侧向应力下破碎带形成中的汇集路径方式有差别而已,随着侧向应力的增大,胶结元的破损的方式由抗拉破坏为主逐渐转化为以剪切破坏为主。

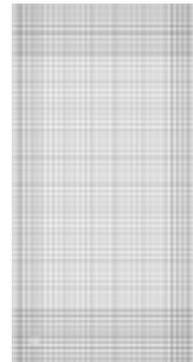


图 3 有限元网格

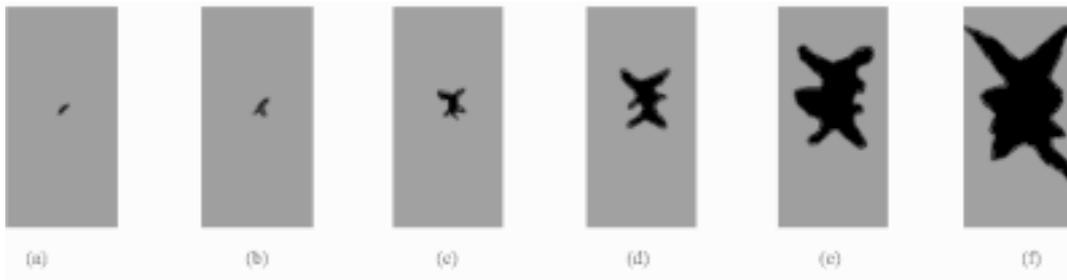


图 4 破损过程(侧向应力为 0.05MPa)

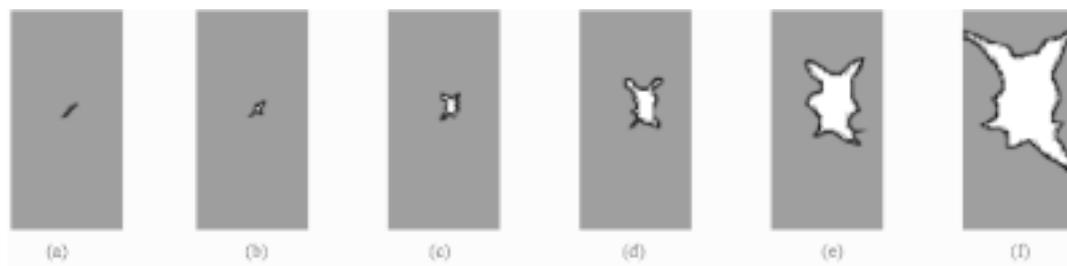


图 5 破损过程(侧向应力为 0.2MPa)

图 8(a)为不同的侧向应力下竖向荷载与应变的关系,从图中可以看出,不同的侧向应力下,竖向荷载均表现出应力跌落现象,并且随着侧向应力的增大竖向承载能力亦逐渐增大,达到峰值应力时的应变亦相应增大,这与图 8(b)中的岩石的平面试验^[14]的应力应变结果定性一致。

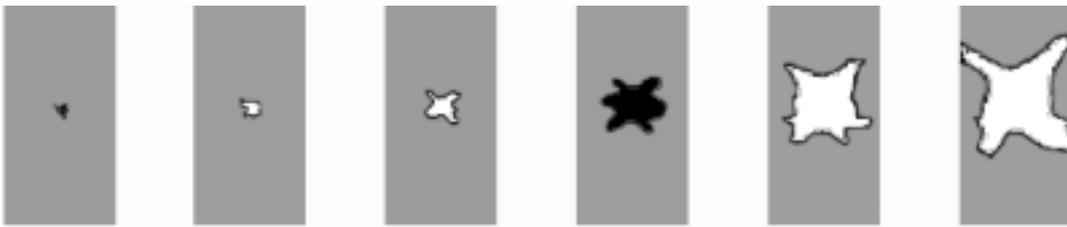


图6 破损过程(侧向应力为 0.5MPa)

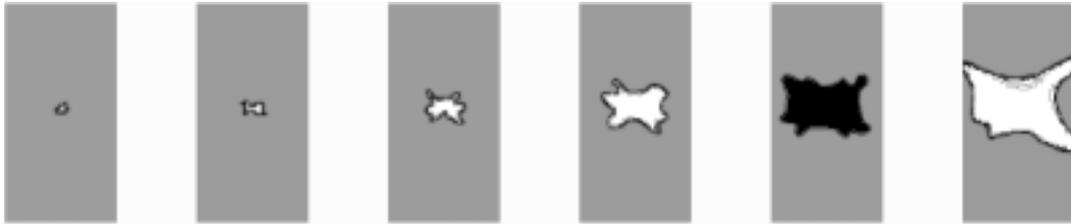


图7 破损过程(侧向应力为 1.0MPa)

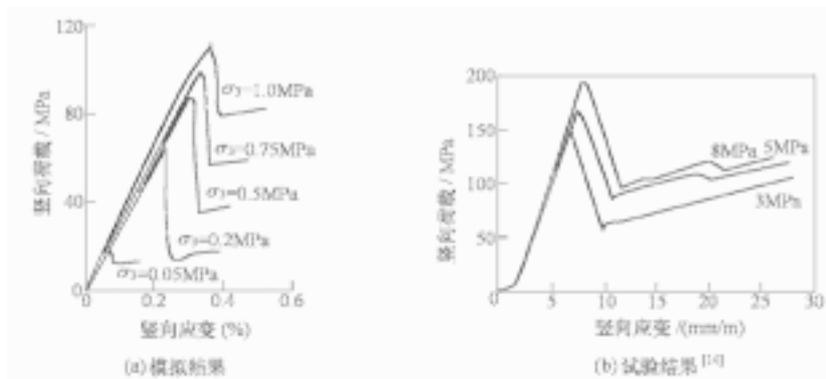


图8 应力应变关系

4 结论

本文在二元介质模型的基础上给出了一种模拟岩土类材料破损过程的细观模拟方法,在细观尺度上把胶结元理想为弹脆性材料,把摩擦元理想为硬化型弹塑性材料,通过受荷过程中胶结元破损并逐渐转化为摩擦元直至形成破碎带来模拟岩土类材料的破损过程。通过平面应变的有限元算例分析得到以下结论:(1)二元介质模型对岩土类材料的力学抽象,即把岩土类材料抽象成由胶结元和摩擦元组成的二元介质材料,可以反映岩土类材料破损过程的力学特性和变形规律,为揭示岩土类材料的破损机理提供了理论基础;(2)本文的数值方法可以模拟不同的侧向应力下的破损过程,可以模拟出胶结元破损并逐步向摩擦元转化的过程,侧向应力不同,破碎带的汇集方式稍有区别。可以模拟出加荷过程中的应力跌落现象,并且由于硬化型摩擦元的作用会使得应力跌落后随着应变的增加抵抗外部作用的能力亦增强。

参 考 文 献:

- [1] 周维垣,剡公瑞.岩石、混凝土类材料断裂损伤过程区的细观力学研究[J].水电站设计,1997,13(1):1—9.
- [2] 杨强,张浩,吴荣宗.二维格构模型在岩石类材料开裂模拟中的应用[J].岩石力学与工程学报,2000,19(增):941—945.

- [3] 杨强,张浩,周维垣.基于格构模型的岩石类材料破坏过程的数值模拟[J].水利学报,2002,(4):46—50.
- [4] 陈永强,郑小平,姚振汉.三维非均匀脆性材料破坏过程的数值模拟[J].力学学报,2002,34(3):351—361.
- [5] 庄守兵,吴长春,冯森林,袁振.基于均匀化方法的多孔材料细观力学特性数值研究[J].材料科学与工程学报,2001,19(4):9—13.
- [6] 谭云亮,周辉,王泳嘉,等.模拟细观非均质材料破坏演化的物理元胞自动机理论[J].物理学报,2001,50(4):704—710.
- [7] 唐春安,赵文.岩石破裂全过程分析软件系统 RFPA^{2D}[J].岩石力学与工程学报,1997,16(5):507—508.
- [8] 宋力,解英艳,张后全.岩石试样弹塑性破裂过程的数值模拟分析[J].计算力学学报,2004,21(5):614—619.
- [9] Antonellini M A, Pollard D D. Distinct element modeling of deformation bands in sandstone[J]. Journal of Structural Geology, 1995, 17(8): 1165—1182.
- [10] 邢纪波,俞良群,王泳嘉.三维梁—颗粒模型与岩石材料细观力学行为模拟[J].岩石力学与工程学报,1999,18(6):627—630.
- [11] Katsman R, Aharonov E, Scher H. Numerical simulation of compaction bands in high porosity sedimentary rock[J]. Mechanics of Materials, 2005, 37: 143—162.
- [12] 沈珠江.岩土破损力学与双重介质模型[J].水利水运工程学报,2002,(4):1—6.
- [13] 沈珠江.胡再强.黄土的二元介质模型[J].水利学报,2003,(7):1—6.
- [14] Yumlu M, Ozbay M U. A study of the behaviour of brittle rocks under plane strain and triaxial loading conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences *m* Geomechanics Abstracts, 1995, 32(7): 725—733.

Simulation of breakage process of geomaterials by binary-medium model

LIU En-long, SHEN Zhu-jiang

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Geological materials are inhomogeneous and having micro cracks and micro voids. Under the theoretical framework of breakage mechanics for geological material, the geomaterials are conceptualized as binary medium consisting of bonding elements and frictional elements, which are idealized as elastic-brittle element and hardened elastic-plastic element respectively in meso-scope. The fracture process of geomaterial is simulated by the transformation of fracturing or breaking of bonding element into frictional element in the process of loading. Finally, the numerical simulations of compression under plane strain conditions with different confining pressures are carried out. The numerical examples show that the meso-scope FEM based on the binary-medium model can satisfactorily simulate the breakage process and deformation properties of geomaterials.

Key words: inhomogeneity; meso-scope; binary-medium model; breakage process

(责任编辑:韩昆)