考虑孔隙压密的岩石非线性变形行为计算分析

王青元^{1*}, 朱万成², 徐涛², 刘洪磊², 贾建功³

1. 菏泽学院资源与环境系, 菏泽 274015;

2. 东北大学岩石破裂与失稳研究中心, 沈阳 110819;

3. 菏泽市煤炭管理局, 菏泽 274015

* E-mail: wqyan_2006@163.com

收稿日期: 2017-04-22; 接受日期: 2017-11-22; 网络版发表日期: 2018-03-06

国家自然科学基金(批准号: 51374049, 51474051)和菏泽学院博士基金(编号: XY16BS36)资助项目

摘要 含孔隙裂隙岩石的非线性变形对分析岩体工程中的力学响应和安全评价具有重要意义. 需要考虑岩石的孔隙性建立能够反映岩石变形非线性特性的本构模型. 本文首先分析了岩石非线性变形的力学机理, 将岩石的全应力应变曲线分成两段. 然后对两段分别建立本构关系: 在压密闭合阶段, 提出压密因子的概念, 以表征孔隙率变化对岩石变形特性的影响; 除压密闭合阶段外的另一阶段, 基于损伤理论, 采用岩石细观单元本构模型来描述, 以最大拉应变准则和摩尔-库仑准则作为损伤判断准则. 借助有限元分析软件COMSOL Multiphysics, 通过MATLAB编程实现对该模型的数值求解. 为验证模型的正确性, 将数值模拟得到的结果与试验数据进行对比. 最后, 对6种孔隙率不同但岩石基质相同的岩石进行了单轴压缩破坏过程数值模拟. 研究表明: 运用提出的压密因子所建立的本构模型可以很好地模拟岩石的压密闭合阶段的非线性, 对同种岩石孔隙率越大单轴抗压强度越小, 随孔隙被压密弹性模量越来越大.

关键词 孔隙率, 应力应变关系, 非线性, 压密因子, 数值模拟

1 引言

天然岩石中包含着数量不等、成因各异的孔隙和裂隙, 是岩石的重要结构特征之一, 岩石力学及工程地质中的许多问题都与其密切相关. 孔隙裂隙岩石的力学变形性质在很多方面有重要的作用, 如石油天然气开采领域中岩石储层产能的评价、地热能源的开发、煤与瓦斯突出和突水等灾害、核废料的存储和二氧化碳的地质存储等^[1]. 研究表明, 由于岩石内存在孔隙裂

隙, 岩石变形过程表现出明显的非线性特征^[2,3], 传统的胡克定律和基于统计损伤理论建立的岩石本构模型不能准确地反映这一现象^[4]. 因此, 考虑岩石的孔隙性建立一种能准确描述岩石变形过程非线性的本构模型具有重要的理论意义和工程价值.

孔隙率对岩体材料力学参数(强度、弹性模量等)的影响很多学者做了相关研究^[5], 提出了孔隙率影响力学参数的判断准则^[6-8], Aubertin和Li^[8]总结了这些准则的优缺点, 认为只有很少的依赖孔隙率的准则可

引用格式: 王青元, 朱万成, 徐涛, 等. 考虑孔隙压密的岩石非线性变形行为计算分析. 中国科学: 技术科学, 2018, 48:

Wang Q Y, Zhu W C, Xu T, et al. Numerical analysis on nonlinear deformation behavior of rock considering compaction of pores (in Chinese). Sci Sin Tech, 2018, 48: doi: 10.1360/N092017-00122

以描述材料的非弹性特性. Vajdova等人^[9]和Zhu等人^[10]对含孔隙的石灰岩和凝灰岩进行了常规力学实验, 认为孔隙裂隙在岩石破裂过程中起重要的作用, 得到了岩石强度随孔隙率增大而降低的结论. Sammis和Ashby^[11]提出孔隙诱导开裂模型(pore-emanating crack model), 该模型假设, 在二维平面内分布着许多等直径的小孔, 受力后随着应力的增加, 在圆孔一点处的应力强度因子达到了断裂韧度, 在这一点翼型裂纹沿应力方向扩展, 随翼型裂纹扩展, 其相互作用产生了拉伸应力集中, 裂纹相互贯通, 最后导致失稳破坏. Baud等人^[12]用3种不同的岩石(砂岩、石灰岩和凝灰岩)对比了Sammis和Ashby^[11]所提出模型的预测结果与试验结果. 陈咏梅^[13]用数理统计分析的方法导出了孔隙率与损伤因子的关系, 又进一步得到了孔隙率与抗压强度的理论关系, 认为孔隙率越高试件的抗压强度越低. Al-Harhi等人^[14]用数字图像处理技术获得了玄武岩的弹性模量与孔隙率之间的关系, 认为随着孔隙率的逐渐减小, 弹性模量增加的越来越快, 弹性模量与孔隙率呈一定函数关系, 可采用对数函数分两段来描述这一现象. 杜修力和金浏^[15,16]基于三相球模型确定了含孔隙材料的有效体积模量, 提出采用中空圆柱杆件模型来推导预测其有效剪切模量, 进而获得含孔混凝土材料的有效弹性模量和泊松比. 并且从理论上推导并得到了含孔隙混材料的有效抗拉、抗压强度及有效抗剪强度与孔隙率之间的定量关系, 且进一步得到了含孔基质在达到有效强度时的临界应变与孔隙率的关系公式. 李春光等人^[17]根据功的互等定理, 推导了Walsh公式, 又采用球形弹性公式得到了孔隙率与体积模量的近似理论公式和精确理论公式.

国内外大量学者对岩石变形破坏的本构关系进行了深入的研究, 特别是利用统计损伤理论建立起的岩石变形全过程模拟方法取得了显著成果. 自Lemaitre提出应变等价理论以来, 人们在这一原理基础上建立了岩石损伤本构模型, 模拟得到了岩石的应力应变全过程曲线^[18]. 但是, 不足之处是没有考虑岩石内部的孔隙裂隙, 无法模拟岩石受压初始阶段的压密闭合特性. 针对这一点, 曹文贵等人^[19]在深入探讨裂隙化岩体变形损伤机制的基础上, 考虑了裂隙化岩体受载后体积发生变化的影响, 采用空隙率反映裂隙化岩体变形过程中的空隙或岩体体积变化, 并通过裂隙化岩体微观受力分析, 建立了裂隙化岩体损伤模型. 但是, 由

于没考虑空隙岩石因空隙被压缩而产生的力学特点, 模型理论分析获得的曲线与试验值仍有较大的差异. Liu等人^[20]考虑岩石内部孔隙裂隙弹性变形的影响, 将岩体分为概念上的“软体”和“硬体”两部分, 两部分的变形用不同应变特征的胡克定律来表征, 提出了双应变胡克模型. Zhao和Liu^[21]和李连崇等人^[22]又对这一模型进行了完善, 得到了三维的应力应变关系, 并实现了在FLAC^{3D}中的数值求解.

岩石受载后压密阶段和其后的损伤演化阶段表现为非线性的机理是完全不同的. 基于这一认识, 本文将岩石应力应变曲线分成两个阶段分别建立本构模型. 然后借助有限元分析软件COMSOL Multiphysics, 通过MATLAB编程实现对所建立本构模型的数值求解, 并且与试验结果进行对比, 以验证模型的正确性. 最后, 运用所建立的本构模型对6种初始孔隙率不同但岩石基质相同的岩样进行数值模拟. 通过这些研究, 以期揭示岩石非线性变形的规律, 对岩体工程的设计提供技术参考.

2 岩石非线性变形力学机理

岩石材料在压缩荷载作用下的典型全应力-应变曲线如图1所示^[23], 从图中可以看出, 岩石的变形可分为4个阶段, 分别为孔隙裂隙压密阶段(OA段)、弹性变形至微弹性裂隙稳定发展阶段(AB段)、非稳定破裂发展阶段(BC段)和破裂后阶段(C点以后)^[24].

为了能建立更符合图1所示岩石变形非线性特性的本构模型, 需考虑岩石中含有的孔隙裂隙. 本文中, 岩石被看成是由孔隙和类岩石基质(也即达到极限孔隙率)所构成的两相介质. 孔隙相包括各种孔隙、裂隙和微裂纹等. 在应力作用下, 孔隙相首先发生压密闭合, 在力的作用下孔隙的压密闭合是不可逆的, 也就是一旦孔隙发生变形就是不可恢复的. 当岩石内的孔隙在受力后不再发生变形时, 类岩石基质开始产生变形. 类岩石基质被认为是线弹性的, 在未达到屈服破坏前如果卸载会恢复到原始状态, 达到屈服破坏后的变形是永久的. 对应岩石全应力应变曲线(图1), 孔隙相的变形为OA段, 类岩石基质受力变形为A点以后的阶段. 类岩石基质的变形采用连续固体介质力学理论进行分析和计算, 本文采用课题组^[25,26]提出的弹-脆性损伤力学本构模型进行数值分析. 对孔隙压密部分的

图1 全应力应变曲线^[23]

非线性变形则提出一个新的模型进行描述.

3 岩石非线性损伤本构模型建立

根据前文的分析, 本节分两段建立岩石非线性损伤本构模型, 对应图1中OA压密阶段和A点以后压密后阶段, 然后将两段合起来构成完整的本构模型. 本文以建立可以描述OA段非线性的模型为重点; A点以后阶段用细观层次上的弹-脆性损伤力学本构模型进行描述, 相关内容文献[26]已详细介绍, 这里只做简单介绍.

3.1 压密阶段

含孔隙岩石受力后孔隙率不断减小, 岩石弹性模量随孔隙率的减小逐渐增大. 需要注意的是, 即使达到压密闭合阶段孔隙率也不会减小到0, 而是会趋于一个极限的孔隙率值. 本文采用如下表达式来表达整个过程:

$$E_\phi = E_r \left(1 - \xi (1 - D_\phi) \right), \quad (1)$$

其中, E_ϕ 表示压密阶段的弹性模量, 其值随孔隙率的变化而变化; E_r 表示类岩石基质的弹性模量, 可以近似认为该值就是室内试验获得的岩石弹性模量, 可通过试验获得; ξ 为与岩石初始孔隙率大小有关的常数, 决定初始弹性模量的大小, $0 < \xi < 1$; D_ϕ 为压密因子.

定义压密因子为

$$D_\phi = 1 - \left(\frac{\phi - \phi_r}{\phi_0 - \phi_r} \right)^\beta, \quad (2)$$

其中, ϕ_0 为初始孔隙率; ϕ 为当前孔隙率; ϕ_r 为极限孔隙

率; β 为材料常数, 决定压密因子变化的快慢, $0 < \beta < 1$.

对式(1)和(2), 当 $\phi = \phi_0$, 即在未受力状态时, $D_\phi = 0$, 此时 $E_\phi = E_r(1 - \xi)$, 说明在未受力时含孔隙裂隙的岩石弹性模量要小于岩石基质弹性模量. 当 $\phi = \phi_r$, 即达到极限孔隙率时, $D_\phi = 1$, 此时 $E_\phi = E_r$, 即认为压密闭合阶段完成, 在图1全应力应变曲线上对应于A点, 开始进入弹性阶段.

岩石受到荷载后, 孔隙率与所处的应力状态有关, 可用下式表示^[27]:

$$\phi = (\phi_0 - \phi_r) \exp(-\alpha_\phi \bar{\sigma}_v) + \phi_r, \quad (3)$$

其中, ϕ , ϕ_0 和 ϕ_r 与式(2)中代表的意义相同; α_ϕ 为孔隙率的应力敏感系数, 可以取值为 $5.0 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$; $\bar{\sigma}_v$ 为平均有效应力, 可以按照如下式计算:

$$\bar{\sigma}_v = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3, \quad (4)$$

其中, σ_1 , σ_2 和 σ_3 为3个主应力.

3.2 压密后阶段

按照弹性损伤理论, 单元的弹性模量按照如下关系式给出:

$$E_a = (1 - D)E_r, \quad (5)$$

其中, E_r 和 E_a 分别为损伤前和损伤后的弹性模量. 这里假定损伤及其演化都是各向同性的, 故 E_r , E_a 和 D 都是标量.

细观单元在压缩和拉伸应力状态下的损伤变量 D 可表示为

$$D = \begin{cases} 0, & F_1 < 0, \text{ and } F_2 < 0, \\ 1 - \left| \frac{\varepsilon_{a0}}{\varepsilon_1} \right|^n, & F_1 = 0, \text{ and } dF_1 > 0, \\ 1 - \left| \frac{\varepsilon_{c0}}{\varepsilon_3} \right|^n, & F_2 = 0, \text{ and } dF_2 > 0, \end{cases} \quad (6)$$

其中, ε_1 和 ε_3 分别是最大和最小主应变; ε_{a0} 和 ε_{c0} 分别是当单元发生拉伸损伤和剪切损伤时对应的最大拉伸主应变和最大压缩主应变; n 表示单元损伤演化系数, 取 $n=2$.

选取最大拉应变准则和摩尔-库伦准则作为损伤判定准则:

$$\begin{aligned} F_1 &\equiv -\sigma_3 - f_{t0} = 0, \\ F_2 &\equiv \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin\theta}{1 - \sin\theta} - f_{c0} = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

其中, σ_1 和 σ_3 分别是最大和最小主应力, f_{c0} 和 f_{t0} 分别是单元的单轴抗压和单轴抗拉强度, θ 为内摩擦角. 在任何受力条件下, 拉伸损伤是优先判断的, 若细观单元满足拉伸准则, 则不需要再判断该单元是否满足摩尔-库仑准则. 只有未满足拉伸准则的单元, 才判定其是否满足摩尔-库仑准则.

3.3 参数分析

对于式(1)和(2), 需要确定的参数有初始孔隙率 ϕ_0 、极限孔隙率 ϕ_r 以及与岩石材料有关的常数 β 和 ξ . 初始孔隙率 ϕ_0 可由试验测得. 假设 V_{p0} , V_0 , V_p 和 V 分别为岩样初始孔隙体积、初始岩样体积、试验过程中的孔隙体积和试验过程中的岩样体积. 则初始孔隙率为

$$\phi_0 = \frac{V_{p0}}{V_0}. \quad (8)$$

试验过程中当前孔隙率为^[28]

$$\phi = \frac{V_p}{V} = \frac{(V_{p0} - \Delta V_p) / V_0}{(V_0 - \Delta V) / V_0} = \frac{\phi_0 - \Delta V_p / V_0}{1 - \varepsilon_v}, \quad (9)$$

其中,

$$\frac{\Delta V_p}{V_0} = \frac{\Delta V - \Delta V_s}{V_0}, \quad (10)$$

其中, ΔV_p 为孔隙体积的变化, ΔV 为岩样体积的变化, ΔV_s 为类岩石基质的变化. 我们假定岩石在压缩过程中孔隙首先产生变形被压密, 然后类岩石基质(或骨架)才发生变形. 因此在压密闭合阶段 $\Delta V_s=0$, 则试验过程中当前孔隙率为

$$\phi = \frac{\phi_0 - \varepsilon_v}{1 - \varepsilon_v}. \quad (11)$$

分析式(11)可知, 当前孔隙率是随体积应变的增

大而减小的. 当压密闭合阶段完成时, 即在应力应变曲线上到达A点时, 孔隙率达到极限值, 此时 $\phi=\phi_r$.

图2(a)所示为在不同 β 的条件下, 随孔隙率的降低, 压密因子 D_ϕ 的变化规律. 从图中可以看出, β 越小, 随孔隙率的降低 D_ϕ 的变化越快. 图2(b)所示为在不同 β 的条件下, 随孔隙率的降低, E_ϕ/E_r 的变化规律图. 从图中可以看出, β 越小, 随孔隙率的降低 E_ϕ/E_r 的变化越快. 也就是在受力的初始阶段弹性模量变化较小, 随着压密闭合的进行, 孔隙率越来越小, 弹性模量变化也越来越快.

对不同岩石或者同一种岩石但初始孔隙率不同, 在不考虑孔隙和岩石骨架结构效应的前提下, ξ 是随初始孔隙率 ϕ_0 的变化而变化的, 可用图3所示的曲线和经验公式表示其关系.

$$y = \frac{A}{1 + e^{-B(x-C)}}, \quad (12)$$

其中, A , B 和 C 是与材料有关的常数, 对砂岩可取如下关系:

$$\xi = \frac{0.985}{1 + e^{-33.6(\phi_0 - 0.14)}}. \quad (13)$$

初始孔隙率 ϕ_0 很小时 ξ 也非常小, 随着初始孔隙率 ϕ_0 的增大, ξ 迅速增大, 但当初始孔隙率增大到一定值, ξ 增加的幅度变得很小, 基本稳定在一个恒定的值附近, 这是符合实际经验的.

图4所示为在相同的初始孔隙率和极限孔隙率条件下, ξ 不同, 随孔隙率的降低, E_ϕ/E_r 的变化规律图. 从图中可以看出, ξ 越大, E_ϕ/E_r 变化越明显. ξ 不同代表岩石材料种类不同, 也就是说, 在相同的初始孔隙率和极限孔隙率条件下, 对 ξ 大的岩石材料, 随着压缩应力的

图2 不同 β 情况下随孔隙率的降低 D_ϕ 和 E_ϕ/E_r 的变化. (a) D_ϕ 变化; (b) E_ϕ/E_r 变化

图 3 不同初始孔隙率下 ζ 取值的经验曲线

增大, 弹性模量变化越明显。

4 对比验证与数值模拟

前述已提出含孔隙岩石非线性变形过程的本构模型, 为了确定所建立模型的合理性与正确性, 需对其进行验证。自然界中的岩石特别是火山岩和岩浆岩存在大量的大小不同的孔隙, 他们对岩石的力学性质特别是强度有重要的影响。因此, 选取对6种不同初始孔隙率(5%, 8%, 11%, 14%, 17%和20%)的岩石进行数值模拟, 进一步研究孔隙率对岩石力学特性的影响。

4.1 对比验证

本文选取4种不同砂岩的试验结果作对比, 其中绿

图 4 不同 ζ 情况下随孔隙率的降低 E_{ϕ}/E_r 的变化

砂岩试验结果引自文献[29,30], 其他3种砂岩(Berea砂岩、Boise砂岩和Fontainebleau砂岩)的试验结果取自文献[12]。由于文献中没有给出本文计算所需要的参数, 根据前文的叙述, 利用文献给出的资料来确定相关参数, 表1所示是经过假设和推测出的4种岩石的参数。

本文借助有限元分析软件COMSOL Multiphysics, 通过MATLAB编程实现对所建立本构模型的数值求解。为保证验证的严格性, 数值模型中的参数均采用对应试验岩石的物理力学参数。数值模拟时岩石假设为非均匀的, 其弹性模量和强度满足Weibull分布。但泊松比、内摩擦角和压拉比是均匀不变的。数值模型中4种岩石的Weibull分布参数见表2。值得注意的是, 表2

表 1 4种砂岩的岩石物理力学参数

岩石种类	初始孔隙率(%)	极限孔隙率(%)	颗粒粒径(mm)	单轴抗压强度(MPa)	β	ζ
绿砂岩	4.5	4.45	0.2~0.5	32.2	0.5	0.046
Berea砂岩	21.3	21.24	0.26	47.1	0.4	0.907
Boise砂岩	28.1	28.06	0.171	30.1	0.4	0.976
Fontainebleau砂岩	12.2	12.08	-	75.1	0.5	0.347

表 2 4种砂岩的Weibull分布参数

岩石种类	均质度	弹性模量均值(GPa)	单轴抗压强度均值(MPa)	摩擦角($^{\circ}$)	压拉比	泊松比
绿砂岩	3	9.5	92.3	29.4	12.4	0.29
Berea砂岩	3	13.64	141.1	29.4	11.5	0.29
Boise砂岩	3	11.6	90.34	29.4	11.5	0.29
Fontainebleau砂岩	3	29.5	225.1	29.4	11.5	0.29

中所列的参数是细观单元的平均值, 而不是岩石的宏观参数^[31]. 数值模型按照二维平面应变问题进行分析, 模型几何尺寸设定为50 mm×100 mm. 模型底边在竖直方向固定, 水平方向可以自由移动, 在顶部按位移加载, 每步加载 $dy=1\times 10^{-5}$ m, 两边自由, 如图5所示.

图6所示为数值模拟得到的结果与试验结果的对比. 从图中可以看出对4种砂岩, 考虑孔隙和不考虑孔隙得到的结果有很大差别. 如果不考虑孔隙裂隙的影响, 在岩石发生失稳破坏前, 数值模拟得到的是一条

图5 单轴压缩模型边界条件

线性的直线, 不能模拟岩石的压密闭合阶段. 考虑岩石内包含的孔隙和裂隙, 数值模拟得到的结果与试验结果有较好的一致性, 应力应变曲线如图1一样可以分为4个不同的阶段. 因此, 可以认为所建立的模型是合理的, 可以用来模拟岩石变形过程的非线性, 特别是反映岩石初始压密闭合阶段的非线性.

4.2 数值模拟

对6种不同初始孔隙率(5%, 8%, 11%, 14%, 17%和20%)岩石进行单轴压缩数值模拟, 模型采用二维平面应变模型, 几何尺寸设为50 mm×100 mm. 模型边界条件如图5所示, 加载方式为位移加载, 每步加载量 $dy=1\times 10^{-5}$ m. 数值模拟所用到的参数是孔隙率为0%时的砂岩, 单轴抗压强度为65 MPa, 弹性模量为14 GPa, 泊松比为0.29, 内摩擦角为28.7°. 相应的Weibull分布参数如表3所示. 对不同的初始孔隙率, 计算得到其他参数如表4所示.

图7所示为数值模拟得到的岩石应力应变曲线, 从图中可以看出, 初始孔隙率不同岩石的应力应变曲线也不同. 随初始孔隙率的增大, 岩石破坏时的强度越来越小, 也就是说初始孔隙率越大岩石单轴抗压强度越小越容易破坏. 当初始孔隙率为5%时, 单轴抗压强

图6 4种不同砂岩应力应变曲线. (a) 绿砂岩; (b) Boise砂岩; (c) Berea砂岩; (d) Fontainebleau砂岩

表 3 完整岩石Weibull分布参数

均质度	弹性模量均值(GPa)	单轴抗压强度均值(MPa)	摩擦角(°)	压拉比	泊松比
3	19.5	192.2	29.4	11.5	0.29

表 4 不同初始孔隙率下岩石材料参数

初始孔隙率(%)	极限孔隙率(%)	β	ζ
5	4.91	0.5	0.05
8	7.89	0.45	0.12
11	10.87	0.4	0.26
14	13.85	0.33	0.50
17	16.80	0.3	0.72
20	19.78	0.25	0.87

度为37.43 MPa；初始孔隙率为20%时，单轴抗压强度为9.2 MPa。

值得注意的是，岩石内每个孔隙的直径对岩石的单轴抗压强度也有很大影响。根据Heap等人^[32]的研究可知，在相同的孔隙率条件下，孔隙直径越大岩石的单轴抗压强度越小；在相同的孔隙直径条件下，随孔隙率的增大岩石单轴抗压强度逐渐减小。本文不考虑孔隙直径不同对岩石力学参数造成的影响，假设所有孔隙率的孔隙直径都是相同的。图8所示为数值模拟得到的岩石单轴抗压强度随初始孔隙率变化的关系。从图中可以明显看出，单轴抗压强度随初始孔隙率增大而减小，并且趋势为随初始孔隙率的增大减小的速率越来越慢。这说明单轴抗压强度对初始孔隙率较小时变化的敏感性要大于初始孔隙率较大时变化的敏感性。本文模拟得到的结果与Heap等人^[32]获得结果在变

图 7 不同孔隙率单轴压缩应力应变曲线

图 8 单轴抗压强度与孔隙率关系

化趋势上具有较好的一致性，这从另一方面印证了本文所建立模型的正确性。

Sammis和Ashby^[11]提出孔隙诱导开裂模型之后，在此基础上，Zhu等人^[33]推导出了在单轴压缩条件下单轴压缩强度与孔隙率的解析表达式：

$$\sigma_{\text{UCS}} = \frac{1.325 K_{\text{IC}}}{\phi^{0.414} \sqrt{\pi r}}. \tag{14}$$

从式中可以看出当 $K_{\text{IC}} / \sqrt{\pi r}$ 为定值时，单轴抗压强度是随孔隙率的增大而减小的。将我们数值模拟得到的单轴抗压强度值和Baud等人^[12]得到的结果绘制在一张图中，如图9所示。Baud的结果与本文模拟结果都夹在 $K_{\text{IC}} / \sqrt{\pi r} = 50 \text{ MPa}$ 和 $K_{\text{IC}} / \sqrt{\pi r} = 5 \text{ MPa}$ 两条理论曲线之间。

图9 试验结果和数值模拟结果与单轴抗压强度理论预测结果对比

图10 不同初始孔隙率条件下弹性模量随应变变化关系

图11 不同初始孔隙率条件下弹性模量随孔隙率变化关系. (a) 5%; (b) 8%; (c) 11%; (d) 14%; (e) 17%; (f) 20%

图10所示为6种不同初始孔隙率条件下弹性模量随应变变化的关系。从图中可以看出,对6种不同的初始孔隙率弹性模量随应变的增加经历了快速增大到逐渐平稳再到迅速减小的一个过程。岩石试样在受压初始阶段,由于孔隙被逐渐压密,弹性模量快速增大;孔隙被压缩达到极限压密状态后,进入弹性阶段,弹性模量趋于平稳;随着应变的继续增加,岩石试样产生了损伤直至破坏,此时弹性模量开始降低并迅速减小。

图11所示为在孔隙压密前弹性模量随初始孔隙率变化的关系。从图中可以看出,弹性模量随初始孔隙率的减小是逐渐增大的,增加的幅度随孔隙的压密逐渐增大。

5 结论

考虑岩石内包含的孔隙裂隙的情况,提出压密因

子的概念,将应力应变曲线分成两段分别建立本构模型,运用有限元分析软件进行数值求解,通过将数值结果与试验结果进行对比,验证了模型的正确性。又进行了基质相同但孔隙率不同的岩石的单轴压缩破坏过程数值模拟。本文得到以下主要结论:

(1) 孔隙岩石受压过程中,当未受力时,压密因子为0,此时岩石弹性模量最小;当达到极限压缩状态即达到极限孔隙率时,压密因子为1,此时岩石弹性模量最大为岩石基质的弹性模量。

(2) 采用压密因子概念建立的岩石的本构模型可很好地模拟岩石的全应力应变曲线,特别是能得到岩石的压密阶段。

(3) 孔隙率对岩石的力学性质有重要的影响,对相同的岩石基质,孔隙率不同岩石的力学性质也不同。随孔隙率的减小,孔隙岩石的单轴抗压强度逐渐增大,弹性模量也逐渐增大。

参考文献

- 1 杨永明,鞠杨,王会杰. 孔隙岩石的物理模型与破坏力学行为分析. *岩土工程学报*, 2010, 32: 736–744
- 2 席道琰,杜赞,易良坤,等. 液体对岩石非线性弹性行为的影响. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28: 687–696
- 3 Lionço A, Assis A. Behaviour of deep shafts in rock considering nonlinear elastic models. *Tunn Undergr Sp Tech*, 2000, 15: 445–451
- 4 朱万成,唐春安,杨天鸿,等. 岩石破裂过程分析(RFPA2D)系统的细观单元本构关系及验证. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22: 24–29
- 5 Wong T, Baud P. The brittle-ductile transition in porous rock: A review. *J Struct Geol*, 2012, 44: 25–53
- 6 Perrin G, Leblond J B. Accelerated void growth in porous ductile solids containing two populations of cavities. *Int J Plasticity*, 2000, 16: 91–120
- 7 Li L, Aubertin M. A general relationship between porosity and uniaxial strength of engineering materials. *Can J Civ Eng*, 2003, 30: 644–658
- 8 Aubertin M, Li L. A porosity-dependent inelastic criterion for engineering materials. *Int J Plasticity*, 2004, 20: 2179–2208
- 9 Vajdova V, Zhu W, Natalie Chen T M, et al. Micromechanics of brittle faulting and cataclastic flow in Tavel limestone. *J Struct Geol*, 2010, 32: 1158–1169
- 10 Zhu W, Baud P, Vinciguerra S, et al. Micromechanics of brittle faulting and cataclastic flow in Alban Hills tuff. *J Geophys Res*, 2011, 116: B06209
- 11 Sammis C G, Ashby M F. The failure of brittle porous solids under compressive stress states. *Acta Metall*, 1986, 34: 511–526
- 12 Baud P, Wong T, Zhu W. Effects of porosity and crack density on the compressive strength of rocks. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2014, 67: 202–211
- 13 陈咏梅. 孔隙率对砂岩强度影响的损伤力学研究. *四川水利发电*, 1997, 16: 39–43
- 14 Al-Harathi A A, Al-Amri R M, Shehata W M. The porosity and engineering properties of vesicular basalt in Saudi Arabia. *Eng Geol*, 1999, 54: 313–320
- 15 杜修力,金浏. 含孔隙混凝土复合材料有效力学性能研究. *工程力学*, 2012, 29: 70–77
- 16 金浏,杜修力. 孔隙率变化规律及其对混凝土变形过程的影响. *工程力学*, 2013, 30: 183–190
- 17 李春光,王水林,郑宏,等. 多孔介质孔隙率与体积模量的关系. *岩土力学*, 2007, 28: 293–296
- 18 唐春安,王述红,傅宇方. 岩石破裂过程数值模拟. 北京: 科学出版社, 2003
- 19 曹文贵,李翔,刘峰. 裂隙化岩体应变软化损伤本构模型探讨. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26: 2488–2494
- 20 Liu H H, Rutqvist J, Berryman J G. On the relationship between stress and elastic strain for porous and fractured rock. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2009, 46: 289–296

- 21 Zhao Y, Liu H H. An elastic stress-strain relationship for porous rock under anisotropic stress conditions. *Rock Mech Rock Eng*, 2012, 45: 389–399
- 22 李连崇, Liu H H, 赵瑜. 基于双应变胡克模型的岩石非线性弹性行为分析. *岩石力学与工程学报*, 2012, 32: 2119–2126
- 23 Corkum A G, Martin C D. The mechanical behaviour of weak mudstone (Opalinus Clay) at low stresses. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2007, 44: 196–209
- 24 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程. 北京: 科学出版社, 2005
- 25 Tang C. Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1997, 34: 249–261
- 26 Zhu W C, Tang C A. Micromechanical model for simulating the fracture process of rock. *Rock Mech Rock Eng*, 2004, 37: 25–56
- 27 Rutqvist J, Tsang C F. A study of caprock hydromechanical changes associated with CO₂-injection into a brine formation. *Environ Geol*, 2002, 42: 296–305
- 28 秦跃平. 压缩实验煤岩孔隙率变化规律研究. *矿业工程研究*, 2010, 25: 1–3
- 29 王青元, 朱万成, 刘洪磊, 等. 单轴压缩下绿砂岩长期强度的尺寸效应研究. *岩土力学*, 2016, 37: 981–990
- 30 Wang Q Y, Zhu W C, Xu T, et al. Numerical simulation of rock creep behavior with a damage-based constitutive law. *Int J Geomech*, 2017, 17: 04016044
- 31 Xu T, Tang C, Zhao J, et al. Modelling the time-dependent rheological behaviour of heterogeneous brittle rocks. *Geophys J Int*, 2012, 189: 1781–1796
- 32 Heap M J, Xu T, Chen C. The influence of porosity and vesicle size on the brittle strength of volcanic rocks and magma. *Bull Volcanol*, 2014, 76: 856
- 33 Zhu W, Baud P, Wong T F. Micromechanics of cataclastic pore collapse in limestone. *J Geophys Res*, 2010, 115: B04405

Numerical analysis on nonlinear deformation behavior of rock considering compaction of pores

WANG QingYuan¹, ZHU WanCheng², XU Tao², LIU HongLei² & JIA JianGong³

¹ Department of Resources and Environment, Heze University, Heze 274015, China;

² Center for Rock Instability and Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

³ Heze Coal Administration Bureau, Heze 274015, China

The nonlinear behavior of porous or fractured rocks plays an important role for analyzing the mechanical response and stability in many geological and geotechnical applications. A stress-strain relationship considering the porosity is established for modeling the nonlinear deformation. In the present paper, firstly, on the basis of nonlinear deformation mechanism of porous or fractured rocks, the typical stress-strain curve was divided into two parts factitiously. Then, two constitutive models were established for the two parts, respectively. In order to describe the effect of the change of porosity on deformation behavior of rock, a new microcracks closure factors D_ϕ was proposed in the microcracks closure phase. For the other part, elastic damage mechanics is used to describe the constitutive law of meso-level elements, the maximum tensile strain criterion as well as the Mohr-Coulomb criterion is utilized as the damage threshold. The proposed model is implemented using finite element method by MATLAB programming under the environment of COMSOL Multiphysics. Then the model was validated by comparing the numerical simulations with our experimental result and the previously published experimental data. At last, numerical simulation on failure process of 6 rock specimens with different porosities but same rock matrix under uniaxial compression is presented. It is found that the established model accurately reproduces the typical stress-strain curve, the microcracks closure phase, especially. With the increase of porosity, the uniaxial compressive strength (UCS) decreases. And the elasticity modulus increases with the porosity decrease.

porosity, stress-strain relationship, nonlinearity, compaction factors, numerical simulation

doi: [10.1360/N092017-00122](https://doi.org/10.1360/N092017-00122)