

# 节理岩体宏微观损伤耦合的三维本构模型研究

刘红岩<sup>1,2</sup>, 吕淑然<sup>3</sup>, 丹增卓玛<sup>2</sup>, 张吉宏<sup>4,5</sup>

- (1. 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100083; 2. 西藏大学 工学院, 西藏 拉萨 850000;  
3. 首都经济贸易大学 安全与环境工程学院, 北京 100026; 4. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710064;  
5. 中国有色金属工业西安勘察设计研究院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 提出了考虑宏微观损伤耦合的节理岩体本构模型, 其中微观损伤模型采用基于应变强度准则和岩石微元强度服从 Weibull 分布的统计损伤模型, 将其应用于被节理切割而成岩块。节理岩体损伤张量计算是该模型的一个关键问题, 在已有的二维问题损伤张量计算方法的基础上对三维问题损伤张量计算方法进行了讨论。结果表明, 所提出的本构模型能够较好地反映宏、微观两类损伤对岩体力学性能的影响。也能够较好地反映试件强度随围压的变化规律, 因而较为合理。

**关键词:** 节理岩体; 本构模型; 宏观损伤; 微观损伤; 耦合

中图分类号: O382<sup>+</sup>.2

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2013)03—0085—04

## Study on 3-D Constitutive Model for Jointed Rock Mass by Coupling Macroscopic and Microscopic Damage

LIU Hong-yan<sup>1,2</sup>, LV Shu-ran<sup>3</sup>, Danzeng Zhuo-ma<sup>2</sup>, ZHANG Ji-hong<sup>4,5</sup>

- (1. College of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;  
2. College of Engineering, Tibet University, Lasa, Xizang 850000, China;  
3. College of Safety and Environment Engineering, Capital University of Economics and Business, Beijing 100026, China;  
4. College of Geological Engineering and Surveying-mapping, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China;  
5. Xi'an Investigation and Design Institute of China Non-ferrous Metals Industry, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** The constitutive model of jointed rock mass is proposed here by coupling macroscopic and microscopic damage. The microscopic damage model adopts the statistical model based on strain strength criterion and Weibull distribution of rock-element's strength, which is used for rock blocks cut by joints. The calculation for the damage tensor of jointed rock mass is a key issue to this model. Therefore, the calculation method for the damage tensor in 3-dimensional space is discussed based on that in 2-dimensional space. The calculation results show that the constitutive model proposed here could better reflect the effect of macroscopic and microscopic damage on the mechanical proper of rock mass, and perfectly reflect the change law of specimen's strength with confining pressure, which is rather reasonable.

**Keywords:** jointed rock mass; constitutive model; macroscopic damage; microscopic damage; coupling

## 0 引言

自然界中的岩体都是被节理、裂隙切割而成的非连续介质, 已有的研究也充分表明节理对岩体的物理力学性质有很大影响, 不能被忽略<sup>[1-2]</sup>。经过前人的不懈努力, 目前一些问题已经得到初步解决<sup>[3]</sup>, 如对于宽度较大的断层带, 可用弹塑性理论处

理; 对于较薄的软弱夹层, 可以使用节理单元; 对于层理发育的层状岩体, 工程上则常用层状材料模型<sup>[4]</sup>。对于被大量相对较小的节理裂隙切割的岩体, 目前众多学者提出了采用损伤力学的方法来研究这类特殊岩体<sup>[4-6]</sup>, 即把这些宏观节理裂隙看作是岩体的一种天然损伤。虽然这种方法有效地解决了节理岩体的力学计算问题, 但却存在明显缺陷, 因

收稿日期: 2012-10-29

修稿日期: 2012-11-22

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2010ZY45); 国家自然科学基金项目(41002113, 41162009); 教育部科学技术研究重点项目(2111175); 2011年度北京市属高等学校人才强教深化计划人才创新团队项目(PHR201107143)

作者简介: 刘红岩(1975—), 男, 河南扶沟人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程方面的教学与科研工作。

为岩体是由节理和岩石块体组成,虽然节理岩体损伤模型很好地考虑了节理裂隙等宏观损伤对岩体的影响,然而却没有考虑岩石块体内部存在的微裂隙、微孔洞等微观损伤,众所周知岩石是一种天然损伤材料,这些微观损伤是不会因为节理裂隙等宏观损伤的存在而消失。目前很多学者对宏观相对完整的岩石损伤本构模型进行了研究,结果表明岩石内部微观损伤及演化对其力学特性有很大影响,不可忽视<sup>[7-9]</sup>。因此如何综合考虑节理岩体中的宏微观损伤对其力学性能的影响则为亟待解决的一个重要课题。

本文把岩体看作是由节理裂隙网络和岩石块体组成的复合体,首先分别计算节理裂隙等宏观损伤和微裂纹等微观损伤的损伤变量,然后根据叠加原理建立综合考虑宏微观损伤的节理岩体力学模型,最后对该模型的合理性进行了初步讨论。

## 1 考虑微观损伤的岩石损伤模型

岩石内部随机分布着各种各样的微缺陷,而统计损伤力学正是研究这些随机缺陷的产生、扩展及汇合过程及其对力学性质影响规律的有利工具,它将岩石内部损伤程度以微元强度加以量化,并根据岩石内部损伤服从随机分布的特点,假定岩石内部缺陷服从某种分布,建立岩石损伤统计本构模型,使岩石本构关系研究取得了很大进展<sup>[10-11]</sup>。目前岩石统计损伤模型的建立主要依据以下两方面:一是不同的岩石微元强度准则,如应变准则、Mohr - Coulomb 准则、Drucker - Prager 准则或 Hoek - Brown 准则等;二是认为岩石微元强度服从不同的分布,如幂函数分布、Weibull 分布或对数正态分布等。研究表明基于 Weibull 分布的损伤模型要优于基于幂函数分布的损伤模型,且计算相对简单<sup>[12]</sup>。因此,本文就采用基于应变强度准则和 Weibull 分布的损伤模型进行研究。

假定岩石微元强度服从 Weibull 分布,其概率密度函数为<sup>[13]</sup>:

$$P(\epsilon) = \frac{m}{\epsilon_0} \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^{m-1} \exp \left[ - \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中:  $P(\epsilon)$  为岩石微元强度分布函数;  $\epsilon$  为微元强度随机分布的分布变量,由于这里采用应变强度理论,因此指的是应变;  $m$ 、 $\epsilon_0$  为分布参数。

进而可得到岩石的损伤变量及本构方程为<sup>[13]</sup>:

$$D = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^m \right] \quad (2)$$

$$\sigma_1 = E \epsilon_1 \exp \left[ - \left( \frac{\epsilon_1}{\epsilon_0} \right)^m \right] + \nu (\sigma_2 + \sigma_3) \quad (3)$$

式中:  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  分别为第一、二、三主应力;  $E$ 、 $\nu$  分别为岩石弹性模量和泊松比。

常数  $m$  和  $\epsilon_0$  可通过对已有试验数据的拟合获得,这在相关文献中已有阐述,本文不再重述<sup>[13]</sup>。

## 2 考虑宏观损伤的岩体损伤模型

由于节理裂隙等宏观缺陷的存在将导致岩体力学性质的弱化及各向异性,目前常采用损伤力学的方法来反映这种影响。假定损伤后的岩体本构关系仍服从虎克定律,则节理裂隙对岩体的损伤就表现为弹性常数的弱化,即三维节理岩体的弹性张量与损伤张量之间关系可表示为:

$$[E] = (I - \Omega) : [E_0] \quad (4)$$

其中:  $[E_0]$ 、 $[E]$  分别为三维完整岩块和节理岩体的四阶弹性张量;  $I$  为四阶单位张量;  $\Omega$  为节理岩体四阶损伤张量。

因此节理岩体损伤本构模型的确定就归结为损伤张量的计算。下面首先讨论平面二维问题的节理岩体损伤张量计算方法,然后推广到三维的情形。目前常用二阶张量描述平面二维问题的节理岩体各向异性损伤,许多学者基于不同角度也提出了多种不同定义方法。如 Kyoya T 等<sup>[14]</sup> 将含有一组平行节理的岩体损伤张量定义为:

$$\Omega = \frac{l}{V} \sum_{k=1}^N a_k (n_k \otimes n_k) \quad (5)$$

式中:  $\Omega$  为节理岩体损伤张量;  $l$  为节理平均间距;  $V$  为样本体积;  $N$  为样本中节理数;  $a_k$  为样本中第  $k$  条节理表面积;  $n_k$  为样本中第  $k$  条节理表面上的单位法向矢量。

孙卫军等<sup>[3]</sup> 假定节理面是一个无厚度、二维延展的圆盘,应用岩体结构的概率统计模型,可以估算节理岩体的损伤张量。例如对于第  $i$  组节理,建议用下式表示其损伤变量:

$$D_i = \left[ 1 - \exp \left( - \frac{\pi}{4} \lambda_i d_i^2 \right) \right] n_i n_i \quad (6)$$

式中:  $\lambda_i$  为第  $i$  组节理面密度(条/ $\text{m}^2$ );  $d_i$  为第  $i$  组节理平均直径,一般取为平面上的迹长;  $n_i$  为第  $i$  组节理的单位法向矢量。同时还有其他一些学者也提出了类似的节理岩体损伤变量计算方法。

上述节理岩体损伤变量的计算公式是针对含单组节理的岩体,而对于含有  $m$  组节理的岩体,其总体损伤  $\Omega$  通常表示为:  $\Omega = \sum_{i=1}^m \Omega_i$  (7)

以上是平面二维节理岩体损伤变量计算方法, 即其损伤张量是二阶的, 同时由于二维问题的弹性张量也为二阶张量, 因此式(6) 满足张量运算法则。而如果对于三维问题, 其弹性张量为四阶, 因此根据式(6) 其损伤张量也应该为四阶。高玉臣等<sup>[15]</sup> 引入四阶张量来表示空间三维问题的损伤张量, 如以式(6) 为例, 则其空间三维问题的节理岩体损伤变量为:

$$D_i = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{4}\lambda_i d_i^2\right) \right] n_i n_i n_i n_i \quad (8)$$

### 3 宏微观损伤耦合的岩体损伤模型

由前述可知, 节理岩体同时存在宏微观两种损伤, 二者的存在都起到了弱化岩体刚度和强度的作用, 因此在节理岩体力学分析中应综合考虑两种不同损伤的共同作用。由于微损伤是各向同性, 而宏观节理、裂隙造成的损伤却具有明显的各向异性, 由式(4) 可知 $[E_0]$  为完整无损岩石的弹性模量, 结合式(3) 可以得到综合考虑宏微观两种损伤的节理岩体本构模型为:

$$\{\sigma\} = (I - \Omega) : [E_0](1 - D)\{\epsilon\} \quad (9)$$

### 4 算例分析

为了说明本文所提出模型的合理性, 引用文献[16] 的试验资料对其进行分析。试验所用试件为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的红砂岩标准试件。岩石弹性模量为 6 949 MPa、泊松比为 0.22。其单轴压缩试验曲线如图 1 所示。由于单轴压缩可简化为二维问题, 因此首先采用二维问题的分析方法进行分析。将弹性模量、泊松比及应力 - 应变曲线试验数据通过拟合可得:  $m = 3.3352, \epsilon_0 = 0.0128$ 。将分布参数以及实测试验数据代入式(3) 即可得到仅考虑微观损伤时岩石破坏过程中的理论本构模型曲线, 与试验曲线的比较如图 1 所示, 可以发现二者吻合较好。

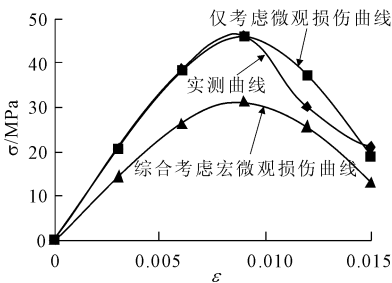


图 1 试验曲线与理论曲线对比图

假设试件内存在宏观节理裂隙, 如图 2 所示, 那么它将对岩体产生宏观的各向异性损伤, 这里采用

式(6) 计算其损伤张量。外法线方向为故裂隙的外法线方向为  $n = [1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{2}, 0]$ ,  $\lambda_i = 200 \text{ 条/m}^2$ ,  $d_i = 0.071 \text{ m}$ 。计算可得其损伤张量为:

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0.27 & 0.27 & 0 \\ 0.27 & 0.27 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

结合岩石的弹性常数, 根据式(9) 经计算可得其垂直方向上的轴向应变与应力关系为:  $\epsilon_1 = \frac{0.2098}{1 - D}\sigma_1 \times 10^{-3}$ , 其中  $D$  由式(2) 确定。由此得到综合考虑宏微观损伤的应力 - 应变曲线如图 1 所示。可以看出: 当岩石内部仅含有微观损伤时, 基于 Weibull 分布的微观损伤模型能够较好地反映岩石的应力 - 应变曲线特征, 特别是在峰值强度之前, 理论曲线与试验曲线吻合很好。但当岩体内含有节理裂隙等宏观缺陷时, 其力学性质明显软化, 表现为在产生同样的轴向应变时, 所需应力大大减小。对本算例而言, 含宏观节理岩体的峰值应力为 31.5 MPa, 仅为不含宏观节理岩体的 68.6%, 这说明节理的存在大大削弱了岩体的强度, 降低了其刚度, 增大了其柔性。

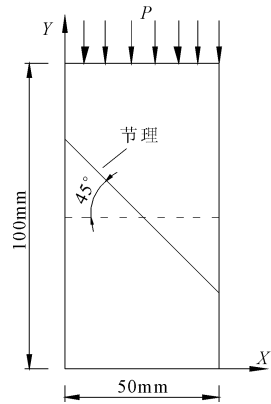


图 2 计算模型示意图

上述是没有考虑试件受到围压时的二维问题, 属于三维问题的特例。下面利用本文建立的考虑宏微观损伤的力学模型分析围压对试件强度及变形的影响, 即考虑真三维问题。由于空间问题的弹性张量为四阶张量, 有 81 个分量, 而根据弹性力学理论<sup>[17]</sup>, 完全各向异性体的独立弹性常数也仅为 21 个。因此根据 Vogit 对称性, 四阶弹性张量可以缩写为  $6 \times 6$  的矩阵<sup>[18]</sup>, 同样四阶损伤张量也可以缩写为  $6 \times 6$  的矩阵。而式(8) 中  $n_i$  为一阶张量, 即矢量, 而  $n_i n_i$  则为对称的二阶张量, 有 6 个独立分量, 则可以用  $6 \times 1$  的矩阵来表示, 即  $[n_1 \ n_2 \ n_3 \ n_4 \ n_5 \ n_6]^T$ , 那么根据张量并乘法,  $n_i n_i n_i n_i$  则可表示为  $6 \times 6$  的矩阵。图 2 所示节理岩体的三维损伤张量由式(8) 计算得:

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0.073 & 0.073 & 0 & 0 & 0 & 0.073 \\ 0.073 & 0.073 & 0 & 0 & 0 & 0.073 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.073 & 0.073 & 0 & 0 & 0 & 0.073 \end{bmatrix}, \text{假设三轴}$$

压缩的围压为  $\sigma_3$ , 结合岩石的弹性常数, 根据式(9)经计算可得其垂直方向上的轴向应变与应力关系为:  $\epsilon_x = \frac{10^{-3}}{1-D}(0.1596\sigma_1 - 0.08\sigma_3)$ , 其中  $D$  由式(2)确定。

假设围压分别为 10 MPa、20 MPa 和 30 MPa, 则试件的应力 - 应变曲线与围压的关系如图 3 所示。由图 3 可以看出随着围压的增加, 试件强度逐渐增大, 这与已有的理论和试验研究结论是一致的, 这也从另一个侧面说明了该三维本构模型具有一定的合理性。

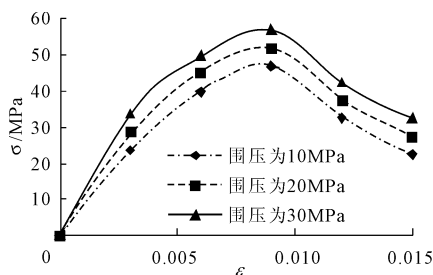


图 3 三轴压缩试验  $\sigma - \epsilon$  曲线与围压关系

## 5 结 论

(1) 岩体中存在的宏微观缺陷对其力学性质的影响分析认为, 对于同时存在微观裂隙与宏观节理的岩体应同时考虑宏微观两种损伤对岩体力学性质的影响, 并根据已有的宏、微观损伤力学模型, 建立了考虑宏微观损伤耦合的节理岩体本构模型。

(2) 通过引用相关的试验资料对本文模型进行了初步验证, 表明本文提出的模型具有一定的合理性。同时通过算例表明, 宏观节理的存在大大削弱了岩体的强度, 降低了其刚度, 增大了其柔性。

(3) 在对节理岩体三维损伤变量计算方法进行说明的基础上, 利用本文提出的三维本构模型对不同围压下的节理岩体应力 - 应变曲线进行了探讨, 说明了围压对试件强度及变形的影响, 与已有研究结论符合, 同时也初步说明了该模型的合理性。

(4) 本文所采用的算例为含贯通节理的岩体, 因此未涉及在外力作用下节理扩展而导致的宏观损伤演化问题, 这有待进一步的深入研究。

## 参考文献:

- [1] Kulatilake P H S W, He W, Um J, et al. A physical model study of jointed rock mass strength under uniaxial compressive loading[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, 1997, 34(3-4):165.
- [2] Wang T T, Huang T W. A constitutive model for the deformation of a rock mass containing sets of ubiquitous joints[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, 2009, 46(3):521-530.
- [3] 孙卫军, 周维垣. 裂隙岩体弹塑性 - 损伤本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 1990, 9(2):108-119.
- [4] 景 锋, 冷先伦, 朱泽奇. 层状岩坡变形破坏及其治理的离散元分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2010, 8(4):61-64.
- [5] Kawamoto T, Ichikawa Y, Kyoya T. Deformation and fracturing behavior of discontinuous rock mass and damage mechanics theory[J]. Int. Journal of Numer. Anal. Meth. Geomech, 1988, 12(1):1-30.
- [6] Chan K S, Boder S K, Fossum A E. A damage mechanics treatment of creep failure in rock salt[J]. Int. Journal of Dama. Meth., 1997, (6):121-152.
- [7] Hamdi E, Romdhane N B, Cleac'h J M Le. A tensile damage model for rocks: Application to blast induced damage assessment[J]. Computers And Geotechnics, 2011, 38(2):133-141.
- [8] Zhou J W, Xu W Y, Yang X G. A microcrack damage model for brittle rocks under uniaxial compression[J]. Mechanics Research Communications, 2010, 37(4):399-405.
- [9] Kaushik Dey, Murthy V M S R. Rock damage due to blasting and its control in underground drivages[J]. The Indian Mining & Engineering Journal, 2009, 48(12):34-40.
- [10] 蒋 维, 邓 建, 李 隐. 基于对数正态分布的岩石损伤本构模型研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(6):1190-1194.
- [11] 杨建平, 陈卫忠, 黄 胜. 一种岩石统计损伤本构模型研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(S2):7-11.
- [12] 岳 洋. 基于不同分布的岩石损伤本构模型比较[J]. 山西建筑, 2010, 36(24):137-138.
- [13] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
- [14] Kyoya T, Ichikawa Y, Kawamoto T. A damage mechanics theory for discontinuous rock mass[C]//Proc. of the 5th Int. Conf. Num. Methods in Geomechanics. Nagoya, Japan, 1985:469-480.
- [15] 高玉臣, 朱 葳. 含微裂纹材料的损伤理论[J]. 力学学报, 1987, 19(6):541-549.
- [16] 凌建明, 孙 钧. 脆性岩石的细观裂纹损伤及其时效特征[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(4):304-312.
- [17] 沈观林, 胡更开. 复合材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006:29-39.
- [18] 易顺民, 朱珍德. 裂隙岩体损伤力学导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005:21-24.