

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.0863

# 岩石初始宏观变形模拟及微裂纹闭合 应力确定方法

张 超<sup>1,2</sup>, 曹文贵<sup>1</sup>, 徐 赞<sup>1,3</sup>, 贺 敏<sup>1</sup>

(1. 湖南大学 岩土工程研究所, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南科技大学 岩土工程稳定控制与健康检测湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201;  
3. 湖南城市学院 土木工程学院, 湖南 益阳 413000)

**摘 要:** 为了建立能够反映岩石初始宏观变形模拟方法以及微裂纹闭合应力确定新方法, 首先, 针对岩石及其内部微裂纹的受力变形特点, 将岩石视为由岩石基质和微裂纹两部分组成, 并以此建立了岩石与其组成成分之间的变形分析模型, 并由材料变形力学分析角度分别建立了岩石基质和微裂纹的受力变形分析方法, 从而建立了岩石初始宏观本构模型并给出了模型参数的确定方法; 然后, 针对现有微裂纹闭合应力确定方法存在的缺陷与不足, 提出了基于本文模型的微裂纹闭合应力确定新方法; 最后, 基于本文模型探讨了围压对岩石初始宏观变形非线性上凹程度的影响, 从理论上阐述了围压效应即围压与岩石初始宏观变形非线性上凹程度成负相关。研究结果表明, 本文模型不仅能够很好地模拟岩石启裂前变形全过程, 还能够阐述岩石与其组成成分之间的变形关系; 微裂纹闭合应力确定新方法既满足微裂纹闭合应力的理论意义又能够避免人为因素的干扰, 并具有易操作性的特点, 表明了本文模型与方法的合理性与可行性。

**关 键 词:** 岩石; 微裂纹; 非线性变形; 本构模型; 围压效应

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)04-1281-09

## Initial macro-deformation simulation and determination method of micro-crack closure stress for rock

ZHANG Chao<sup>1,2</sup>, CAO Wen-gui<sup>1</sup>, XU Zan<sup>1,3</sup>, HE Min<sup>1</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Stability Control and Health Monitoring, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China;  
3. College of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang, Hunan 413000, China)

**Abstract:** This study aims to establish a simulation method reflecting the initial macroscopic deformation of rock and propose a determining method for internal micro-cracks closure stress. Firstly, a deformation analysis model was established between rock matrix and micro-cracks, based on the stress and deformation characteristics of rock and its internal micro-cracks. Then deformation analysis methods were put forward for rock matrix and internal micro-cracks, respectively, according to the analysis of material deformation mechanics. Thus, an initially macroscopic constitutive model was deduced for rock, and its determining methods for the model parameters were also given. Secondly, a new method was proposed to obtain the closure stress of micro-cracks, due to the defects and deficiencies of those existing methods. Lastly, this study investigated the effect of confining pressure on the nonlinear concave degree of initially macro deformation of rock by using the established model. The theoretical result indicated that there was a negative correlation between them. Research results show that this established model can not only simulate the full deformation procedure of rock before failure, but also explain the deformation relationship between rock and their components. The new method can not only satisfy the theoretical significance of micro-cracks closure stress, but also avoid the interference of human factors. Moreover, this new method is easy to operate. Therefore, the above results verify the rationality and feasibility of the proposed model and method in this study.

**Keywords:** rocks; micro-cracks; nonlinear deformation; constitutive model; confining pressure effect

收稿日期: 2016-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51378198); 高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20130161110017)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51378198) and the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (20130161110017).

第一作者简介: 张超, 男, 1985 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土损伤理论与本构关系方面的研究工作。E-mail: flyheartzc@21cn.com

## 1 引言

试验研究表明<sup>[1-2]</sup>,岩石初始宏观变形性质显著受微裂纹的影响,在初始压密变形阶段岩石内部微裂纹逐渐发生闭合,应力-应变曲线表现为非线性,但试验现象并非完全如此,假如岩石不存在微裂纹,应力-应变曲线则表现为线性。然而,微裂纹存在于大多数岩石,尤其对于含有大量微裂纹的裂隙化岩石,应力-应变曲线表现出强烈的非线性,因此,研究微裂纹闭合对于从细观角度解释其诱发岩石初始宏观变形非线性的内因具有重要意义。

初始压密变形阶段的微裂纹闭合是岩石宏观变形全过程的重要组成部分,却未能引起国内外学者足够地重视,而是将研究重点集中在岩石线性变形阶段、屈服阶段以及峰后破坏阶段等方面<sup>[3-6]</sup>,例如,唐春安<sup>[3]</sup>和曹文贵等<sup>[4-6]</sup>基于统计损伤理论建立的岩石统计损伤本构模型虽然能够很好地模拟岩石宏观主要变形阶段,但未能注意到微裂纹闭合引起岩石初始宏观变形非线性的特征。于是,Corkum 等<sup>[7]</sup>提出了弹性模量与应力相关的概念模型以试图模拟岩石初始宏观非线性变形特征,但该模型无法解释微裂纹闭合引起岩石初始宏观变形非线性的原因,也不能定量描述微裂纹闭合变形过程;彭俊等<sup>[8]</sup>基于岩石三轴压缩试验资料对微裂纹闭合全过程进行了分析并建立了微裂纹闭合本构模型,但该模型是在微裂纹应力变形假定关系基础上利用试验结果进行拟合,而不是采用材料变形力学分析方法<sup>[9]</sup>对微裂纹进行受力分析,从而也就无法解释该模型参数的物理意义,而且,该模型不能从理论上解释围压对微裂纹闭合的影响,也不能分析围压引起岩石初始宏观变形非线性上凹程度的原因。然而无论如何,以上研究成果对岩石变形力学性质的阐释具有重要价值,为本文研究微裂纹闭合与岩石初始宏观非线性之间的关系提供了可借鉴的途径。

岩石启裂前变形存在 2 个重要应力阈值,即微裂纹闭合应力和启裂应力。微裂纹闭合发生在岩石初始压密变形阶段,对岩石初始宏观变形力学性质有重要影响,当微裂纹闭合结束即岩石所受轴向应力达到微裂纹闭合应力时,岩石进入线弹性变形阶段,此时岩石宏观变形力学性质与微裂纹无关,直至岩石所受轴向应力达到启裂应力萌生新的微裂纹。由此可见,微裂纹闭合应力的确定是研究微裂纹闭合的重要环节,也是岩石初始宏观变形由非线性转为线性的分界点,更是微裂纹对岩石初始宏观变形产生影响的结束点,因此,在微裂纹闭合基础

上研究微裂纹闭合应力的确定方法对阐释岩石变形力学性质具有重要意义。然而,由于岩石初始压密变形阶段未能引起国内外学者足够地重视,微裂纹闭合应力确定方法的研究相对较少。目前,微裂纹闭合应力确定方法主要有裂纹体积应变法<sup>[10]</sup>、轴向刚度法<sup>[11]</sup>、轴向应变法以及基于轴向应变响应法<sup>[12]</sup>。裂纹体积应变法虽然能够较准确地确定微裂纹闭合应力,但该方法的精度在很大程度上依赖于弹性参数的准确性;轴向刚度法以及轴向应变法的明显不足在于受主观因素影响较大,如微裂纹闭合点、岩石启裂点以及岩石由非线性至线性的转折点等强烈依赖于试验者的主观判断;基于轴向应变响应法虽然能够避免主观因素的干扰,却不能揭示最大轴向应变差与微裂纹闭合应力之间的关系,从而使该方法在理论上难有说服力。

综上所述,本文首先探讨微裂纹在岩石启裂前宏观变形过程中表现出的特点,建立出岩石宏观与微裂纹之间的变形分析模型,然后采用材料变形力学分析方法建立能够很好地反映微裂纹闭合变形全过程的微裂纹本构模型,以期能够获得反映岩石初始宏观非线性变形与微裂纹闭合之间关系的岩石本构模型,然后在此基础上通过微裂纹闭合变形特征确定微裂纹闭合应力,从而获得不仅能够满足微裂纹闭合应力的理论意义又能够避免主观因素干扰并具有易操作性的微裂纹闭合应力确定新方法。

## 2 岩石启裂前本构模型

试验研究发现,岩石初始宏观变形力学性质与微裂纹的发展发育密切相关,如图 1 所示,岩石在轴向应力作用下发生岩石基质和微裂纹两部分变形,岩石在初始压密变形阶段微裂纹逐渐发生闭合,该变形阶段的存在与否以及非线性变形上凹程度均取决于岩石微裂纹的分布密度和几何特征,当微裂纹恰好完成闭合即岩石所受轴向应力为微裂纹闭合应力时,岩石由初始压密非线性变形阶段转入线性变形阶段,岩石弹性参数(弹性模量和泊松比)即可通过线性变形阶段进行确定,而且,岩石处于线性变形阶段时微裂纹体应变不再随轴应力增加而变化,即体应变数值始终保持为 0,岩石宏观变形可近似视为岩石基质的变形,当轴向应力逐渐增大至启裂应力时,新的微裂纹开始萌生,岩石微裂纹进入后续发育发展阶段。

由上述岩石启裂前渐进变形过程可知,岩石可视为由岩石基质和大量微裂纹组成的复合材料。于是,在岩石内部取一个能够充分反映岩石组成成分

的代表性柱状单元 (RCE), 如图 2 所示, 为保持与岩石组成成分的一致性, 将 RCE 也抽象为由岩石基质和微裂纹两部分组成, 然后在应力  $\sigma_i$  作用下对其进行受力变形分析。

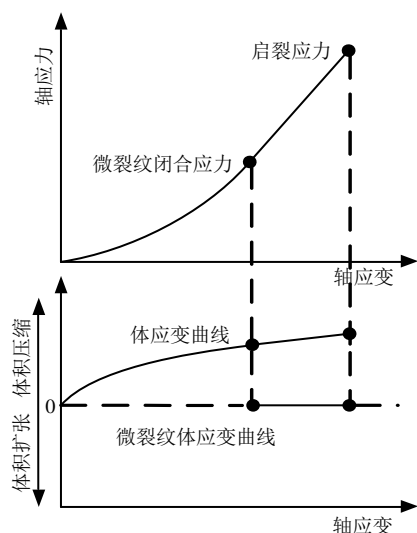


图 1 岩石启裂前变形示意图

Fig.1 Schematic of rock deformation before failure

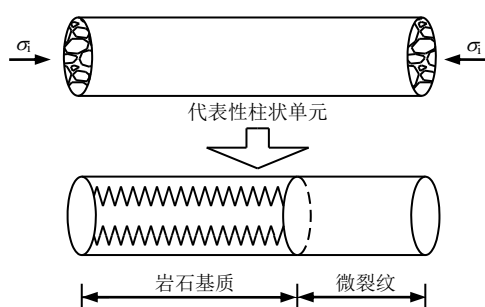


图 2 岩石变形分析简图

Fig.2 Schematic of rock deformation analysis

设 RCE 在零应力状态下的初始长度为  $l_0$ , 其中, 岩石基质和微裂纹的累计长度分别为  $l_0^m$  和  $l_0^c$ ; RCE 在应力  $\sigma_i$  作用下产生的变形为  $\Delta l$ , 其中, 岩石基质和微裂纹的变形分别为  $\Delta l^m$  和  $\Delta l^c$ 。于是可得岩石宏观应变  $\varepsilon_i$  为

$$\varepsilon_i = \Delta l / l_0 = (\Delta l^m + \Delta l^c) / l_0 \quad (1)$$

岩石基质应变  $\varepsilon_i^m$  和微裂纹应变  $\varepsilon_i^c$  可分别表示为

$$\varepsilon_i^m = \Delta l^m / l_0^m \quad (2)$$

$$\varepsilon_i^c = \Delta l^c / l_0^c \quad (3)$$

将式 (2) 及式 (3) 代入式 (1) 可得岩石与组成成分之间的变形分析模型, 即

$$\varepsilon_i = \gamma_0 \varepsilon_i^c + (1 - \gamma_0) \varepsilon_i^m \quad (4)$$

式中:  $\gamma_0$  为微裂纹累计长度在 RCE 中所占的百分比 ( $\gamma_0 = l_0^c / l_0$ )。由此可见, 岩石宏观变形由岩石基质和微裂纹两部分变形组成, 为了建立能够反映岩石初始宏观变形与其组成成分变形之间关系的岩石本构模型, 须确定岩石基质和微裂纹的受力变形分析方法, 下面基于材料变形力学分析方法进行具体分析。

## 2.1 岩石基质受力变形分析方法

岩石基质可近似为连续性固体材料, 于是, 基于广义虎克定律<sup>[13]</sup>可得岩石基质受力变形分析方法, 即

$$\varepsilon_i^m = \frac{1}{E_1} [\sigma_i - \mu_1 (\sigma_j + \sigma_k)] \quad (5)$$

式中:  $E_1$  和  $\mu_1$  分别为岩石基质的弹性模量和泊松比。

## 2.2 微裂纹受力变形分析方法

微裂纹显然不同于岩石基质, 岩石基质为线性变形, 岩石启裂前由初始压密阶段的非线性变形和微裂纹闭合完成后的线性变形组成, 同时, 岩石宏观变形包括岩石基质和微裂纹两部分变形, 微裂纹变形经历岩石初始压密阶段的非线性变形直至闭合完成达到某定值, 而且, 由岩石三轴加-卸载试验可知, 微裂纹变形具有不可恢复的特点, 因此, 微裂纹变形类似于软质材料变形。于是, 由材料变形力学分析方法<sup>[9]</sup>可知, 采用真应变能够更为准确地描述微裂纹变形, 即

$$\varepsilon_i^c = \int_{l_0^c}^{l_n^c} \frac{dl^c}{l^c} = -\ln \frac{l_n^c}{l_0^c} \quad (6)$$

式中:  $l_n^c$  为微裂纹在应力  $\sigma_i$  作用完成时的累计长度。值得注意的是, 微裂纹累计长度难以通过室内简单试验进行测定, 故须利用微裂纹具有非线性变形的特点, 采用分级加载方法并将应变  $\varepsilon_i^c$  近似为由  $n$  级应力增量  $\Delta \sigma_i^m$  引起的应变增量  $\Delta \varepsilon_i^{cm}$  的累加, 从而可得

$$\varepsilon_i^c = \sum_{m=1}^n \Delta \varepsilon_i^{cm} = \sum_{m=1}^n \frac{1}{E_m^c} [\Delta \sigma_i^m - \mu_m^c (\Delta \sigma_j^m + \Delta \sigma_k^m)] \quad (7)$$

式中:  $E_m^c$  和  $\mu_m^c$  分别为微裂纹在第  $m$  级应力增量作用下的弹性模量和泊松比。将式 (7) 代入式 (6) 可得微裂纹在应力  $\sigma_i$  作用下产生的变形  $\Delta l^c$ , 即

$$\Delta l^c = l_0^c \left\{ 1 - \exp \left[ - \sum_{m=1}^n \frac{1}{E_m^c} \left( \Delta \sigma_i^m - \mu_m^c (\Delta \sigma_j^m + \Delta \sigma_k^m) \right) \right] \right\} \quad (8)$$

由式(8)可知,要准确获得 $\Delta l^c$ 就必须得到微裂纹在各级荷载作用下的弹性模量和泊松比,然而通过常规力学试验难以获得这些变形力学参数,故为了便于研究,本文假设微裂纹变形力学参数不变,则利用式(3)及式(8)可得微裂纹受力变形分析方法,即

$$\varepsilon_i^c = 1 - \exp \left\{ - \frac{1}{E_2} \left[ \sigma_i - \mu_2 (\sigma_j + \sigma_k) \right] \right\} \quad (9)$$

式中: $E_2$ 和 $\mu_2$ 分别为微裂纹的弹性模量和泊松比。将式(5)及式(9)代入式(4)可得岩石启裂前本构模型,即

$$\varepsilon_i = \frac{1-\gamma_0}{E_1} [\sigma_i - \mu_1 (\sigma_2 + \sigma_3)] + \gamma_0 \left[ 1 - \exp \left( - \frac{1}{E_2} (\sigma_i - \mu_2 (\sigma_2 + \sigma_3)) \right) \right] \quad (10)$$

由式(10)可见,利用该模型模拟岩石启裂前变形过程以及分析岩石初始宏观变形与其组成成分变形之间关系须确定参数 $\gamma_0$ ,岩石基质变形力学参数( $E_1$ 和 $\mu_1$ )以及微裂纹变形力学参数( $E_2$ 和 $\mu_2$ ),可见这些参数难以通过常规试验获得,但能够通过岩石三轴压缩试验曲线间接进行确定。为此,下面具体介绍这些参数的确定方法。

### 3 模型参数的确定方法

由于岩石三轴压缩试验曲线为偏应力( $\sigma_1 - \sigma_3$ )与轴应变( $\varepsilon_1'$ )之间的关系曲线,为了便于研究须将岩石启裂前本构模型即式(10)的表达式转换为与岩石三轴压缩试验曲线纵横坐标一致。由于轴应变是以偏应力使岩样发生轴向变形为计算始点,故须获得岩样在静水压力( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ )作用下发生的初始应变 $\varepsilon_c$ ,由式(10)可得

$$\varepsilon_c = \frac{(1-\gamma_0)(1-2\mu_1)\sigma_3}{E_1} + \gamma_0 \left[ 1 - \exp \left( - \frac{1-2\mu_2}{E_2} \sigma_3 \right) \right] \quad (11)$$

根据式(10)及式(11)可得岩石启裂前三轴压缩试验本构模型,即

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{E_1}{1-\gamma_0} (\varepsilon_1' - \gamma_0 \varepsilon_n) \quad (12)$$

其中:

$$\varepsilon_1' = \varepsilon_1 - \varepsilon_c \quad (13)$$

$$\varepsilon_n = \left[ 1 - \exp \left( - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{E_2} \right) \right] \exp \left( - \frac{1-2\mu_2}{E_2} \sigma_3 \right) \quad (14)$$

于是,本文基于上述岩石初始宏观变形与其组成成分变形的特点,利用岩石三轴压缩试验曲线以及本构模型(式(12))即可获得模型参数的确定方法,下面具体分析。

#### 3.1 参数 $\gamma_0$ 、 $E_1$ 与 $\mu_1$ 的确定方法

微裂纹变形与软质材料变形类似,在低应力作用下发生较大变形,弹性模量 $E_2$ 在数值上处于低数量级水平,而且,岩石进入线性变形阶段其微裂纹闭合变形已经完成,可知 $\exp[-(\sigma_1 - \sigma_3)/E_2] \rightarrow 0$ ,于是,将线性变形段延长至轴应变坐标轴,通过式(12)可得轴应变截距为 $\gamma_0 \varepsilon_n$ ,显然,参数 $\gamma_0$ 为岩石单轴压缩试验曲线的线性变形段延长线在轴应变轴上的截距,同时,不同围压下岩石三轴压缩试验曲线的线性变形段的斜率为 $E_1/(1-\gamma_0)$ ,由此即可确定参数 $E_1$ ,由于本构模型式(12)不含参数 $\mu_1$ ,故无法依据此式确定,但考虑到岩石线性变形阶段可近似为岩石基质变形过程,于是,可将完整岩块泊松比近似为参数 $\mu_1$ 。

#### 3.2 参数 $E_2$ 与 $\mu_2$ 的确定方法

考虑到式(12)为岩石启裂前本构模型,须满足岩石三轴压缩试验偏应力与轴应变之间的关系,因此,在岩石启裂前试验曲线上任意选取 $m$ 点 $[(\sigma_1 - \sigma_3)_k, \varepsilon_{1k}']$  ( $k=1, 2, \dots, m$ ),采用曲线拟合法可得参数 $E_2$ 和 $\mu_2$ 。

上述已建立了岩石启裂前本构模型并给出了模型参数的确定方法,下面在此基础上通过微裂纹闭合特征确定微裂纹闭合应力,以期获得一种既满足微裂纹闭合应力的理论意义又能避免主观因素干扰的微裂纹闭合应力确定新方法。

### 4 微裂纹闭合应力确定方法

本节首先对微裂纹闭合应力确定方法进行简单回顾与总结,然后在此基础上利用本文模型建立微裂纹闭合应力确定新方法。

#### 4.1 轴向应变法

岩石在初始压密变形阶段表现出强烈的非线性,这与岩石微裂纹数量和几何特性密切相关,因为岩石初始压密变形阶段是否存在直接取决于微裂纹,当岩石所受轴向应力低于微裂纹闭合应力时岩石表现出非线性变形,反之,微裂纹闭合已经完成,岩石表现出线性变形。因此,通过岩石三轴压缩试验结果即偏应力与轴应变关系曲线能够确定微裂纹

闭合应力, 如图3所示, 利用试验曲线由非线性到线性的转折点作为微裂纹闭合应力, 但该转折点的准确性显然受人为因素影响很大。

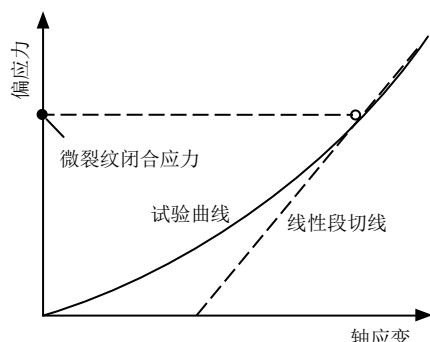


图3 轴向应变法确定微裂纹闭合应力示意图

Fig.3 Schematic of determining the crack closure stress using axial stress axial strain method

## 4.2 基于轴向应变响应法

由于轴向应变法含有主观判断转折点的问题, 彭俊等<sup>[12]</sup>基于岩石三轴压缩试验曲线首先作出通过坐标原点和损伤应力点的直线并以此作为参考线, 如图4所示, 然后计算相同轴应力下的试验曲线与参考线的差值, 以最大轴应变差所对应的轴应力作为微裂纹闭合应力。该方法显然克服了人为因素的干扰, 然而这种数学处理方法却存在两个问题: 其一, 最大轴应变差的确定位置跟参考线密切相关, 但参考线两端的参考点选取却缺乏理论依据; 其二, 以最大轴应变差所对应的轴应力作为微裂纹闭合应力, 这种数学处理方法虽然可以避免人为因素的干扰, 但无法很好地从理论上阐释最大轴应变差与微裂纹闭合应力之间的关系, 故获得的微裂纹闭合应力缺乏足够的说服力。

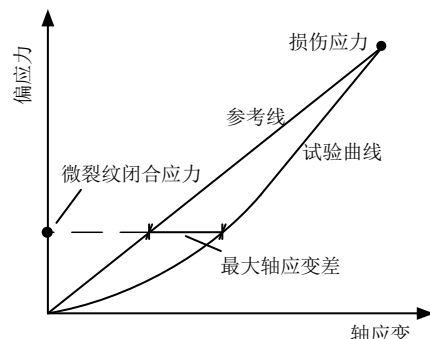


图4 基于轴向应变响应法确定微裂纹闭合应力示意图

Fig.4 Schematic of determining the crack closure stress with axial strain response method

## 4.3 裂纹体积应变法

岩石体积应变  $\varepsilon_v$  由弹性体积应变  $\varepsilon_{ev}$  和裂纹体

积应变  $\varepsilon_{cv}$  组成<sup>[14]</sup>, 对于岩石三轴压缩试验, 基于广义虎克定律可得岩石弹性体积应变, 即

$$\varepsilon_{ev} = \frac{1-2\mu}{E}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (15)$$

式中:  $E$  和  $\mu$  分别为岩石弹性模量和泊松比。于是, 岩石微裂纹体积应变可表示为

$$\varepsilon_{cv} = \varepsilon_v - \frac{1-2\mu}{E}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (16)$$

Martin 等<sup>[10]</sup>通过岩石三轴压缩试验绘制岩石体积应变与轴应力关系曲线, 如图1所示, 微裂纹体积应变与轴应力曲线存在一段数值为0的水平段, 该水平段的起始点对应于微裂纹闭合应力, 结束点对应于启裂应力。显然, 该方法能够从理论上阐明微裂纹闭合应力在试验曲线上所处的位置, 但该方法受变形力学参数(弹性模量与泊松比)的影响较大。研究发现<sup>[15]</sup>, 微裂纹对岩石泊松比的测定影响较大, 因此, 对于存在大量微裂纹的裂隙化岩石, 该方法不再适用。

## 4.4 基于本文模型的微裂纹闭合应力确定新方法

由前述微裂纹闭合应力确定方法可知, 微裂纹闭合应力确定的关键在于既满足微裂纹闭合应力的理论意义即能准确找出微裂纹恰好闭合时岩石所受的轴应力, 又能尽可能地避免人为因素的干扰, 且具有可操作性强的特点。于是, 本文提出一种基于本文模型的微裂纹闭合应力确定新方法。

通过岩石与组成成分之间的变形模型可知, 岩石宏观变形由岩石基质变形和微裂纹变形通过参数  $\gamma_0$  进行加权确定, 同时, 由岩石组成成分的受力变形分析方法可知, 岩石基质可视为连续性固体材料, 其变形服从广义虎克定律, 表现为线弹性; 微裂纹类似软质材料, 其变形服从负指数变形规律, 表现为非线性。由于微裂纹在低应力作用下即可完成闭合, 其变形速率随轴应力增大而逐渐减小并很快趋于0, 即微裂纹变形不再随轴应力增大而变化, 如图5所示, 由于微裂纹闭合应力为微裂纹恰好完成闭合时岩石所受的轴应力, 故可将微裂纹变形量恰好等于其变形终值时岩石所受的轴应力作为微裂纹闭合应力。

由此可见, 本文方法不仅能够描述岩石初始宏观变形全过程, 也能反映岩石初始宏观变形与其组成成分变形之间的关系, 同时, 基于本文模型确定微裂纹闭合应力, 不仅能够从理论上分析微裂纹闭合应力所处的位置, 也能够避免人为因素的干扰, 易于操作计算。于是, 下面根据实例对利用本文方法在模拟岩石启裂前变形过程以及确定微裂纹闭合

应力等两方面进行验证,具体内容见下文。

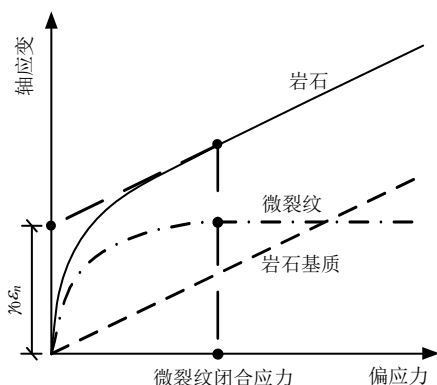


图5 基于本文模型确定微裂纹闭合应力示意图  
Fig.5 Schematic of determining the crack closure stress with the proposed model

## 5 方法验证

### 5.1 岩石启裂前本构模型验证

前述已建立岩石启裂前本构模型并给出了模型参数的确定方法,但仍须通过实例分析验证其可行性与合理性。为此,引入文献[16]的试验曲线进行分析,该文献给出了粒状大理石分别在围压  $\sigma_3 = 0.0$ 、1.38、2.76 MPa 下的常规三轴压缩试验曲线,但未给出利用本文模型进行分析的相关参数,故须利用试验曲线采用模型参数确定方法(即 3.1 节与 3.2 节)确定参数  $\gamma_0 = 6.21 \times 10^{-3}$ ,  $\mu_1 = 0.25$ , 其余参数如表 1 所示。

表 1 不同围压下的模型参数  
Table 1 Model parameters under different confining pressures

$\sigma_3$ /MPa	$E_2$ /MPa	$\mu$	$R^2$	$E_1$ /GPa
0.00	1.81		0.99	3.20
1.38	2.82	0.02	0.98	9.99
2.76	3.45	0.02	0.99	12.25

由表可知,拟合优度  $R^2$  的数值非常接近于 1,表明本文建立的微裂纹本构模型不仅能够很好地表征微裂纹变形全过程,也能够很好地满足微裂纹变形与岩石初始宏观变形之间的关系。由此发现微裂纹弹性模量  $E_2$  在数量级上远低于岩石基质弹性模量  $E_1$ ,验证了前述将微裂纹变形近似为软质材料变形的合理性。

将上述模型参数代入本文建立的岩石启裂前本构模型即可获得不同围压下粒状大理石启裂前变形理论曲线,为了验证本文模型的可行性与合理性,将粒状大理石试验曲线与本文理论曲线进行比较,如图 6 所示。由此可见,本文模型能够很好地模拟

粒状大理石启裂前变形过程,尤其是能够很好地反映粒状大理石初始宏观非线性变形特征。

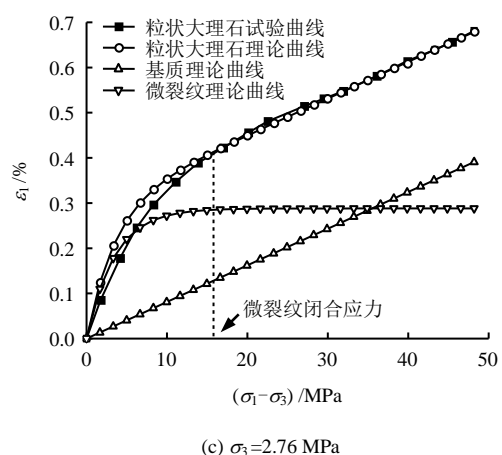
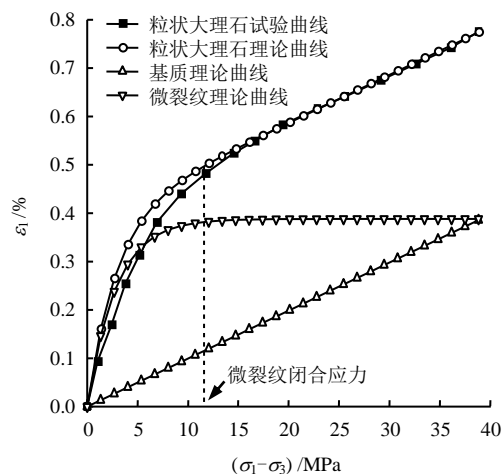
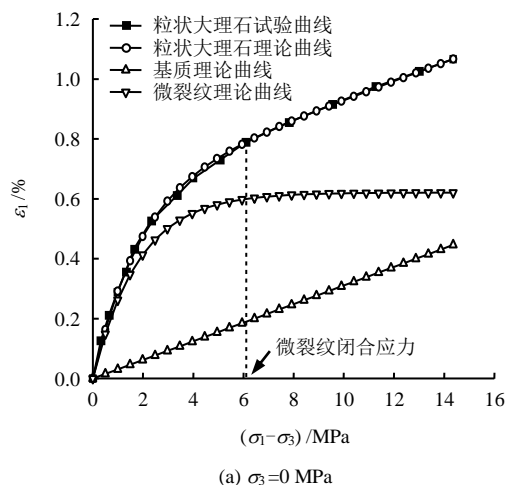


图6 不同围压下本文模型的方法验证  
Fig.6 Validation of this model under different confining pressures

### 5.2 微裂纹闭合应力确定方法验证

由前述建立的岩石启裂前本构模型可知,岩石初始宏观变形包含岩石基质和微裂纹两部分变形,

并且岩石基质和微裂纹的受力变形分析方法均已建立。于是, 基于上述试验曲线可获得岩石基质和微裂纹的理论变形曲线, 如图6所示。由此可见, 岩石基质和微裂纹的理论变形曲线分别符合线性和非线性的特点, 并且微裂纹服从负指数变形规律, 于是, 基于本文模型的微裂纹闭合应力确定方法(即4.4节)可确定出微裂纹闭合应力。由于试验资料<sup>[16]</sup>缺乏岩石体积应变与轴应力关系曲线, 故为了验证本文方法的合理性与可行性, 将本文方法所得结果与分别采用轴向应变法和基于轴向应变响应法所得的微裂纹闭合应力进行比较, 如表2所示。

表2 微裂纹闭合应力确定方法对比

Table 2 Comparison of different methods for determining the crack closure stress

$\sigma_3$ /MPa	微裂纹闭合应力 /MPa		
	轴向应变法	基于轴向应变响应法	本文方法
0.00	5.92	6.03	6.12
1.38	10.36	10.95	11.58
2.76	14.98	15.02	15.79

由表可以发现, 随着围压逐渐增大, 利用本文方法所得的微裂纹闭合应力符合已有方法所得相应结果的变化规律, Chang等<sup>[17]</sup>通过对花岗岩及大理石常规三轴压缩试验结果进行分析也发现了类似现象。然而, 围压究竟如何影响岩石初始宏观变形非线性上凹程度, 下面基于本文模型对不同围压下岩石初始宏观变形即围压效应进行分析。

## 6 围压效应

通过不同围压下岩石三轴压缩试验结果发现, 岩石应力-应变曲线初始变形段的非线性程度与围压密切相关, 即随着围压逐渐增大, 岩石初始宏观变形非线性程度将逐渐减弱, 直至岩石初始压密段消失直接进入线性变形阶段。由此可见, 围压对岩石初始压密阶段的非线性程度影响很大。因此, 下面基于本文模型探讨围压对岩石初始宏观变形非线性的影响即围压效应。

由岩石三轴压缩试验本构模型(即式(12))可知, 岩石线性变形段的延长线在轴应变坐标轴上的理论截距为 $\gamma_0 \varepsilon_n$ , 如图5所示, 由 $\varepsilon_n$ 的表达式(即式(14))可知理论截距与围压密切相关, 故为了说明围压与理论截距之间的关系以及理论截距可以代表实测截距的合理性与可行性, 基于上述试验资料分析整理为表3。由此可见, 随着围压的增大, 实测截距与理论截距均减小, 且两者相对误差很小, 说明本文能够依据理论截距探讨岩石初始宏观变形

的围压效应。

表3 不同围压下的理论截距与实测截距对比

Table 3 Comparison of the theoretical and measured intercepts under different confining pressures

$\sigma_3$ /MPa	实测截距 / $10^{-3}$	理论截距 / $10^{-3}$	相对误差 /%
0.00	6.21	6.21	
1.38	3.86	3.88	0.52
2.76	2.97	2.89	2.69

由前述分析可知, 理论截距跟岩石初始宏观变形非线性程度成正相关, 理论截距跟围压成负相关, 故岩石初始宏观变形非线性程度与围压成负相关, 究其原因, 岩石在施加偏应力之前其内部微裂纹在围压的作用下已经发生了不同程度的闭合。由于本节内容主要探讨围压对岩石初始宏观变形非线性的影响程度, 现假定岩石基质和微裂纹的变形力学参数不随围压变化, 于是, 基于岩石启裂前本构模型可得到不同围压下岩石启裂前理论变形曲线, 如图7所示。由此可见, 本文模型能够很好地反映围压对岩石初始宏观变形非线性程度的影响。

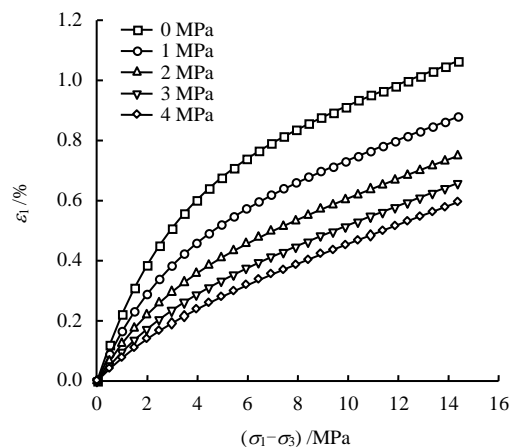


图7 不同围压下岩石启裂前变形理论曲线

Fig.7 Theoretical curves of rock deformation under different confining pressures before failure

## 7 结论

本文针对岩石初期宏观变形非线性特征以及岩石基质和微裂纹的变形特点, 探讨岩石启裂前变形过程模拟方法, 并在此基础上建立出微裂纹闭合应力确定新方法以及分析围压对岩石初始宏观变形非线性程度的影响, 可得如下结论:

(1) 通过探讨岩石启裂前宏观变形和微裂纹变形的特点, 岩石可视为由岩石基质和微裂纹两部分组成, 建立了岩石宏观与其组成成分之间的变形分析模型, 基于材料力学分析方法获得了岩石基质及

微裂纹的变形受力分析方法,建立了岩石启裂前本构模型并给出了模型参数的确定方法,为模拟岩石启裂前变形过程和建立微裂纹闭合应力确定新方法奠定了基础。

(2) 通过对岩石启裂前本构模型的理论曲线与试验曲线的比较分析,表明本文模型不仅能够很好地模拟岩石启裂前变形过程,尤其能够反映岩石初始宏观非线性变形特征,还能阐述岩石宏观与其组成成分之间的变形关系,验证了本文模型的合理性与可行性。

(3) 在分析已有微裂纹闭合应力确定方法的优缺点基础上,提出了基于本文模型的微裂纹闭合应力确定新方法,该方法既能从理论上阐释微裂纹闭合应力的所处位置,又能尽可能地避免人为因素的干扰,还具有易操作性的特点,并将本文方法与已有方法进行比较分析,验证了本文方法的合理性和可行性。

(4) 基于本文模型探讨了围压对岩石初始宏观变形非线性程度的影响,从理论上阐述了围压效应即围压与岩石初始宏观变形非线性程度成负相关。

### 参 考 文 献

- [1] 朱珍德,渠文平,蒋志坚. 岩石细观结构量化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1313—1324.  
ZHU Zhen-de, QU Wen-ping, JIANG Zhi-jian. Quantitative test study on mesostructure of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(7): 1313—1324.
- [2] 黄丹,李小青. 基于微裂纹发育特性的大理岩特征强度数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(1): 253—262.  
HUANG Dan, LI Xiao-qing. Numerical simulation research on characteristic strength of marble based on development of microcrack[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(1): 253—262.
- [3] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.  
TANG Chun-an. Catastrophe in rock unstable failure[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1993.
- [4] 曹文贵,赵衡,张玲,等. 考虑损伤阈值影响的岩石损伤统计软化本构模型及其参数确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1148—1154.  
CAO Wen-gui, ZHAO Heng, ZHANG Ling, et al. Damage statistical softening constitutive model for rock considering effect of damage threshold and its parameters determination method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(6): 1148—1154.
- [5] 曹文贵,赵衡,李翔,等. 基于残余强度变形阶段特征的岩石变形全过程统计损伤模拟方法[J]. 土木工程学报, 2012, 45(6): 139—145.  
CAO Wen-gui, ZHAO Heng, LI Xiang, et al. A statistical damage simulation method for rock full deformation process with consideration of the deformation characteristics of residual strength phase[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2012, 45(6): 139—145.
- [6] 曹文贵,赵衡,张永杰,等. 考虑体积变化影响的岩石应变软化损伤本构模型及其参数确定方法[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 647—654.  
CAO Wen-gui, ZHAO Heng, ZHANG Yong-jie, et al. Strain softening and hardening damage constitutive model for rock considering effect of volume change and its parameters determination method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(3): 647—654.
- [7] CORKUM A G, MARTIN C D. The mechanical behaviour of weak mudstone (Opalinus Clay) at low stresses[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2007, 44(2): 196—209.
- [8] 彭俊,荣冠,周创兵,等. 岩石裂纹闭合效应及其定量模型研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 126—132.  
PENG Jun, RONG Guan, ZHOU Chuang-bing, et al. A study of crack closure effect of rocks and its quantitative model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(1): 126—132.
- [9] FREED A D. Natural strain[J]. **Journal of Engineering Materials and Technology**, 1995, 117: 379—85.
- [10] MARTIN C D, CHANDLER N A. The progressive fracture of Lac Du bonnet granite[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1994, 31(6): 643—659.
- [11] EBERHARDT E, STEAD D, STIMPSON B, et al. Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1998, 35(2): 222—233.
- [12] 彭俊,蔡明,荣冠,等. 裂纹闭合应力及其岩石微裂纹损伤评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(6): 1091—1100.  
PENG Jun, CAI Ming, RONG Guan, et al. Stresses for crack closure and its application to assessing stress-induced microcrack damage[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(6): 1091—1100.