

# 单轴作用下岩土材料的双重介质本构模型<sup>\*</sup>

刘晓丽<sup>1</sup>, 王思敬<sup>2</sup>, 王恩志<sup>1</sup>, 薛 强<sup>3</sup>

- (1. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084;
2. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029;
3. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

(谢和平推荐)

**摘要:** 基于弹塑性力学和损伤力学理论, 将岩土材料视为孔隙\_裂隙双重介质, 假设孔隙介质不发生损伤, 而裂隙介质随应变的增加发生损伤, 建立了单轴作用下岩土类材料的双重介质本构模型隐式表达式, 并利用 Newton 迭代法得出了材料的全程应力\_应变曲线。分析结果表明, 岩土材料中裂隙空间展布的多态性(均匀展布、集中展布和随机展布)是岩土材料本构关系千变万化的根本原因。由于双重介质本构模型将岩土材料的弹性主体(孔隙介质部分)和损伤主体(裂隙介质部分)分化开来, 对于研究岩土或含损伤材料的破坏具有实用价值和理论意义。

**关键词:** 岩土材料; 地质材料; 双重介质; 本构模型; 损伤  
**中图分类号:** TU45; O346.5      **文献标识码:** A

## 引 言

随着岩体工程规模越来越大、复杂程度越来越高, 人们对岩土材料的认识越来越深。岩体是富含有一系列软弱结构面和裂隙的天然地质体, 成岩作用以及成岩环境的差异或随机性造成了岩体宏观结构和微观结构上的非均质性、各向异性和不连续性, 再加上不同地应力环境及其变化, 形成了岩体中大量方向各异的岩体结构面。试验研究结果表明, 岩体连续介质模型尽管可以应用成熟的连续介质理论来研究, 但当裂隙分布稀疏时, 与实际情况出入较大; 离散介质模型精度高、拟真性好, 但它要求搞清每条裂隙的空间展布, 这在现有的技术条件下很难实现。双重介质模型视岩体内孔隙和小裂隙为孔隙结构, 而将结构面、节理、裂隙统一视为裂隙结构, 能够真实地反映地质岩土体的真实结构。

岩土体的双重介质模型最早是由前苏联学者 Barenblatt(1960 年)在分析岩体渗流过程中提出的<sup>[1]</sup>, 他假设岩体是由孔隙和裂隙组成的孔隙\_裂隙双重介质空隙结构。此后岩土体的双重介质模型也都是针对渗流问题的研究, 将岩土类材料视为孔隙\_裂隙双重介质来研究其本构关系, 本文尚属首次。

本文将岩土类材料视为孔隙\_裂隙双重介质<sup>[2]</sup>, 空间上, 孔隙均匀分布, 裂隙有集中展布、

\* 收稿日期: 2005-04-05; 修订日期: 2006-06-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50374041); 国家“十五”攻关项目(2001BA803B0404)

作者简介: 刘晓丽(1978—), 男, 山东泰安人, 博士生, 主要从事地下流固耦合理论与应用及环境岩土工程方面的研究(联系人, Tel: + 86\_10\_62794910; E\_mail: liuxl04@mails.tsinghua.edu.cn)。

均匀展布和随机展布 3 种情况。假设孔隙结构不发生损伤, 而裂隙结构随材料的应变发生损伤, 建立了岩土类材料的双重介质本构模型隐式表达式, 得出了材料的全程应力-应变曲线。分析结果表明, 岩土材料中裂隙空间展布的多态性, 是岩土材料本构关系千变万化的根本原因。由于双重介质本构模型将岩土材料的弹性主体(孔隙体)和损伤主体(裂隙体)分化开来, 因此, 本文对于研究岩土或含损伤材料的破坏具有实用价值和理论意义。

## 1 岩土类材料孔隙、裂隙的演化规律

### 1.1 岩土类材料变形的连续性方程

#### 1.1.1 孔隙介质连续性方程

$$\frac{\partial(\rho_{(p)s})}{\partial t} + \text{div}(\rho_{(p)s} \mathbf{v}_{(p)s}) = 0, \quad (1)$$

式中  $\rho_{(p)s}$  为孔隙结构密度, 若设岩石颗粒密度为  $\rho_s$ , 则  $\rho_{(p)s} = \rho_s(1 - \phi_{(p)})$ ;  $\mathbf{v}_{(p)s}$  为孔隙岩块运动速度;  $\phi_{(p)}$  为孔隙岩块孔隙度。因岩层颗粒一般比较坚硬致密, 可设岩层颗粒密度不变, 即  $\rho_s = \text{const}$ , 则有

$$\frac{\partial(1 - \phi_{(p)})}{\partial t} + \text{div}((1 - \phi_{(p)}) \mathbf{v}_{(p)s}) = 0, \quad (2a)$$

$$\text{或} \quad d(1 - \phi_{(p)})/dt + (1 - \phi_{(p)}) \text{div} \mathbf{v}_{(p)s} = 0 \quad (2b)$$

式(2)为孔隙度变化与孔隙骨架位移速度变量之间的关系式, 可统一反映线性或非线性变形过程中孔隙度的变化情况。

#### 1.1.2 裂隙介质连续性方程

$$\frac{\partial(\rho_{(f)s})}{\partial t} + \text{div}(\rho_{(f)s} \mathbf{v}_{(f)s}) = 0, \quad (3)$$

式中  $\rho_{(f)s}$  为裂隙结构密度,  $\rho_{(f)s} = \rho_{(p)s}(1 - \phi_{(f)}) = \rho_s(1 - \phi_{(p)})(1 - \phi_{(f)})$ ;  $\mathbf{v}_{(f)s}$  为裂隙骨架运动速度;  $\phi_{(f)}$  为裂隙骨架孔隙度。当  $\rho_s = \text{const}$ , 有

$$\frac{\partial[(1 - \phi_{(p)})(1 - \phi_{(f)})]}{\partial t} + \text{div}[(1 - \phi_{(p)})(1 - \phi_{(f)}) \mathbf{v}_{(f)s}] = 0 \quad (4)$$

$$\text{或} \quad (1 - \phi_{(p)}) \left[ \frac{d(1 - \phi_{(f)})}{dt} + (1 - \phi_{(f)}) \text{div} \mathbf{v}_{(f)s} \right] + (1 - \phi_{(f)}) \left[ \frac{d(1 - \phi_{(p)})}{dt} + (1 - \phi_{(p)}) \text{div} \mathbf{v}_{(f)s} \right] = 0 \quad (5a)$$

$$\text{或} \quad \lambda_1 \left[ \frac{d(1 - \phi_{(f)})}{dt} + (1 - \phi_{(f)}) \text{div} \mathbf{v}_{(f)s} \right] + \lambda_2 \left[ \frac{d(1 - \phi_{(p)})}{dt} + (1 - \phi_{(p)}) \text{div} \mathbf{v}_{(f)s} \right] = 0, \quad (5b)$$

$$\text{其中} \quad \lambda_1 = \frac{(1 - \phi_{(p)})}{(1 - \phi_{(p)}) + (1 - \phi_{(f)})}, \quad \lambda_2 = \frac{(1 - \phi_{(f)})}{(1 - \phi_{(p)}) + (1 - \phi_{(f)})}$$

式(5)为孔隙度、裂隙度变化与孔隙、裂隙骨架位移速度变量之间的关系式, 可统一反映线性或非线性变形过程中孔隙度、裂隙度的演化。而  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  作为孔隙系统和裂隙系统之间的相互影响权重, 反映了双重介质孔隙部分和裂隙部分在力学功能上的相互影响。

### 1.2 载荷作用下孔隙、裂隙的演化规律

在小变形假设下, 式(2b)和(5a)分别化为

$$\frac{\partial(1 - \phi_{(p)})}{\partial t} + (1 - \phi_{(p)}) \text{div} \mathbf{v}_{(p)s} = 0, \quad (6)$$

$$(1 - \phi_{(p)}) \left[ \frac{\partial(1 - \phi_{(f)})}{\partial t} + (1 - \phi_{(f)}) \text{div} \mathbf{v}_{(f)s} \right] + (1 - \phi_{(f)}) \left[ \frac{\partial(1 - \phi_{(p)})}{\partial t} + (1 - \phi_{(p)}) \text{div} \mathbf{v}_{(f)s} \right] = 0, \quad (7)$$

且

$$\dot{\boldsymbol{\nu}}_{(p)s} = \dot{\boldsymbol{\nu}}_{(p)s} \cdot \left\{ \frac{\partial \mathbf{u}_{(p)s}}{\partial t} \right\} = \frac{\partial}{\partial t} (\dot{\boldsymbol{\nu}}_{(p)s} \cdot \mathbf{u}_{(p)s}) = \frac{\partial}{\partial t} (\boldsymbol{\varepsilon}_{(p)v}), \quad (8)$$

$$\dot{\boldsymbol{\nu}}_{(f)s} = \dot{\boldsymbol{\nu}}_{(f)s} \cdot \left\{ \frac{\partial \mathbf{u}_{(f)s}}{\partial t} \right\} = \frac{\partial}{\partial t} (\dot{\boldsymbol{\nu}}_{(f)s} \cdot \mathbf{u}_{(f)s}) = \frac{\partial}{\partial t} (\boldsymbol{\varepsilon}_{(f)v}), \quad (9)$$

式中,  $\mathbf{u}_{(p)s}$ 、 $\mathbf{u}_{(f)s}$  分别为孔隙体和裂隙体的位移,  $\boldsymbol{\varepsilon}_{(p)v}$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}_{(f)v}$  为孔隙体和裂隙体的体积应变。将式(8)和(9)代入式(6)和(7), 就得到了双重介质骨架以下形式的连续性方程或孔隙、裂隙度演化方程:

$$\frac{\partial(1-\phi_{(p)})}{\partial t} + (1-\phi_{(p)}) \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}_{(p)v}}{\partial t} = 0, \quad (10)$$

$$(1-\phi_{(p)}) \left[ \frac{\partial(1-\phi_{(f)})}{\partial t} + (1-\phi_{(f)}) \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}_{(f)v}}{\partial t} \right] + (1-\phi_{(f)}) \left[ \frac{\partial(1-\phi_{(p)})}{\partial t} + (1-\phi_{(p)}) \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}_{(f)v}}{\partial t} \right] = 0. \quad (11)$$

对式(10)进行积分, 可得

$$1-\phi_{(p)} = (1-\phi_{(p)0}) \cdot e^{-\boldsymbol{\varepsilon}_{(p)v}} \text{ 或 } \phi_{(p)} = 1 - (1-\phi_{(p)0}) \cdot e^{-\boldsymbol{\varepsilon}_{(p)v}}. \quad (12)$$

将式(12)代入式(11), 并对式(11)进行积分, 得

$$1-\phi_{(f)} = (1-\phi_{(f)0}) \cdot e^{-(2\boldsymbol{\varepsilon}_{(f)v} - \boldsymbol{\varepsilon}_{(p)v})} \text{ 或 } \phi_{(f)} = 1 - (1-\phi_{(f)0}) \cdot e^{-(2\boldsymbol{\varepsilon}_{(f)v} - \boldsymbol{\varepsilon}_{(p)v})}. \quad (13)$$

式(12)和(13)定量化表述了应变条件下孔隙度、裂隙度的演化规律。

## 2 岩土类材料的双重介质本构模型

### 2.1 孔隙结构的本构模型

假设孔隙结构只发生弹性变形, 其线弹性本构方程为

$$\sigma_p = E_p \cdot \varepsilon_p \quad (14)$$

式中,  $\sigma_p$ 、 $\varepsilon_p$  分别为孔隙结构的应力和应变,  $E_p$  为孔隙结构的弹性模量。

### 2.2 裂隙结构的本构方程

考虑裂隙结构发生损伤, 则由损伤力学原理, 其本构方程可表示为

$$\sigma_f = E_f(1-D) \cdot \varepsilon_f \quad (15)$$

式中,  $\sigma_f$ 、 $\varepsilon_f$  分别为裂隙结构的应力和应变,  $E_f$  为裂隙结构的弹性模量。材料密度随损伤发展是变化的, 由Lemaitre理论取损伤变量如下式:

$$D = 1 - \rho/\rho_0, \quad (16)$$

式中,  $\rho_0$  和  $\rho$  分别为初始无损构形和损伤构形中的质量密度。岩土材料是典型的多孔介质, 其密度变化与岩石中的裂隙的发展演化关系密切相关, 因此如假设基体材料是不可压的, 则Lemaitre理论所定义的损伤与材料密度的关系式(16)可表示为

$$D = 1 - (1-\phi)/(1-\phi_0), \quad (17)$$

式中,  $\phi_0$  和  $\phi$  分别为材料的初始孔隙度和载荷作用下的孔隙度。式(17)表明, 损伤变量  $D$  作为材料内变量, 表征了损伤体内部裂隙的扩展。

本文将岩土类材料视为孔隙-裂隙双重介质, 由式(17), 损伤变量为

$$D = 1 - \frac{1-\phi_{(p)} - \phi_{(f)}}{1-\phi_{(p)0} - \phi_{(f)0}} \quad (18)$$

将式(12)和(13)代入式(18), 并考虑单轴载荷状态, 得

$$D = 1 - \frac{(1-\phi_{(p)0})e^{-\boldsymbol{\varepsilon}_p} + (1-\phi_{(f)0})e^{-(2\boldsymbol{\varepsilon}_f - \boldsymbol{\varepsilon}_p)} - 1}{1-\phi_{(p)0} - \phi_{(f)0}} \quad (19)$$

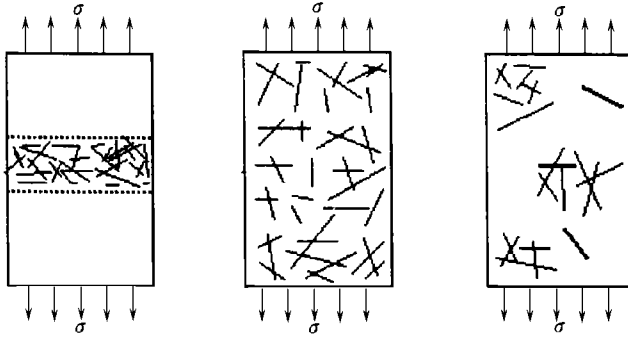
令  $1 - D = D$ , 则

$$D = \frac{(1 - \phi_{(p)0}) e^{-\varepsilon_p} + (1 - \phi_{(f)0}) e^{-(2\varepsilon_f - \varepsilon_p)} - 1}{1 - \phi_{(p)0} - \phi_{(f)0}} \quad (20)$$

### 2.3 具有带状集中分布或贯通裂隙的岩土类材料本构方程

具有带状分布或贯通裂隙的岩土类材料, 如图 1(a) 所示, 其裂隙结构和孔隙结构受力均为  $\sigma$  (如图 2), 即

$$\sigma_p = \sigma_f = \sigma \quad (21)$$



(a) 集中分布裂隙 (b) 均匀分布裂隙 (c) 随机分布裂隙

图 1 具有不同裂隙分布类型的岩土类材料

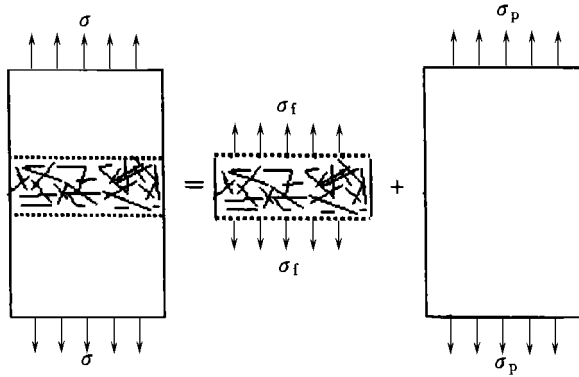


图 2 具有带状集中裂隙分布的岩土类材料受力分解图

由式 (14) 和 (15) 可以得出

$$\varepsilon_p + \varepsilon = \frac{\sigma_p}{E_p} + \frac{\sigma_f}{E_f D} \quad (22)$$

又因为  $\varepsilon = \varepsilon_p + \varepsilon_f$ , 由式 (21) 得

$$\varepsilon = \left( \frac{1}{E_p} + \frac{1}{E_f D} \right) \sigma \text{ 或 } D = \frac{\sigma E_p}{E_f (E_p \varepsilon - \sigma)} \quad (23)$$

由式 (21) 得

$$\sigma = E_p \varepsilon_p = E_f D \varepsilon_f$$

或 
$$\varepsilon_p = \frac{E_f D}{E_p} \varepsilon_f \quad (24)$$

于是, 得

$$\varepsilon_p = \frac{E_f D}{E_p + E_f D} \varepsilon, \quad \varepsilon_f = \frac{E_p}{E_p + E_f D} \varepsilon \quad (25)$$

将式(25)代入式(20),并由式(23)得岩土类材料的应力\_应变隐式表达式:

$$\sigma = (E_f/E_p)(E_p \varepsilon - \sigma)(Ae^{-\sigma/E_p} + Be^{-(2\varepsilon - 3\sigma/E_p)} + C), \quad (26)$$

上式即为具有带状集中分布或贯通裂隙的岩土类材料的隐式本构方程。其中的参数如下:

$$A = \frac{1 - \phi_{(p)0}}{1 - \phi_{(p)0} - \phi_{(f)0}}, \quad B = \frac{1 - \phi_{(f)0}}{1 - \phi_{(p)0} - \phi_{(f)0}}, \quad C = -\frac{1}{1 - \phi_{(p)0} - \phi_{(f)0}}.$$

### 2.4 具有均匀分布裂隙的岩土类材料本构方程

具有均匀裂隙的岩土材料如图3所示。

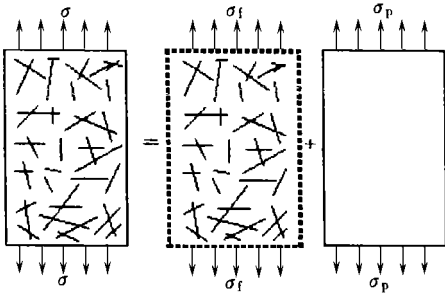


图3 具有均匀裂隙分布的岩土类材料受力分解图

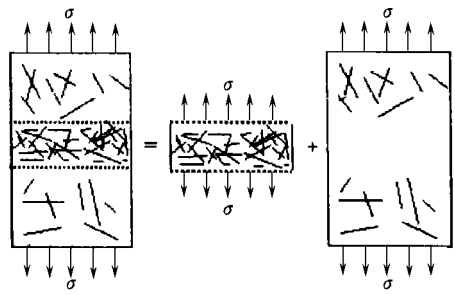


图4 具有随机裂隙分布的岩土类材料受力分解图

引入无量纲岩土类材料孔隙结构和裂隙结构的应力分配系数  $k_p$  和  $k_f$ , 于是有

$$\sigma_p = k_p \sigma, \quad \sigma_f = k_f \sigma \quad (27)$$

当材料为小变形时,  $k_p$  和  $k_f$  均为常数, 且有  $k_p + k_f = 1$ 。

将式(14)、(15)代入式(27)得:

$$\varepsilon_p = \frac{k_p}{E_p} \sigma, \quad \varepsilon_f = \frac{k_f}{E_f D} \sigma, \quad (28)$$

因为  $\varepsilon = \varepsilon_p + \varepsilon_f$ , 由式(28)得

$$\varepsilon = \left[ \frac{k_p}{E_p} + \frac{k_f}{E_f D} \right] \sigma \quad \text{或} \quad D = \frac{k_f E_p \sigma}{E_f (E_p \varepsilon - k_p \sigma)} \quad (29)$$

将式(28)代入式(20),且由式(29)得

$$\sigma = \frac{E_f}{E_p k_f} (E_p \varepsilon - k_p \sigma) (Ae^{-k_p \sigma/E_p} + Be^{-(2\varepsilon - 3k_p \sigma/E_p)} + C) \quad (30)$$

上式即为具有均匀裂隙分布的岩土类材料的  $\sigma$ \_ $\varepsilon$  (应力\_应变) 的隐式表达式。

### 2.5 具有随机分布裂隙的岩土类材料本构方程

具有随机分布裂隙的岩土类材料,既有均匀或近似均匀分布的裂隙,又有集中分布的裂隙,其受力简图如图4。

对于裂隙集中分布区域(B区),因其范围较小,而裂隙比较发育,所以假设其孔隙度  $\phi_{(p)} = 0$ , 而裂隙度  $\phi_{(f)} = 1 - (1 - \phi_{(f)0})e^{-2\varepsilon}$ 。

由式(19)可知,本区域的局部损伤变量为

$$D = 1 - \frac{(1 - \phi_{(f)0})e^{-2\varepsilon}}{(1 - \phi_{(f)0})} = 1 - e^{-2\varepsilon} \quad (31)$$

因此,本区域材料的应力\_应变关系为

$$\sigma = E_f (1 - D) \varepsilon_f = E_f e^{-2\varepsilon} \varepsilon_f \quad (32)$$

对于C区域,应用空间平均化方法,可以用(30)式来表述其本构关系

$$\sigma = \frac{E_f}{E_p k_f} (E_p \varepsilon - k_p \sigma) (A e^{-k_p \sigma / E_p} + B e^{-(2\varepsilon - 3k_p \sigma / E_p)} + C) \quad (33)$$

因为材料的总应变  $\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_f$ , 故式(33)化为:

$$\sigma = \frac{E_f}{E_p k_f} (E_p (\varepsilon - \varepsilon_f) - k_p \sigma) (A e^{-k_p \sigma / E_p} + B e^{-[2(\varepsilon - \varepsilon_f) - 3k_p \sigma / E_p]} + C) \quad (34)$$

式(34)即为具有随机裂隙分布岩土类材料的本构关系, 其中  $\varepsilon_f$  由式(32)求得。

### 3 实验验证

为了验证本文所提出的岩土类材料双重介质本构模型的正确性, 利用一组单轴拉伸试验结果和一组单轴压缩试验结果与数值计算结果进行比较。试验在液压伺服试验机上通过等应变速率加载实现。

标准岩石试件取自地下 2 m 处, 为大理岩, 试件为圆柱体, 直径  $(50 \pm 2)$  mm, 高度  $(100 \pm 5)$  mm, 通过观察具有集中分布层理和裂隙。同时制作 2 小尺度试件(直径  $(20 \pm 2)$  mm、高度  $(40 \pm 2)$  mm), 一试件没有明显裂隙(忽略裂隙影响, 用于测  $E_p$ ), 另一试件取自具有集中分布的裂隙组处(忽略孔隙影响, 用于测  $E_f$ )。在简单加载(单轴、低载荷)条件下测得这两个试件的弹性模量为:  $E_p = 43.1$  GPa,  $E_f = 12.3$  GPa。根据上述试验参数, 利用公式(26)模拟材料的本构关系。由于公式(26)、(30)和(33)均为  $\sigma$  的隐式表达式, 无法直接描述  $\sigma$ - $\varepsilon$  关系, 本文利用迭代法对式(26)进行数值求解。其迭代公式为  $\sigma_{k+1} = f(\sigma_k, \varepsilon_k)$ , 其中  $f(\sigma_k, \varepsilon_k)$  为公式(26)、(30)和(33)的右端项, 这里  $\sigma$  和  $\varepsilon$  替换为  $\sigma_k$  和  $\varepsilon_k$ 。可以证明迭代法是收敛的。

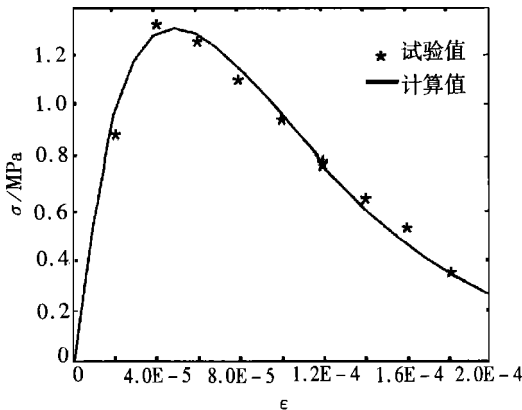


图5 单轴拉伸作用下岩石试件的全程应力-应变曲线

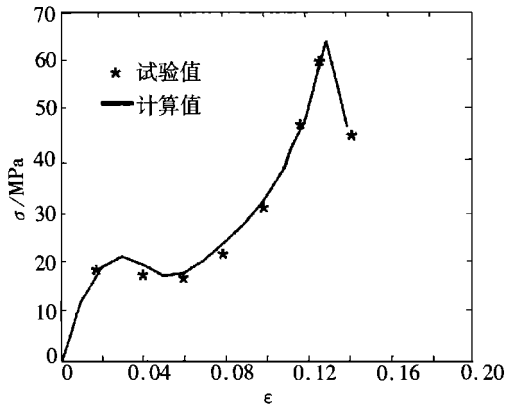


图6 单轴压缩作用下岩石试件的全程应力-应变曲线

根据迭代结果得到其全程应力-应变曲线如图5、图6所示, 图中对试验值和模拟值进行了对比, 由图可知, 利用本文双重介质本构模型模拟岩土类材料的应力-应变曲线与试验曲线吻合较好。

根据已有的研究成果<sup>[3-7]</sup>, 脆性材料在单轴拉伸下, 一般包括线弹性、非线性强化、应力降(应力跌落)和应变软化4个阶段, 但从图5可以看出, 本文提出的本构关系没有明显的应力跌落阶段。作者认为, 试验机的刚度影响也能造成材料破坏时的弹性能突然释放, 产生应力跌落, 因此, 应力跌落是否是单轴拉伸作用下脆性材料的变形特性尚值得探讨。拉伸作用下脆性材料或准脆性材料的破坏机理还需要从微观尺度进行深入研究。

## 4 参数敏感度分析

岩土类材料的双重介质本构模型的主要参数有  $E_p$ 、 $E_f$ 、 $\phi_p$ 、 $\phi_f$ 、 $k_p$ 、 $k_f$  等, 这些参数反映了材料的本质。为了深入理解材料破坏的机理, 本文分析了参数  $E_p$ 、 $E_f$ 、 $\phi_p$ 、 $\phi_f$  对材料本构关系的影响, 即对这些参数进行了敏感性分析。

### 4.1 孔隙结构弹性模量对材料本构关系的影响

图7描述了材料裂隙结构弹性模量  $E_f = 10 \text{ GPa}$  时, 材料孔隙结构弹性模量变化对材料应力-应变曲线的影响。由图7可以看出, 孔隙结构弹性模量  $E_p$  增大, 则材料屈服前的曲线斜率变大, 而屈服强度降低。当  $E_p = E_f$  时, 材料的屈服强度最高, 材料最不容易破坏。

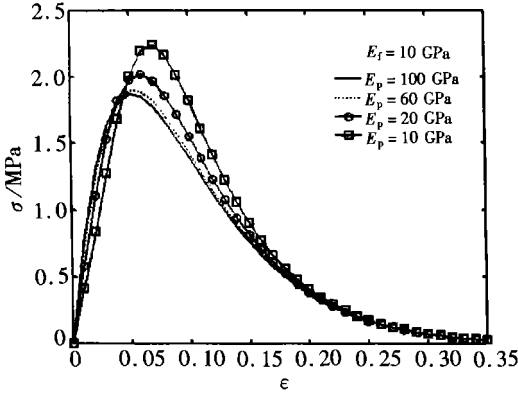


图7 孔隙结构弹性模量对双重介质材料本构关系的影响

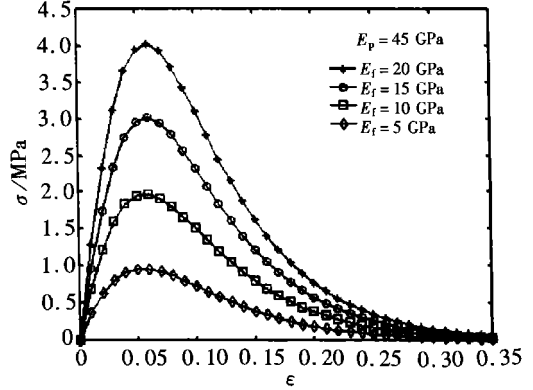


图8 裂隙结构弹性模量对双重介质材料本构关系的影响

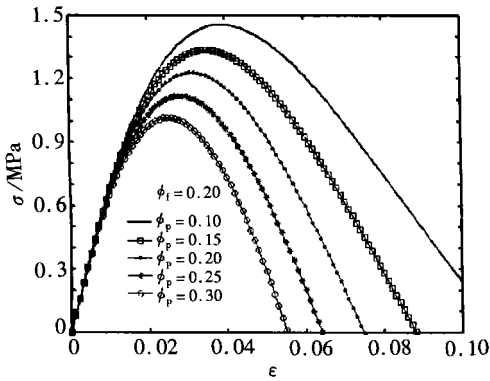


图9 孔隙结构孔隙度对双重介质材料本构关系的影响

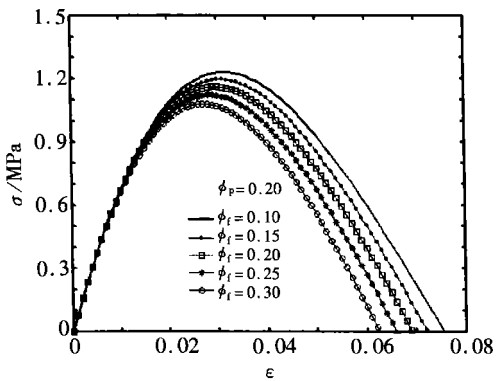


图10 裂隙结构孔隙度对双重介质材料本构关系的影响

### 4.2 裂隙结构弹性模量对材料本构关系的影响

图8描述了材料孔隙结构弹性模量  $E_p = 45 \text{ GPa}$  时, 材料裂隙结构弹性模量变化对材料应力-应变曲线的影响。由图8可以看出, 裂隙结构弹性模量  $E_f$  增大, 则材料屈服前的曲线斜率变大, 屈服强度提高。当  $E_f$  越接近  $E_p$ , 材料的屈服强度越高, 材料越不容易破坏。

### 4.3 孔隙结构孔隙度对材料本构关系的影响

模型计算所用参数数值为  $\phi_f = 0.2$ ,  $\phi_p = 0.2$ ,  $E_f = 10 \text{ GPa}$ ,  $E_p = 45 \text{ GPa}$ 。灵敏度分析中,  $\phi_f$ 、 $\phi_p$  两个参数的数值变化范围为  $\pm 10\%$ 。

图9描述了材料裂隙度  $\phi_l = 0.2$  时, 材料孔隙结构孔隙度变化对材料应力-应变曲线的影响。由图9可以看出, 孔隙结构孔隙度  $\phi_p$  增大, 材料屈服前的曲线斜率几乎不变, 而屈服强度降低明显。

#### 4.4 裂隙结构裂隙度对材料本构关系的影响

图10描述了材料孔隙结构孔隙度  $\phi_p = 0.2$  时, 材料裂隙结构裂隙度变化对材料应力-应变曲线的影响。由图10可以看出, 裂隙结构裂隙度  $\phi_l$  增大, 材料屈服前的曲线斜率几乎不变, 而屈服强度降低, 但降低幅度不大。

## 5 结 论

建立岩土类材料的本构模型是一件十分困难的事, 其之所以困难不仅在于所建立的本构模型要能较好地模拟材料的复杂特征<sup>[8~11]</sup>, 而且还要能够方便使用, 这就要求在地质材料本构模型的研究工作中将理论上的严密性与使用上的简易性结合起来, 使建立的本构模型既能全面地模拟地质材料的本构特性, 又不能含太多的待定常数, 易于实际应用<sup>[12~15]</sup>。本文建立的岩土类材料的双重介质本构模型遵循了上述原则, 根据单轴拉伸和单轴压缩试验结果, 模型能够较好地反映岩土类含损伤介质的本构关系。

根据模型参数敏感度分析的研究结果, 由图7和图8可以看出, 材料裂隙结构的弹性模量对材料屈服极限的影响远远大于孔隙结构的弹性模量对本构关系的影响, 这说明裂隙(或材料内部的损伤)对材料本构关系起控制作用。由图9和图10可以看出, 材料孔隙结构孔隙度对材料屈服极限的影响比裂隙结构裂隙度对材料屈服极限的影响大, 这说明材料中蕴涵的裂隙通过孔隙来控制材料的本构特性, 而孔隙的赋存状态决定了裂隙发展演化的程度。

根据本文研究成果, 岩土类材料中裂隙或损伤的赋存状态有均匀展布、集中展布以及随机展布状态, 正是裂隙或损伤空间展布的多态性导致了材料的本构关系错综复杂, 难以研究。本文模型中, 裂隙部分弹性模量和孔隙部分的弹性模量比  $E_l/E_p$  对于本构关系更具有重要作用, 这说明了材料的非均质性是材料损伤局部化和材料破坏的本质因素。这对于正确认识材料的本质以及研究新材料加工工艺具有重要作用。

双重介质本构模型将岩土材料的弹性主体(孔隙介质部分)和损伤主体(裂隙介质部分)分化开来, 对于研究岩土或含损伤材料的破坏具有一定的实用价值和理论意义。孔隙、裂隙分开对于从细观上研究流固耦合作用也非常重要。

本文仅探讨了单轴作用下岩土类材料的本构关系, 要深入理解岩土类材料的本构特性, 必须进一步研究复杂载荷作用下材料的行为, 如何将本文的双重介质本构模型推广到三维载荷情况, 是作者下一步工作的重点。

### [参 考 文 献]

- [1] 仵彦卿, 张倬元. 岩体水力学导论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1995.
- [2] 刘晓丽. 水、气二相渗流与双重介质变形的流固耦合数学模型[D]. 硕士论文. 辽宁 阜新: 辽宁工程技术大学, 2004.
- [3] Okubo S, Fukui K. Complete stress-strain curves for various rock types in uniaxial tension[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1996, 33(6): 549—556.
- [4] 周小平, 张永兴, 朱可善. 单轴拉伸条件下细观非均匀性岩石本构关系研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(3): 87—93.
- [5] 沈新普, 沈国晓, 陈立新. 用于应变局部化行为分析的弹塑性损伤耦合本构研究[J]. 应用数学和力学, 2004, 25(12): 1249—1256.



- [6] 李海波, 赵坚, 李俊儒, 等. 基于裂纹扩展能量平衡的花岗岩动态本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1683—1688.
- [7] Kemery J, Cook N G W. Effective moduli, non-linear deformation and strength of a cracked elastic solid[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1986, 23(2): 107—118.
- [8] 章根德. 地质材料本构模型的最近进展[J]. 力学进展, 1994, 24(3): 374—385.
- [9] Jaeger J C, Cook N G W. Fundamentals of Rock Mechanics [M]. New York: Halsted Press, 1979.
- [10] 王思敬. 岩体工程地质力学中的数值分析[A]. 见: 中国科学院地质力学研究所 编. 岩体工程地质力学问题[C]. 北京: 科学出版社, 1987, 86—95.
- [11] Lorentz E, Andrieux S. A variational formulation for nonlocal damage models[J]. International Journal of Plasticity, 1999, 15(2): 119—138.
- [12] Gadala M S. Recent advances in the numerical modeling of constitutive relations[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 1997, 24(3): 171—185.
- [13] Sih G C, Tang X S. Dual scaling damage model associated with weak singularity for macroscopic crack possessing a micro/mesoscopic notch tip[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2004, 42(1): 1—24.
- [14] 周建平, 李爱丽, 余芳儒. 含微裂纹弹性体的应力应变关系[J]. 力学学报, 1994, 26(1): 49—59.
- [15] Seaman Lynn, Curran Donald R, Shockey Donald A. Computational models for ductile and brittle fracture[J]. Journal of Applied Physics, 1976, 47(11): 4814—4826.

## Double Medium Constitutive Model of Geological Material in Uniaxial Tension and Compression

LIU Xiao<sup>1</sup>, WANG Si\_jing<sup>2</sup>, WANG En\_zhi<sup>1</sup>, XUE Qiang<sup>3</sup>

(1. Department of Hydraulic and Hydropower Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China;

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, P. R. China;

3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, P. R. China)

**Abstract:** Based on elasto-plasticity and damage mechanics, a double medium constitutive model of geological material under uniaxial tension and compression was presented, on the assumption that rock and soil materials being pore fracture double medium, and porous medium occurring no damage, while fracture medium occurring damage with load. To the implicit equation of the model, iterative method was adopted to obtain the complete stress-strain curve of the material. The result shows that many different distributions (uniform distribution, concentrated distribution and random distribution) of fractures in rock and soil material are the essential reasons of the daedal constitutive relations. By the reason that the double medium constitutive model separating the material to be porous medium part, which is the main body of elasticity, and fracture medium part, which is the main body of damage, it is of important practical values and theoretical meanings to the study on failure of rock and soil or materials containing damage.

**Key words:** rock and soil materials; geological materials; double medium constitutive model; damage