

文章编号: 1000-7598-(2006)增刊-0027-04

岩石材料的三维各向异性损伤破坏模型与数值模拟

张均锋, 祁 涛, 李正国

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘 要: 基于复合材料以及连续介质损伤理论, 给出了岩石材料的各向异性损伤破坏模型。通过引入与岩石材料单轴加载行为相对应的特征模态构成的四阶对称损伤张量, 描述了岩石材料的损伤演化过程, 其中对不同主应变方向采用不同的损伤变量, 而对同一主应变方向拉压时的损伤则采用不同的损伤变量来描述。在数值模拟岩石破坏过程的程序中, 采用了张量分解的方法。将该模型编写用户材料子程序, 并嵌入到大型有限元分析程序 ABAQUS 中, 通过 ABAQUS/EXPLICIT SOLVER 的显式有限元算法求解。利用此程序对岩石材料的单轴压缩进行了数值模拟。

关键词: 各向异性; 岩石材料; 损伤; 张量分解

中图分类号: TU 45

文献标识码:

A three-dimensional anisotropic damage model of rock materials and its numerical simulation

QI Tao, ZHANG Jun-feng, LI Zheng-guo

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Based on research results of composite material and continuum damage mechanics theory, a three-dimensional anisotropic damage model was presented. To describe the damage evolution of rock material during loading/unloading, the derivate eigenmodes in the proposed model are assumed to be related with the uniaxial behavior of the rock material. Each eigenmode has a corresponding damage variable due to the fact that damage is a function of the magnitude of the eigenstrain. Within an eigenmodes, different damage variables can be used for tension and compression. Hence, these damage variables in six eigenmodes can form a 4th rank symmetric damage tensor which stipulates evaluation of effective elastic modulus of the rock material with microcracks and an adequate description of the evolution of damage.

In this model, the tensor decomposition technique is employed. It means that the stress and strain tensors are decomposed into six eigentensors, which correspond to six eigenvalues accordingly. The stress-strain curves for different directions, which can be obtained from the experiment, are assumed to be different in each normal eigenmodes.

This model was also developed into finite element code in explicit format; and the code was integrated into the well-known computational environment ABAQUS using the ABAQUS/Explicit Solver. Numerical simulation of an uniaxial compressive test for a rock sample is used to examine the performance of the proposed model. The results of the numerical simulation show that it is possible to reproduce most of the observable characteristics of anisotropic behavior and damaged zone in rock materials.

Key words: anisotropy; rock material; damage; tensor decomposition

1 引 言

岩石材料在组分、结构和致密程度上都存在很大差异, 非均质、各向异性和多裂隙是岩石介质的基本特性。天然岩体内富含节理及裂隙, 使岩体力学性质产生了显著弱化和强烈的各向异性, 卸荷岩体力学的材料特性研究中也证实了岩体在竖向和横

向的模量差异很大^[1,2], 因此, 研究岩石材料的破坏时须考虑其各向异性特性。

近几年来, 岩石损伤力学的发展为分析岩石类介质的破坏与工程应用提供了有效手段。人们根据不同的损伤机制及基础理论建立了各种损伤理论, 并将其应用于岩石材料的非线性、黏塑性、以及各向异性等的损伤问题研究, 取得了许多成果^[3]。朱

收稿日期: 2006-05-10

基金项目: 自然科学基金项目 (No.10372104); 国家 973 项目资助(No.2002CB412706)。

作者简介: 张均锋, 男, 1966 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事滑坡机理和岩石破坏方面的研究工作。

维中等根据Betti能量互易定理,考虑节理裂纹扩展过程中的能量转换和节理裂纹扩展过程中的相互作用,建立了裂隙岩体的损伤演化方程和三维脆弹性断裂损伤本构模型,并将该本构模型应用于三峡船闸高边坡的裂隙岩体开挖卸荷稳定三维非线性有限元计算,获得了比较理想的结果^[4]。Dragon等提出了一个考虑内部裂隙摩擦滑动的连续损伤模型来描述岩石类介质的各向异性逐步弱化特性^[5]。ZHANG等给出了爆炸载荷下各向异性的岩石材料损伤和破碎的模型,并推导了损伤演化的方程^[6]。沈新普等在不可逆热力学框架内建立了岩土材料的正交异性损伤塑性耦合宏观唯象本构理论,给出了塑性和损伤耦合的演化规律^[7],王春秋采用有限元方法建立了正交各向异性弹塑性平面应变分析模型,对拱形洞室随各正交方向上弹模的变化对围岩破坏的影响进行了模拟研究^[8]。余天堂给出了岩土材料的一种各向异性模型,并用一个各向异性参数来描述岩土材料的固有各向异性,建立了一个既能描述岩土材料的固有各向异性又能反映开裂和屈服两种破坏模式的破坏准则^[9]。Mosler和Bruhns探讨了用不连续位移场描述各向异性弹塑性损伤的模型^[10]。这些研究都表明,岩体的各向异性对岩体破坏的影响是不容忽视的,在岩石力学工程设计中应引起高度重视。

本文基于复合材料以及连续介质损伤的理论,引入与岩石材料单轴加载行为相对应的特征模态构成的四阶对称损伤张量,以此来描述岩石材料的损伤的演化,提出了三维各向异性弹脆性损伤模型,并将该模型应用到有限元分析中。数值模拟岩石材料的破坏时,采用张量分解的方法。

2 三维正交各项异性损伤模型

2.1 三维损伤张量

基于应变等效性假设,应力张量作用在损伤材料上所引起的应变张量与有效应力张量作用在无损伤材料上引起的应变张量等价^[11]。对三维各向异性弹性材料,该假定可描述为:

$$\tilde{\epsilon}_{ij} = \tilde{C}_{ijkl}^{-1} \sigma_{kl} = C_{ijkl}^{-1} \tilde{\sigma}_{kl} \quad (1)$$

式中 C_{ijkl} 和 \tilde{C}_{ijkl} 分别为无损刚度张量和有效刚度张量,则损伤张量可通过无损材料和损伤材料的刚度张量表示为:

$$D = I - C_{ijkl}^{-1} \tilde{C}_{ijkl} \quad (2)$$

其中 I 为四阶单位张量;正交各向异性材料的损伤张量 D 用主应变方向的损伤变量来描述,即对正交

各向异性材料,正应力的作用不产生剪应变,剪应力的作用也不产生正应变,也不在其他平面产生剪应变。正应变引起的损伤由 D_1, D_2, D_3 表示, $x-y, x-z, y-z$ 平面上的剪应变引起的损伤由 D_4, D_5, D_6 来表示。在这里,材料的剪切应变损伤认为是由正应变方向的损伤引起的,剪切损伤是被动的,并不存在独立的由剪切应变引起的损伤。因此,相应的剪切损伤定义为:

$$D_4 = 1 - \sqrt{(1-D_1)(1-D_2)} \quad (3)$$

$$D_5 = 1 - \sqrt{(1-D_1)(1-D_3)} \quad (4)$$

$$D_6 = 1 - \sqrt{(1-D_2)(1-D_3)} \quad (5)$$

则得到四阶对称损伤张量的表达式为^[12]

$$D = \begin{bmatrix} D_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-C \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 $A = \sqrt{(1-D_1)(1-D_2)}$, $B = \sqrt{(1-D_1)(1-D_3)}$, $C = \sqrt{(1-D_2)(1-D_3)}$ 。

2.2 正交各向异性材料的损伤模型与张量分解

对于正交各向异性弹性体,广义虎克定律的一般形式为:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (7)$$

式中 C_{ijkl} 为刚度张量。这里采用特征值分解法,若记 λ 为 C_{ijkl} 的特征张量矩阵, $\bar{\epsilon}_{kl}$ 是相应的正则特征向量,则

$$C_{ijkl} \bar{\epsilon}_{kl} = \lambda \bar{\epsilon}_{kl} \quad (8)$$

上式可改写为

$$C_{ijkl} = \sum_{A=1}^6 \lambda_A \bar{\epsilon}_{ij}^A \bar{\epsilon}_{kl}^A \quad (9)$$

式中 λ_A 为第 A 个特征值, $\bar{\epsilon}_{ij}^A$ 为对应 λ_A 的正则特征向量,则正交各向异性弹性材料的应力张量可记为

$$\sigma_{ij} = \sum_{A=1}^6 \lambda_A \bar{\epsilon}_{ij}^A \bar{\epsilon}_{kl}^A \epsilon_{kl} \quad (10)$$

考虑到损伤时的刚度张量为

$$C_{ijkl} = \sum_{A=1}^6 (1-D_A) \lambda_A \bar{\epsilon}_{ij}^A \bar{\epsilon}_{kl}^A \quad (11)$$

则带损伤的应力张量可表示为

$$\sigma_{ij} = \sum_{A=1}^6 (1 - D_A) \lambda_A \bar{\epsilon}_{ij}^A \bar{\epsilon}_{kl}^A \epsilon_{ij} \quad (12)$$

可得到相应的应力增量为

$$\Delta \sigma_{ij} = \sum_{A=1}^6 \lambda_A \bar{\epsilon}_{ij}^A \bar{\epsilon}_{kl}^A [(1 - D_A) \Delta \epsilon_{ij} - \Delta D_A \epsilon_{ij}] \quad (13)$$

2.3 损伤演化曲线

对损伤演化规律，采用的是分段损伤模型，典型的损伤演化曲线如图 1 所示。在此模型中，应力应变-关系分成两个阶段。第 1 阶段为应力达到峰值之前，即 $\epsilon < \epsilon_c$ 时，材料没有损伤，即 $D = 0$ 。第 2 阶段为 $\epsilon > \epsilon_c$ 时，损伤按分段线形关系演化，这主要是为数值模拟中方便使用且计算快速而设定，因为每次迭代计算应变时，都要进行损伤变量的修正，选择分段线性关系计算效率较高。

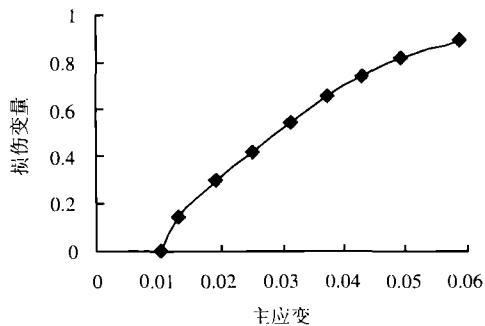


图 1 主方向上的损伤演化曲线

Fig.1 The damage evolution within an eigenmode

3 数值模拟的实现

为验证上述模型并用于数值模拟岩石材料的破坏过程，基于大型有限元分析程序 ABAQUS，通过将上述模型编写用户材料子程序，并嵌入到显式有限元算法 ABAQUS/EXPLICIT SOLVER 中进行求解。

4 算例

本算例采用的是岩石力学中的标准试验，岩石试样长 100 mm，直径 50 mm。弹性模量 $E = 26.5$ GPa，泊松比为 0.23，重度为 25 kN/m³，拉伸强度为 28 MPa，抗压强度为 280 MPa。图 2 给出的是模拟得到的轴向应力-应变曲线。图 3 为岩石的破坏过程，其中图 3(g)和图 3(h)为达到完全破坏时从不同角度观察模拟的结果。由计算结果可以看出，整个模型是一种剪切破坏，这与很多岩石试验的结果相符合。

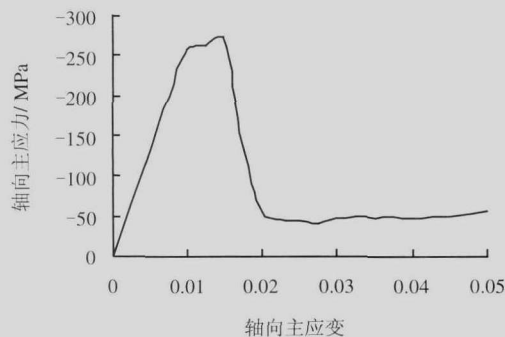


图 2 计算得到的轴向应力-应变曲线

Fig.2 Simulating result of stress versus strain in the axial direction under uniaxial compression

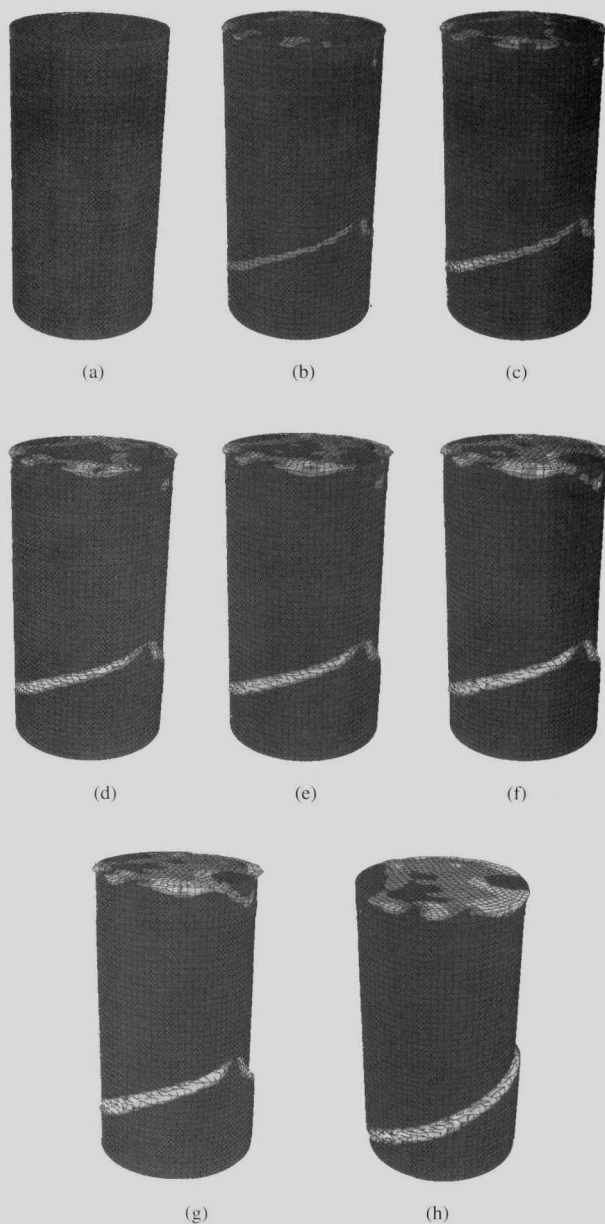


图 3 岩石试样轴向压缩破坏过程的模拟结果

Fig.3 Simulating failure process of a rock sample under uniaxial compression

5 结 语

给出了岩石材料破坏的三维各向异性损伤模型, 并利用张量分解法推导了考虑损伤时的应力增量。以该模型为基础, 以大型软件ABAQUS为平台, 开发了动态显式有限元计算程序, 并将该程序嵌入到ABAQUS/EXPLICIT SOLVER中, 通过数值模拟验证了该模型的有效性。

参 考 文 献

- [1] 李建林, 孟庆义. 卸载岩体的各向异性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 338—341.
LI Jian-lin, MONG Qing-yi, Anisotropic study of unloaded rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(3): 338—341
- [2] 哈秋龄. 三峡工程永久船闸陡高边坡各向异性卸荷岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 603—618.
HA Qiu-ling. Study on anisotropic unloading rock mass mechanics for the steep-high rock slope of Three Gorges Project permanent shiplock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(5): 603—618.
- [3] 张晓春, 杨挺青, 缪协兴. 岩石裂纹演化及其力学特性的研究进展[J]. 力学进展, 1999, 29(1): 97—104
ZHANG Xiao-chun, YANG Ting-qing, MIAO Xie-xing, The new advances of cracks development and mechanical properties of rock[J]. **Advances in Mechanics**, 1999, 29(1): 97—104.
- [4] 朱维申, 张强勇. 节理岩体脆弹性断裂损伤模型及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 245—249.
ZHU Wei-shen, ZHANG Qiang-yong. Brittle elastic fracture damage constitutive model of jointed rockmass and its application to engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(3): 245—249.
- [5] Dragon A, Halm D, Desoyer Th. Anisotropic damage in quasi-brittle solids: modelling, computational issues and applications[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 2000, 183: 331—352.
- [6] ZHANG Yong-qiang, HAO Hong, LU Yong. Anisotropic dynamic damage and fragmentation of rock materials under explosive loading[J]. **International Journal of Engineering Science**, 2003, 41: 917—929.
- [7] 沈新普, 泽农·慕容子, 徐秉业. 岩土材料弹塑性正交异性损伤耦合本构理论[J]. 应用数学和力学, 2001, 22(9): 927—933.
SHEN Xin-pu, Zenon Mroz, XU Bing-ye, Constitutive theory of plasticity coupled with orthotropic damage for geomaterials[J]. **Applied mathematics and Mechanics**, 2001, 22(9): 927—933.
- [8] 王春秋. 正交各向异性对岩体洞室破坏影响的模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增 2): 2 492—2 495.
WANG Chun-qiu, Simulations on the effect of ortho-anisotropy of rock mass on cave failure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(supp.2): 2 492—2 495.
- [9] 余天堂. 岩土材料固有各向异性的模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1 604—1 607.
YU Tian-tang. Modeling of inherent anisotropy for geotechnical material[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(10): 1 604—1 607.
- [10] Mosler J, Bruhns O T. A 3D anisotropic elastoplastic-damage model using discontinuous displacement fields[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 2004, 60: 923—948.
- [11] Lemaitre J. A Continuous Damage Mechanics Model for Ductile Fracture[J]. **J. of Engineering Materials and Technology**, 1983, 107: 83—89.
- [12] Zhu Y, Cescotto S. A fully coupled elastic- visco- plastic damage theory for anisotropic materials[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 1995, 32(11): 1 607—1 641.