

单轴拉伸条件下细观非均匀性岩石 变形局部化分析及其应力-应变全过程研究*

周小平^{1,2} 张永兴¹ 哈秋龄¹ 王建华²

(¹重庆大学土木工程学院 重庆 400045) (²上海交通大学建筑工程学院 上海 200030)

摘要 岩土工程的开挖卸荷往往产生拉应力,因此研究单轴拉伸条件下细观非均匀性岩石的变形局部化和全过程应力-应变关系具有重要的理论和现实意义。利用损伤力学理论研究了岩石在线弹性阶段、非线性强化阶段、应力跌落、应变软化阶段的拉伸应力-应变关系,并分析了产生应力跌落和应变软化的主要原因是损伤和变形局部化,将损伤和变形局部化引入本构模型是和以往模型的重要区别。通过与实验成果的对比分析,验证了模型的正确性和有效性。

关键词 岩石力学, 拉应力, 细观非均匀性, 损伤力学, 损伤和变形局部化, 应力-应变全过程

分类号 TU 45

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2004)01-0001-06

ANALYSES ON STRAIN LOCALIZATION AND COMPLETE STRESS-STRAIN RELATION OF MESOSCOPIC HETEROGENOUS ROCK UNDER UNIAXIAL TENSION

Zhou Xiaoping^{1,2}, Zhang Yongxing¹, Ha Qiuling¹, Wang Jianhua²

(¹ Faculty of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045 China)

(² Faculty of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030 China)

Abstract Stress redistribution induced by excavation results in the tensile zone in parts of the surrounding rock mass. A micromechanics-based model is proposed for brittle rock undergoing irreversible changes of microscopics structures due to microcrack growth. The influences of all microcracks with different sizes and orientations are introduced into the overall compliance tensor by using the statistical average method. Overall compliances of damaged brittle rock are nonsymmetric and anisotropic. Micromechanical kinetic equations for microcrack growth characterizing the 'process domains' of active microcracks are introduced. These 'process domains' together with 'open microcrack domains' completely define the integration domains of ensemble averaged constitutive equations relating macro-strain and macro-stress. Special attention is paid to the transition from structural rearrangements on the microscale to the macroscopic inelastic strain. Analyses are made on the localization of strain and damage. Results show that the onset of localization is very sensitive to the details of a constitutive law. The complete stress-strain relation including linear elasticity, non-linear hardening, rapid stress drop and strain softening is established. The behaviour of rapid stress drop and strain softening are due to localization of strain and damage. The constitutive model to analyse the localization of strain and damage is

2002年2月26日收到来稿,2002年3月29日收到修改稿。

* 国家自然科学基金(59879012, 59649008)资助项目。

作者 周小平 简介:男,34岁,1992年毕业于南方冶金学院,2000年于重庆大学建筑工程学院获博士学位,现为上海交通大学博士后,主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: zhouxiaoping@sina.com。

distinct from the conventional model. An illustrative example is worked out to show the capability of the presented model to predict experimentally observed reponse of brittle rock. It is emphasized that no fitted phenomenological material parameter is employed in the proposed damage model.

Key word rock mechanics, uniaxial tension, mesoscopic heterogenous rock, damage mechanics, localization of damage and strain, complete stress-strain relation

1 引言

边坡和地下工程开挖卸荷时往往产生拉应力，因而研究拉应力作用下特别是单轴拉伸条件下岩石的应力-应变关系具有重要的理论和现实意义。尽管对岩石受拉应力作用下的变形特性进行了一些有价值的实验研究^[1~3]，但理论研究尚不多见，而且以往的模型仅仅研究极限荷载以前的本构关系，而对极限荷载以后的本构关系几乎没有研究，这是边坡和地下工程计算所得的变形和实际观测变形不吻合的主要原因，为此，本文重点研究单轴拉伸条件下岩石极限荷载以后的本构关系。

众所周知，岩石中含有大量弥散的微裂纹。微裂纹的形成、扩展和汇合对岩石材料的力学特性产生显著的影响，可以导致材料的逐步劣化直到断裂。研究拉应力作用下损伤岩石的变形和强度特性有 2 种方法：

(1) 唯象学方法^[4, 5]。基于连续损伤力学方法的唯象学模型是采用一个矢量、标量或张量的方法定义损伤变量，然后通过损伤变量建立材料的宏观本构模型。但是该方法的最大问题是究竟应该用多少参数来描述一点的损伤状态仍然没有定论，且如何确定损伤参数的演化规律还存在很大问题。

(2) 细观力学方法^[6~10]。细观力学方法是通过利用损伤断裂力学方法描述微裂纹的成核、扩展和汇合，并通过微裂纹的成核、扩展和汇合反映材料的宏观力学性能的变化。目前细观力学方法仅仅能描述极限荷载前材料的力学性能，对极限荷载后(包括应力跌落和应变软化)材料的力学性能很少探讨。为此，本文利用细观力学方法探讨单轴拉伸条件下，岩石的应变和损伤局部化问题及其全过程应力-应变关系。

2 理论模型

如果将岩石在单轴拉伸过程的变形分解为岩石母体的变形和微裂纹的变形，则在拉伸过程中岩石的变形由岩石母体的线弹性变形和微裂纹的张开、

一次稳定扩展及二次失稳扩展变形组成。

岩石单轴拉伸过程中总应变关系可表示为

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^0 + \epsilon_{ij}^{i1} + \epsilon_{ij}^{i2} + \epsilon_{ij}^{i3} \tag{1}$$

式中： ϵ_{ij}^0 ， ϵ_{ij}^{i1} ， ϵ_{ij}^{i2} ， ϵ_{ij}^{i3} 分别为岩石母体的线弹性变形、微裂纹在拉应力作用下的张开变形、微裂纹一次稳定的扩展变形以及微裂纹二次失稳的扩展变形。

岩石母体的线弹性应变可用胡克定律表示为

$$\begin{cases} \epsilon_{11}^0 = -\frac{\nu_0'}{E_0'} \sigma_2 \\ \epsilon_{22}^0 = \frac{1}{E_0'} \sigma_2 \end{cases} \tag{2}$$

对平面应力问题有

$$\begin{cases} E_0' = E_0 \\ \nu_0' = \nu_0 \end{cases} \tag{3}$$

对平面应变问题有

$$\begin{cases} \nu_0' = \frac{\nu_0}{1-\nu_0} \\ E_0' = \frac{E_0}{1-\nu_0^2} \end{cases} \tag{4}$$

式中： E_0 为岩石的弹性模量， ν_0 为岩石的泊松比。

如图 1 所示：微裂纹半长度为 c ，微裂纹方位角为 θ ，远场拉应力为 σ_2 。

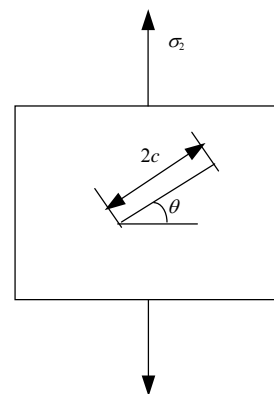


图 1 岩石受拉应力作用

Fig.1 Cracked rock subjected to uniaxial tensile loading

微裂纹在单轴拉应力作用下其相应的应力强度因子为

$$\left. \begin{aligned} K_I &= \sigma_2 \cos^2 \theta \sqrt{\pi c} \\ K_{II} &= \sigma_2 \cos \theta \sin \theta \sqrt{\pi c} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

对于式(5)可以应用混合断裂准则, 但由于裂纹一次稳定扩展产生的应变相对小, 因此可以不考虑 K_{II} 的影响, 所以本文为了简单起见, 选用微裂纹扩展准则为

$$K_I = K_{Ic} \quad (6)$$

式中: K_{Ic} 为弱面的断裂韧性。

将式(5)代入(6)得

$$\sigma_2 = \frac{K_{Ic}}{\cos^2 \theta \sqrt{\pi c}} \quad (7)$$

由上式可知, 首先扩展的裂纹必定是方位角 $\theta = 0$ 的裂纹, 因为它所需的拉应力最小, 为

$$\sigma_{2c} = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi c}} \quad (8)$$

(1) 当 $\sigma_2 < \sigma_{2c}$ 时微裂纹不发生自相似扩展, 只有微裂纹的张开变形。

对泰勒模型, 单一裂纹张开对柔度张量的贡献, 可按文[9]计算, 对平面应变问题有

$$S_{ij} = \frac{2\pi c^2(1-\nu_0^2)}{A_0 E_0} (g_{2i}g_{2j} + g_{3i}g_{3j}) \quad (9)$$

式中: A_0 为代表性单元面积, E_0 为岩石的弹性模量, ν_0 为岩石的泊松比。

同理对平面应力问题有

$$S_{ij} = \frac{2\pi c^2}{A_0 E_0} (g_{2i}g_{2j} + g_{3i}g_{3j}) \quad (10)$$

$$[g] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & \sin 2\theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & -\sin 2\theta \\ \frac{\sin 2\theta}{2} & \frac{\sin 2\theta}{2} & \cos 2\theta \end{bmatrix} \quad (11)$$

对多裂纹问题 (对平面应变问题), 有

$$S_{ij}^{II} = \frac{(1-\nu_0^2)}{E_0} \rho \int_{c_{min}}^{c_{max}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (g_{2i}g_{2j} + g_{3i}g_{3j}) p(c) p(\theta) c^2 dc d\theta \quad (12)$$

式中: $\rho = N/A_0$, N 为岩石中的裂纹总数; $p(c)$ 和 $p(\theta)$ 分别为原生裂纹长度和方位角的分布概率密度函数; c_{max} 和 c_{min} 分别表示微裂纹的最大和最小半长度。如果微裂纹为均匀分布, 则 $p(\theta) = 1/\pi$ 。对于平面应力问题可参考式(10)。下面以平面应变问题为例进行分析。

为了讨论问题的方便, 假使所有微裂纹具有统

计平均长度为 c , 故式(12)可以表示为

$$S_{ij}^{II} = \frac{\rho c^2(1-\nu_0^2)}{E_0} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (g_{2i}g_{2j} + g_{3i}g_{3j}) p(\theta) d\theta \quad (13)$$

(2) 当 $\sigma_2 = \sigma_{2c}$ 时方位角为 $\theta = \theta_0 = 0$ 的裂纹发生一次稳定扩展, 直到被具有更高强度的能障所束缚而停止扩展。

(3) 当 $\sigma_{2c} < \sigma_2 < \sigma_{2cc}$ 时方位角为 $(0, \theta_1^{pn})$ 的裂纹满足扩展准则式(6), 发生一次稳定扩展, 直到被具有更高强度的能障所束缚而停止扩展。设所有经过一次扩展后的裂纹平均半径为 c_1 , 它与材料的细观结构有关(如晶粒大小), 这一阶段是非线性强化阶段。

由

$$\sigma_2 \cos^2 \theta = \sigma_{2c} \quad (14)$$

可得发生一次稳定扩展的方位角为

$$\theta_1^{pn} = \arccos\left(\frac{\sigma_{2c}}{\sigma_2}\right)^{1/2} \quad (15)$$

由此可知方位角为 $(0, \theta_1^{pn})$ 的裂纹发生一次稳定扩展, 扩展后具有统计平均半径 c_1 。方位角为 $(0, \theta_1^{pn})$ 的裂纹发生一次稳定扩展后对柔度张量的贡献为

$$S_{ij}^{i2} = \frac{(1-\nu_0^2)}{E_0} \rho c_1^2 \int_0^{\theta_1^{pn}} (g_{2i}g_{2j} + g_{3i}g_{3j}) p(\theta) d\theta \quad (16)$$

方位角为 $(\theta_1^{pn}, \pi/2)$ 的裂纹因张开对柔度张量的贡献为

$$S_{ij}^{il} = \frac{(1-\nu_0^2)}{E_0} \rho c^2 \int_{\theta_1^{pn}}^{\frac{\pi}{2}} (g_{2i}g_{2j} + g_{3i}g_{3j}) p(\theta) d\theta \quad (17)$$

总的柔度张量为

$$S_{ij} = S_{ij}^0 + S_{ij}^{il} + S_{ij}^{i2} \quad (18)$$

当继续加载至应力达到最大承载力 σ_{2cc} 时, 立即发生应力跌落, 或发生应变软化, 某些取向上的微裂纹将穿越晶界的束缚发生二次失稳扩展。微裂纹发生二次失稳扩展的准则可表示为

$$K_I = K_{Icc} \quad (19)$$

式中: K_{Icc} 表示岩石基质材料的断裂韧度。

将式(5)代入(19)可得

$$\sigma_2 = \frac{K_{Icc}}{\cos^2 \theta \sqrt{\pi c_1}} \quad (20)$$

上式表明, 方位角为 $\theta = 0$ 上的微裂纹将发生二次失稳扩展, 因为该方位角的裂纹所需的拉应力最小, 为

$$\sigma_{2cc} = \frac{K_{Icc}}{\sqrt{\pi c_1}} \quad (21)$$

当 $\sigma_2 < \sigma_{2cc}$ 时没有裂纹发生二次失稳扩展。当 $\sigma_2 = \sigma_{2cc}$ 时方位角为 $\theta = 0$ 的裂纹将发生二次失稳扩展。

为了方便起见, 有

$$G = \left(\frac{K_1}{K_{1cc}} \right)^2 \quad (22)$$

由式(22)可知 G 正比于应力 σ_2 的平方和微裂纹半径 c , 在不增加应变的情况下, 随着方位角为 $\theta = 0$ 微裂纹的二次失稳扩展, 一方面方位角为 $\theta = 0$ 微裂纹尺寸增大, G 也随之增大, 导致这些微裂纹的继续扩展; 另一方面, 应力水平的下降导致 G 下降, 对于没有发生二次失稳扩展的微裂纹, 其微裂纹长度 $c = c_1$ 保持不变, 但应力的下降, 使这些微裂纹发生弹性卸载变形。在应力发生跌落前, 所有的裂纹都发生损伤变形, 即均匀损伤和均匀应变; 而应力发生跌落时, 只有某个方向($\theta = 0$)的微裂纹继续发生损伤扩展, 而其他部分的微裂纹没有发生损伤扩展, 也就是损伤集中在某个方向, 这就是损伤局域化过程。同时, 由于应力跌落时应变保持不变, 原来由所有微裂纹共同承担的非弹性应变逐渐集中到由发生二次扩展的少数微裂纹承担, 均匀化变形不再存在。也就是, 非弹性应变集中到某个方向($\theta = 0$)的微裂纹意味着应变局域化的发生。因此可以认为损伤局域化过程和应变局域化过程同时发生。应力跌落的幅度可由下列条件确定: 其一是微裂纹二次扩展的准则(19)必须满足; 其二是岩石母体与微裂纹(包括未扩展, 发生一次扩展和二次扩展)对应变的贡献之和等于外加宏观应变。

如果单位体积内满足 $\theta = 0$ 的微裂纹统计平均数目为零, 可以认为在一个微小的取值范围 $0 \leq \theta \leq \theta_{cc}$ 内所有微裂纹发生二次失稳扩展, 由微裂纹二次失稳扩展准则(19)可得二次扩展的微裂纹半径 c_2 与应力张量 σ_2 的关系为

$$c_2 = \frac{K_{1cc}^2}{\pi \sigma_2^2} \quad (23)$$

方位角为 $(0, \theta_{cc})$ 的微裂纹因发生二次失稳扩展对柔度张量的贡献为

$$S_{ij}^{i3} = \frac{(1 - \nu_0^2)}{E_0} \rho c_2^2 \int_0^{\theta_{cc}} (g_{2i} g_{2j} + g_{3i} g_{3j}) p(\theta) d\theta \quad (24)$$

方位角为 $(\theta_{cc}, \theta_1^{pn})$ 的裂纹发生一次稳定扩展对柔度张量贡献

$$S_{ij}^{i2} = \frac{(1 - \nu_0^2)}{E_0} \int_{\theta_{cc}}^{\theta_1^{pn}} (g_{2i} g_{2j} + g_{3i} g_{3j}) p(\theta) d\theta \quad (25)$$

方位角为 $(\theta_1^{pn}, \pi/2)$ 的裂纹因张开对柔度张量的贡献为

$$S_{ij}^{i1} = \frac{(1 - \nu_0^2)}{E_0} \rho c^2 \int_{\theta_1^{pn}}^{\frac{\pi}{2}} (g_{2i} g_{2j} + g_{3i} g_{3j}) p(\theta) d\theta \quad (26)$$

总的柔度张量为

$$S_{ij} = S_{ij}^0 + S_{ij}^{i1} + S_{ij}^{i2} + S_{ij}^{i3} \quad (27)$$

应力跌落前的应变张量为

$$\epsilon_{ij} = (S_{ij}^0 + S_{ij}^{i1} + S_{ij}^{i2}) \sigma_2 \quad (28)$$

式中: S_{ij}^0 为岩石母质的柔度张量。

当 $\sigma_2 = \sigma_{2cc}$ 时立即发生应力跌落, 应力跌落过程中应变张量为

$$\epsilon_{ij} = (S_{ij}^0 + S_{ij}^{i1} + S_{ij}^{i2} + S_{ij}^{i3}) \sigma_2 \quad (29)$$

由于应力跌落过程中应变保持不变, 由此可确定应力跌落的幅度为

$$\epsilon_{cc2} = \epsilon_2 \quad (30)$$

式中: ϵ_{cc2} 为单轴加载至 σ_{2cc} 处的轴向应变, 可按式(28)求解, 只需将 σ_2 代以 σ_{2cc} 即可; ϵ_2 为应力跌落过程中的轴向应变, 可按式(29)求解。

当继续增大宏观应变时, 已经发生二次扩展的方位角为 $\theta = 0$ 的裂纹继续扩展, 而其他的微裂纹继续发生卸载反弹, 这时损伤和应变局域化进一步加剧, 随之应力水平下降, 这一阶段称为应变软化阶段。应变软化阶段是微裂纹损伤局域化的继续, 也是宏观微裂纹萌生的开始, 在软化阶段的每一时刻应满足两方面的关系, 其一是微裂纹的二次扩展准则(19), 即, 由此得到二次扩展的微裂纹半径和应力张量的关系式(23)必须满足; 其二是基质和所有裂纹的应变的总和等于外加宏观应变, 由此得到软化阶段的应力-应变关系为

$$\epsilon_{ij} = (S_{ij}^0 + S_{ij}^{i1} + S_{ij}^{i2} + S_{ij}^{i3}) \sigma_2 \quad (31)$$

对于均匀分布的微裂纹有 $p(\theta) = 1/\pi$, 此时通过积分式(24)~(31)可得平面应变条件下的微裂纹岩石单轴拉伸本构模型为

$$\epsilon_{22} = \begin{cases} F_0 \sigma_2 & \text{(弹性阶段)} \\ (F_0 + F(\theta_1)) \sigma_2 & \text{(非线性强化阶段)} \\ F \sigma_{2cc} & \text{(应力跌落阶段)} \\ (F + F(\theta_{cc})) \sigma_2 & \text{(应变软化阶段)} \end{cases} \quad (32)$$

$$\epsilon_{11} = -\frac{\nu_0(1 + \nu_0)}{E_0} \sigma_2 \quad (33)$$

式中:

$$F_0 = \frac{1 - \nu_0^2}{E_0} \left(1 + \frac{1}{4} \rho c^2 \right)$$

$$F(\theta_{cc}) = \frac{1 - \nu_0^2}{4\pi E_0} \rho (c_2^2 - c_1^2) (2\theta_{cc} + \sin 2\theta_{cc})$$

$$F(\theta_1) = \frac{1 - \nu_0^2}{4\pi E_0} \rho (c_1^2 - c^2) (2\theta_1 + \sin 2\theta_1)$$

$$\theta_2 = \arccos \left(\frac{\sigma_{2c}}{\sigma_{2cc}} \right)^{1/2}$$

$$F(\theta_2) = \frac{1 - \nu_0^2}{4\pi E_0} \rho (c_1^2 - c^2) (2\theta_2 + \sin 2\theta_2)$$

$$c_2 = \frac{K_{lcc}^2}{\pi \sigma_2^2} \quad \theta_1 = \arccos \left(\frac{\sigma_{2c}}{\sigma_2} \right)^{1/2}$$

$$\sigma_{sc} = \frac{(F_0 + F(\theta_2)) \sigma_{2cc}}{F_0 + F(\theta_2) + F(\theta_{cc})}$$

$$F = F_0 + F(\theta_2)$$

同理对平面应力条件下的本构关系可根据式(3)和式(28)~(31)确定。

3 理论和实验成果对比分析

为了验证理论模型的正确性, 本文选择文[3]对稻田花岗岩和三城目安山岩的单轴拉伸实验(如图2和3)作对比分析。

(1) 由于稻田花岗岩具有各向同性、脆性、致密的力学特性, 即 $p(\theta) = 1/\pi$ 。在计算中, 稻田花岗岩的力学参数如下:

$$\begin{aligned} E_0 &= 37.6 \text{ GPa} & c &= 7.5 \times 10^{-4} \text{ m} \\ c_1 &= 1.5 \times 10^{-3} \text{ m} & K_{lcc} &= 0.55 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \\ K_{lc} &= 0.25 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} & \nu_0 &= 0.23 \\ \sigma_{2cc} &= -7.8 \text{ MPa} & \rho &= 21.5 \times 10^5 \end{aligned}$$

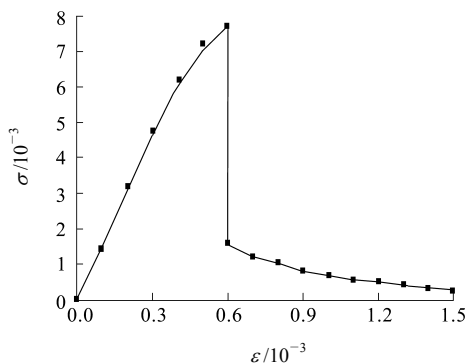


图2 稻田花岗岩实验成果和理论模型比较

Fig.2 Presented model vs testing result for Inada rock

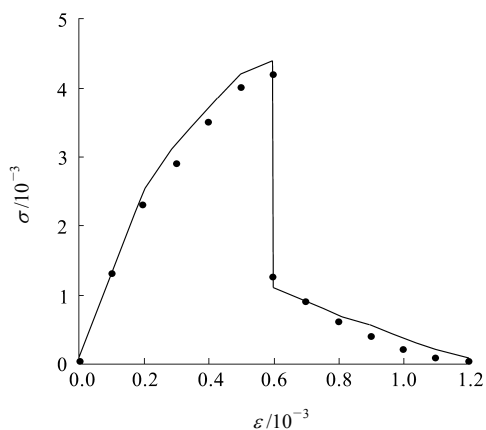


图3 三城目安山岩实验成果和理论模型比较

Fig.3 The presented model vs testing result for Sanjome rock

$$\theta_{cc} = 0.1^\circ$$

(2) 三城目安山岩的力学参数如下:

$$\begin{aligned} E_0 &= 11.6 \text{ GPa} & c &= 8 \times 10^{-4} \text{ m} \\ c_1 &= 5.5 \times 10^{-3} \text{ m} & K_{lcc} &= 0.565 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \\ K_{lc} &= 0.145 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} & \nu_0 &= 0.135 \\ \sigma_{2cc} &= -4.2 \text{ MPa} & \rho &= 2.1 \times 10^5 \\ p(\theta) &= \frac{1}{\pi} & \theta_{cc} &= 0.1^\circ \end{aligned}$$

图2中圆点为稻田花岗岩实验结果, 实线为本文计算结果。图3中圆点为三城目安山岩实验结果, 实线为本文计算结果。从图2和3可知本文的本构模型和实验结果十分吻合, 因而说明该本构模型的正确性。

限于文章篇幅, 不可能对每种岩石的微裂纹分布规律、微裂纹长度、微裂纹的分布密度和断裂韧性进行测量, 因此文章不一一列举其他的岩石单轴拉伸应力-应变关系曲线。本文的目的在于利用简单的数学和力学手段揭示脆性岩石单轴拉伸的普遍变形特性, 然后根据其变形特性在充分利用岩体自身强度的前提下控制岩体工程的变形和破坏。从本文的应力-应变关系看, 岩石并没有因为所受的拉应力达到其极限强度而完全丧失承载力, 也就是承受极限荷载后的岩石仍然还有残余强度, 这对岩体工程的稳定性很有好处。据此, 在岩体工程规定的变形范围内, 可以让岩石充分发生变形, 释放应力, 这样可以充分利用岩石自身的承载力, 从而减少支护。至于其他各种岩石的微裂纹分布规律需专文阐述, 它涉及到测量手段和方法的问题。但是对比文[3]中的其他岩石的单轴拉伸全过程应力-应变曲线可以知道, 其基本规律是一致的: 其应力-应变

关系包括线弹性阶段、非线性强化阶段、应力跌落阶段和应变软化阶段。 变形特性。

4 结 论

本文利用损伤力学理论研究了单轴拉伸条件下细观非均匀性岩石变形局部化问题及全过程应力-应变关系，主要得出如下结论：

(1) 单轴拉伸过程的损伤机制主要表现为自相似扩展，岩石在拉伸过程的变形可分解为岩石母体的变形、裂纹的张开、一次稳定扩展、二次失稳扩展变形；

(2) 微裂纹岩石在单轴拉伸过程中的本构关系包括线弹性、非线性强化、应力跌落和应变软化 4 个阶段。该模型分析了各个阶段的细观损伤机制和本构关系。指出应力跌落和应变软化是分布损伤向损伤局部化的过渡引起的，而微裂纹的失稳扩展是损伤局部化和应变局部化的根本原因，将损伤局部化引入材料的损伤本构关系是和以往损伤模型的又一重要差别；

(3) 该模型可以考虑岩石材料的细观的非均匀性，只要知道岩石材料的细观分布情况，就可以得出相应的全过程应力-应变关系；

(4) 实验研究证实本文提出的微裂纹岩石单轴拉伸本构模型能较好地反映岩石在单轴拉伸过程的

参 考 文 献

- 1 Nova R, Zaninetti A. An investigation into the tensile behaviour of a Schistose rock[J]. *Int. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr.*, 1990, 27(3): 331~242
- 2 Okubo S, Jin F, Akiyama M. Loading-rate dependency of uniaxial and indirect tensile strength[J]. *Journal of the Mining and Materials Processing Institute of Japan*, 1993, 109(11): 865~869
- 3 金丰年. 岩石的非线性流变[R]. 南京: 工程兵工程学院博士后研究工作, 1997
- 4 Simo J C, Ju J W. Strain-and stress-based continuum damage models[J]. *Int. J. Solids Structures*, 1987, 23(8): 821~840
- 5 Ortiz M A. Constitutive theory for the inelastic behaviour of concrete[J]. *Mech. Mater.*, 1985, 4(1): 67~93
- 6 Budiansky B, O'Connell R J. Elastic moduli of a cracked solids[J]. *Int. J. Solids Structure*, 1976, 12(?): 81~79
- 7 周小平. 裂隙岩体卸荷本构理论研究及应用[博士学位论文][D]. 重庆: 重庆大学, 2000
- 8 余寿文, 冯西桥. 损伤力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997
- 9 Sumarac D, Krajcinovic D A. Self-consistent model for microcrack-weakened solids[J]. *Mechanics of Materials*, 1987, 6(1): 39~52
- 10 Ju J W. On two-dimensional self-consistent micro mechanical damage models for brittle solids[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1991, 27(2): 227~258

第 7 届环境岩土工程与全球可持续发展国际研讨会 今年 6 月在芬兰举行

由国际环境岩土工程协会(SEG)主办、芬兰环境研究所承办的第 7 届环境岩土工程与全球可持续发展国际研讨会(7th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNOLOGY AND GLOBAL SUSTAINABLE DEVELOPMENT)将于今年 6 月 8~10 日在芬兰首都赫尔辛基举行。会议面向广大来自学术界、工业界和政府部门的科研人员、工程设计人员以及决策者。欢迎所有来自生态系统、场地改良、岩土工程中的问题与对策、风险评估以及可持续发展等各个领域的专家学者和感兴趣人士参加。此外，会议还将关注用于环境研究和计划的国际财经资源问题。

本次会议的主题为：(1) 场地调查，(2) 场地的改良与治理，(3) 废弃物隔离与场地改良，(4) 岩土问题与对策，(5) 风险评估与可持续发展。

研讨会期间和会后将会组织相关的技术考察和参观活动。

这次会议的联系人为：Dr. Jouko Saarela, Finnish Environment Institute, P.O. Box 140, 00251 Helsinki, Finland

Fax: +358-9-4030 0491; E-mail: Jouko.Saarela@ymparisto.fi。

(南京大学 施 斌、刘志彬 供稿)