

不同围压下岩石材料强度尺寸效应的数值模拟

杨圣奇 ,徐卫亚

(河海大学岩土工程研究所 ,江苏 南京 210098)

摘要 :应用岩石破裂过程分析系统 ,对不同围压下不同尺寸岩石材料进行了数值模拟试验 ,研究了围压与岩石材料强度尺寸效应之间的关系 .结果表明 ,围压越大 ,岩石材料强度尺寸效应越不明显 ,即围压能够降低尺寸对岩石强度的敏感程度 .岩石材料的非均质性不是一个静态变量 ,而是一个动态参数 ,与岩石材料内部裂纹的损伤演化密切相关 .低围压时 ,岩石试件内材料并未趋于均匀化 ,非均质性显著 ,强度尺寸效应明显 ;而高围压时 ,岩石试件内材料由低到高逐渐屈服破坏 ,材料趋于均匀化 ,均质性较好 ,因而强度尺寸效应不明显 .

关键词 岩石材料 ;非均质性 ;围压 ;强度 ;尺寸效应

中图分类号 :TU452 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2004)05-0578-05

岩石材料强度是岩土工程设计中重要的力学参数 .由于岩石材料具有强度尺寸效应现象 ,因此特定尺寸岩石材料的强度不能直接应用于岩土工程设计和本构关系的建立 .长期以来 ,岩石材料强度尺寸效应一直是岩石力学中重要的研究课题^[1~8] .目前对单轴压缩下岩石材料强度尺寸效应的试验和理论研究已经取得了许多重要成果^[1~12] .笔者在伺服试验机上通过对同直径不同长度大理岩样进行单轴压缩试验 ,初步研究了尺寸对岩石材料强度和变形特性以及破裂形式的影响规律 ,提出了大理岩石材料尺寸效应的理论模型 ,对于认识其他类似岩石材料的尺寸效应具有参考价值^[6] .迄今为止 ,对于不同围压下岩石材料强度尺寸效应的试验研究很少见到报道 ,主要是由于对不同尺寸岩样进行常规三轴压缩试验的难度较大 .近年来 ,随着数值模拟技术在岩石力学中的广泛应用 ,一些岩石力学科技工作者也运用该方法来解决岩石材料强度尺寸效应问题 ,并取得了一些有益成果 .最具代表性的是 ,唐春安等^[11]基于开发的岩石破裂过程分析系统 RFPA^{2D} ,对单轴压缩下岩石材料强度尺寸效应进行了数值模拟 ,得出岩石强度随尺寸增大而呈幂律衰减关系这一结论 ,模拟结果与试验结果相吻合 .鉴于此 ,本文尝试利用岩石破裂过程分析系统 RFPA^{2D} ,对不同围压下岩石材料强度尺寸效应进行数值模拟 ,力图明确围压对岩石材料强度尺寸效应的影响规律以及围压下岩石材料强度尺寸效应的机理 .

1 数值模型与方案设计

为了真正得到不同围压作用下岩样尺寸对强度的影响规律 ,必须明确能够满足数值模拟计算结果精度要求的基元尺寸 .根据文献 [6,11] 的研究结果 ,本文设定基元尺寸为 1 mm ,选取的岩样模型尺寸分别为 $\varnothing 15\text{ mm} \times 30\text{ mm}$, $\varnothing 25\text{ mm} \times 50\text{ mm}$, $\varnothing 37\text{ mm} \times 74\text{ mm}$, $\varnothing 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$, $\varnothing 75\text{ mm} \times 150\text{ mm}$.数值模型中基元材料的强度和弹性模量的均质度系数 m 为 2.0 , m 越大表示材料的性质越均匀 ,即模型中基元力学性质的差异越小 .弹性模量均值为 30 000 MPa ,强度均值为 150 MPa ,泊松比均质度系数为 100 ,泊松比均值为 0.25 .

模型加载方式如图 1 所示 ,图中灰度代表基元弹性模量值的大小 ,亮度越高 ,弹性模量值越大 .采用二向受压的平面应力模型(σ_1 为轴向应力 , σ_3 为围压) 整个加载过程采用位移控制的加载方式 ,加载位移量 $\Delta s = 0.005\text{ mm/步}$,加载总步数依据具体方案而定 .围压加载分为 5 级 ,依次为 0 MPa ,5 MPa ,10 MPa ,20 MPa ,40 MPa .数值模型采用修正的库伦准则(可考虑拉

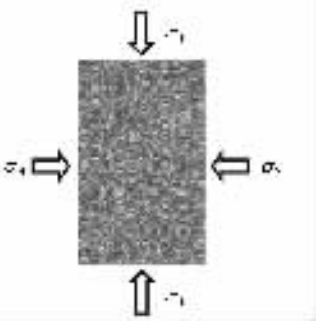


图 1 试件模型
Fig.1 Sketch of specimen

伸破坏)作为基元的破坏判据,基元材料的拉、压强度比为 1/10,最大拉应变系数和最大压应变系数分别为 1.5 和 200,残余阈值系数为 0.1,内摩擦角为 30°.

2 模拟结果及分析

大量试验研究表明^[12] 岩石围压效应非常显著,随着围压的增加,岩石峰值强度和峰值应变均呈线性增加,同时塑性变形逐渐增大,岩样破坏形态发生显著改变.分别对不同尺寸岩样在 5 个不同围压下进行数值模拟,图 2 是标准模型试件在围压作用下的全程应力应变曲线,模拟结果和文献^[12]的试验结果吻合较好.模拟结果充分表明,随着围压的增加,岩石试样的峰值应变、峰值强度以及残余强度均逐渐增加.

图 3 是不同围压作用下 $\varnothing 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 标准岩样的破坏形式(ϵ_1 为岩石的轴向应变).图中 1 个圆圈代表 1 个微破裂,其直径代表微破裂所释放的能量大小,圆圈直径越大,微破裂所释放的能量越多.由图可见,随着围压的增加,岩石的破坏由拉伸破坏向剪切破坏逐渐过渡和发展,而且宏观剪切破裂角与最大主应力方向基本上成 45°.需要说明的是,数值计算是在理想加载条件下进行的,而在实验室试验中,岩样端部和刚性垫块之间的摩擦效应是不可忽略的因素,对岩石的破坏形式会产生不同程度的影响.

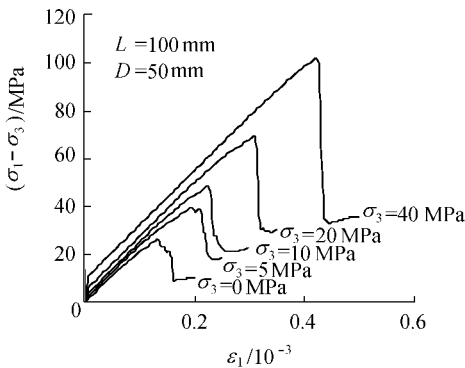


图 2 不同围压下试件的全程应力应变曲线
Fig.2 Complete stress-strain curves of specimens under different confining pressures

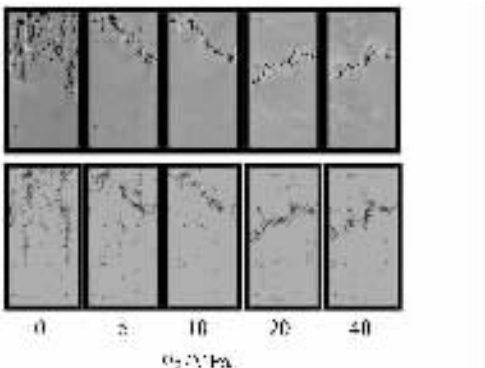


图 3 不同围压下试件($\varnothing 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$)的破坏形式
Fig.3 Failure forms of specimens($\varnothing 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$) under different confining pressures

岩样在围压作用下一般都是剪切破坏形式,且峰值强度与围压大致成线性关系,因而可以利用 Coulomb 准则即粘聚力和内摩擦角来表征岩石的强度特性.对图 2 的数值模拟结果用 Coulomb 准则分析,表明不同尺寸试样的围压与峰值强度显著成线性关系.限于篇幅,图 4 仅列出了 $\varnothing 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 岩样的强度分析结果.

图 5 是不同围压下岩石材料尺寸效应的数值模拟结果,限于篇幅,仅列出了围压 20 MPa 和 40 MPa 下岩石材料的尺寸效应.由图可见,同一围压下,尺寸对试样屈服前的变形特性没有影响,但随着尺寸的增大,岩石峰后脆性增强,这与文献^[1]的试验结果相符合.

笔者在文献^[6]中基于伺服试验机上得到大量同直径不同长度大理岩石材料的试验结果,提出了 1 个新的岩石材料强度尺寸效应理论模型

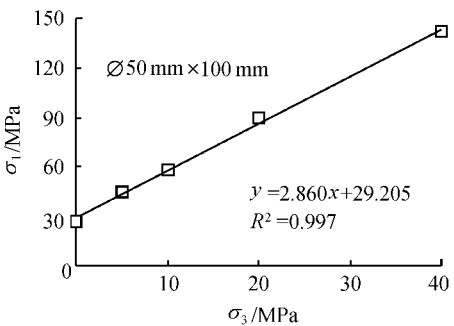


图 4 岩石试件的强度分析
Fig.4 Strength analysis of rock specimens

$$\sigma_0 = \sigma_2 e^{a+b(L/D)}$$

(1)

式中: σ_0 ——任意长径比岩样的力学参数; σ_2 ——标准岩样的力学参数,这里取所有试样的平均值; L/D ——岩样的长径比; a, b ——材料参数,通过非线性最小二乘法进行回归分析得到.

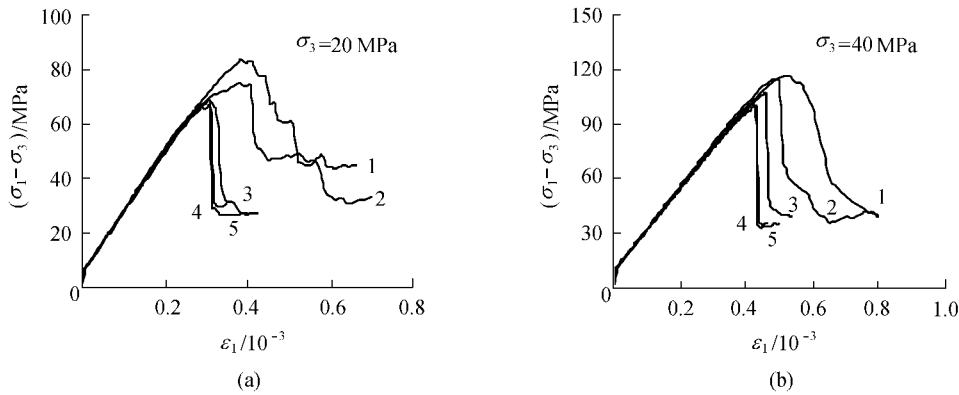
对式(1)稍作改动,得

$$\sigma_0 = \sigma_2 e^{a+\frac{b}{V}}$$

(2)

式(2)即为岩石材料强度尺寸效应的理论模型,其中 V 为岩样的体积.

基于图 5 数值模拟结果,可以得到不同围压下岩石试件尺寸对材料强度的影响规律,见图 6.限于篇幅,



1—∅15 mm × 30 mm 2—∅25 mm × 50 mm 3—∅37 mm × 74 mm 4—∅50 mm × 100 mm 5—∅75 mm × 150 mm

图5 不同围压下岩石材料的尺寸效应

Fig.5 Size effect of rock material under different confining pressures

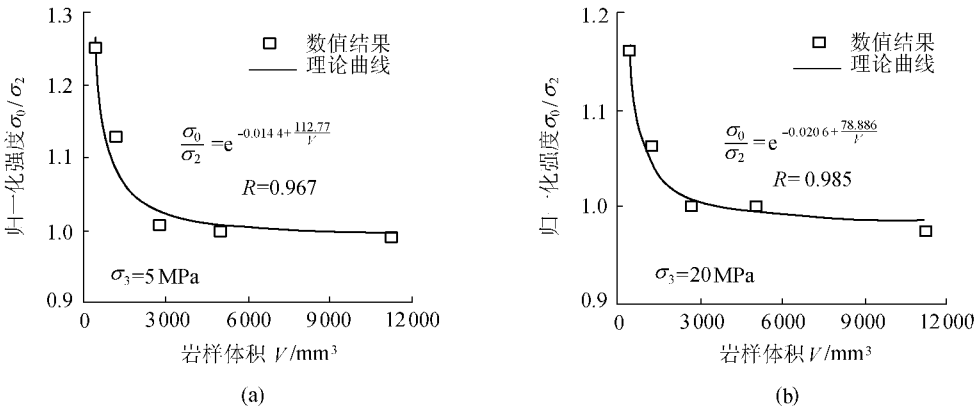


图6 不同围压下岩石材料强度尺寸效应的理论曲线和数值结果

Fig.6 Theoretical curve and numerical result of strength-size effect of rock material under confining pressures

这里仅列出围压 $\sigma_3 = 5 \text{ MPa}$ 和 $\sigma_3 = 20 \text{ MPa}$ 下岩石材料强度与试件尺寸的关系. 由图可见, 相同围压下, 随着尺寸的增大, 岩石强度呈幂律衰减趋势, 但当尺寸增加到 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 时, 便基本保持恒定, 不再明显减小. 其中理论曲线是由式(2)基于数值结果的回归分析得到. 在图中列出了理论曲线的回归模型, 可以看出数值结果和理论曲线吻合得很好, 且相关系数较高, 表明本文提出的不同围压下岩石材料强度尺寸效应的理论模型式(2)是合理的.

为了能清楚地看出围压对岩石材料强度尺寸效应的敏感程度, 对不同围压下岩石材料强度进行归一化处理, 见图7. 由图7可以看出, 随着围压的增大, 岩石材料强度尺寸效应有减小的趋势, 即尺寸对强度变得不敏感. 图8(a)是马尔基兹灰岩在单轴应力状态下强度与尺寸的关系, 随着尺寸的增加, 其强度逐渐降低, 但当围压增至 100 MPa 时, 岩石材料强度尺寸效应便消失了, 如图8(b)所示^[13]. 这充分表明, 围压能够显著降低岩石尺寸对材料强度的敏感性.

3 围压下岩石材料强度尺寸效应的机理

前述对数值模拟的结果分析表明, 随着围压的增加, 岩石材料强度尺寸效应变得不明显, 即围压能够降低尺寸对强度的敏感程度. 由于对不同围压下不同尺寸岩样进行试验存在很大的困难, 因而迄今为止, 围压与岩石材料强度尺寸效应的关系以及围压下岩石材料强度尺寸效应的机理未见任何报道. 文献[9, 14]的理论和试验结果充分表明, 岩石强度尺寸效应表现为直径和体积效应, 与岩石长度无关, 岩石材料强度体积效

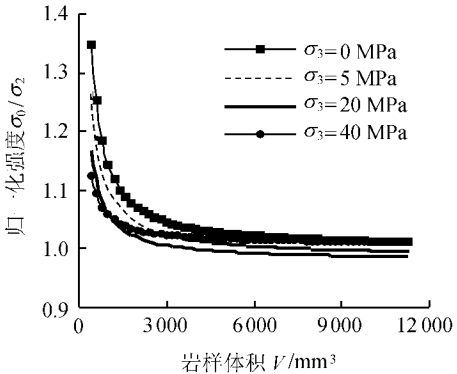


图7 围压对岩石材料强度尺寸效应的影响
Fig.7 Influence of confining pressure on strength-size effect of rock material

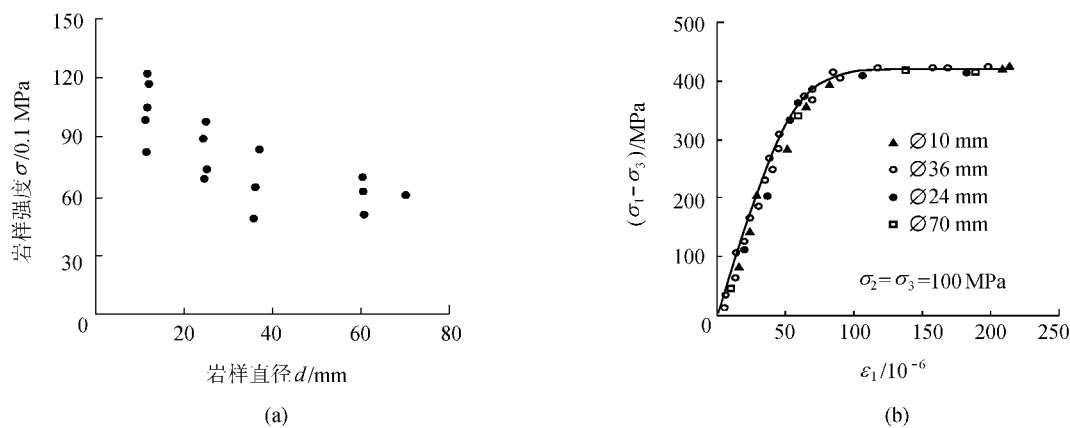


图 8 马尔基兹灰岩尺寸与强度的关系

Fig.8 Relation between size and strength of Maurizis limestone

应根源于材料的非均质性。

岩石材料的非均质性不是一个静态变量,而是一个动态参数,与外在荷载作用下岩石内部裂纹的损伤演化密切相关。岩石试件内部材料强度处处不相等,差异很大。低围压时,强度较低的材料在岩石屈服过程中,首先达到其承载极限而弱化破坏,而强度较高的材料在岩石达到宏观峰值应力之前,随着轴向承载能力的降低,由于未达到其承载极限而处于卸载回弹状态,储存于其中的应变能得以释放,使强度较低材料破坏区域附近裂纹进一步扩展,从而形成变形的局部化。此时岩石内部材料并未趋于均匀化,非均质性显著,而且随着变形局部化范围的进一步扩大,岩石材料的非均质性有增大趋势,因而岩石材料强度尺寸效应明显,即尺寸对强度的敏感程度较高。高围压时,岩石试件内强度较低的材料首先达到其承载极限而屈服弱化破坏,此后随着变形的进一步增加,必须持续增大轴向应力使岩石试件破坏,从而强度较高的材料也会达到其承载极限而破坏。在岩石试件达到峰值强度之前,岩石内材料变形趋于均匀化,非均质性不显著,因而岩石材料强度尺寸效应不明显,即尺寸对强度的敏感程度较低。

需要特别指出的是,本文的研究对象——岩石材料和工程对象——岩体的非均质性有着不同的表现形式。岩体是被节理、断层、裂纹等结构面切割的岩石块体的集合体,而结构面在很大程度上将决定岩体的强度和变形特性,因而不同围压下岩体强度的尺寸效应机理有别于岩石材料强度的尺寸效应。对于给定的岩体问题,随着尺寸的增加,岩块的非均质性在岩体中的影响逐步减小,而节理、层理和断层等结构面的影响则逐渐加强,因而岩体强度的尺寸效应很大程度上是结构面强度的尺寸效应。单轴压缩下不同尺寸岩体强度与结构面之间的摩擦滑移密切相关,而随着围压的增大,结构面之间的摩擦滑移受到抑制,结构面安全状态系数提高,因而尺寸对材料强度的敏感性得以降低。

4 结 论

本文采用数值模拟方法对不同围压下岩石材料强度尺寸效应进行了研究,并从材料作为动态参数的非均质性方面对不同围压下岩石材料强度尺寸效应的机理进行了初步探讨。结果表明,围压越大,岩石材料强度尺寸效应越不明显,即围压能够降低尺寸对岩石材料强度的敏感程度。低围压时,岩石试件内部材料并未趋于均匀化,非均质性显著,强度尺寸效应明显,而高围压时,岩石试件内材料由低到高逐渐屈服破坏,材料趋于均匀化,均质性较好,因而强度尺寸效应不明显。

尺寸效应是岩石材料本身固有特性。尽管目前对岩石强度尺寸效应的研究已取得一定的进展,但由于岩石材料具有非均质性、各向异性、不连续性等特点,再加上工程岩体复杂的地质环境和条件,岩石强度尺寸效应仍有许多问题有待进一步研究。

a. 现有文献表明^[1~12],对岩石强度尺寸效应的研究基本上是针对完整岩石而言,而且岩样尺寸均较小,此外很少考虑裂隙岩样,实质上现场工程岩体在一定程度上已经遭到破坏,因而为了定量和准确描述岩石强度尺寸效应的规律,今后需进行大量考虑内部裂纹、节理及断层等不连续面的大尺度岩样的试验研究。

b. 工程岩体不仅是一种材料,而且总是处于一定的应力应变环境中,岩石力学特性与加载速率、温度和

围压有着很大的关系.为了建立完善的本构理论关系,必须深入研究不同加载速率、温度和围压作用下岩石强度尺寸效应的规律.

c. 随着计算机的日新月异与飞速发展,采用数值模拟技术、计算机层析技术 CT、扫描电镜 SEM 以及声发射 AE 等先进技术,从微细观层次上揭示不同尺寸岩石的破坏机制,探寻强度尺寸效应的机理,也将成为未来岩石强度尺寸效应研究的重要途径.

参考文献:

- [1] HUDSON J A, CROUCH S, FAIRHURST C. Soft, stiff and servo-controlled testing machines[J]. Eng Geol, 1972, 13(3): 155—189.
- [2] 徐卫亚, 陈丹妮. 岩体力学性质尺寸效应研究——现状、进展及方向[A]. 见: 中国青年学者岩土工程力学及其应用讨论会论文集[C]. 武汉: 科学出版社, 1994. 256—262.
- [3] 尤明庆, 华安增. 岩样单轴压缩下的尺度效应和矿柱支承性能[J]. 煤炭学报, 1997, 22(1): 37—41.
- [4] 尤明庆, 邹友峰. 关于岩石非均质性与强度尺寸效应的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 391—395.
- [5] 杨圣奇, 苏承东, 明平美, 等. 岩石强度尺寸效应的研究方法和机理的研究[J]. 焦作工学院学报, 2002, 21(5): 324—326.
- [6] 杨圣奇. 岩石材料的非均质性与力学特性的研究[D]. 焦作: 焦作工学院, 2003.
- [7] 潘一山, 魏建明. 岩石材料应变软化尺寸效应的实验和理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 215—218.
- [8] 刘宝琛, 张寄生, 杜奇中, 等. 岩石抗压强度的尺寸效应[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 611—614.
- [9] 周国林, 谭国柱, 李启光, 等. 剪切破坏模式下岩石的强度准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 753—762.
- [10] 杨友卿. 岩石强度的损伤力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(1): 23—27.
- [11] TANG Chun-an, LIU H, LEE P, et al. Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression Part II: constraint, slenderness and size effect[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2000, 37(4): 571—583.
- [12] 尤明庆. 岩石试样的强度及变形破坏过程[M]. 北京: 地质出版社, 2000. 100—101.
- [13] MOGI K. Pressure dependence of rock strength and transition from brittle fracture to ductile[J]. Tokyo: Bull Earthq Research Inst, 1966. 44—46.
- [14] BROWN E T, GONANO L P. Improved compression test technique for soft rock[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1974, 100: 197—199.

Numerical simulation of strength-size effect of rock materials under different confining pressures

YANG Sheng-qi, XU Wei-ya

(Geotechnical Research Institute of Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: By use of the rock failure process analysis, numerical simulation tests were performed on rock materials with different sizes under different confining pressures for investigation of the relationship between the confining pressure and strength size effect of rock materials. The results showed that the dependence of the strength of rock materials on their size became less evident as the confining pressure increased, i.e. the confining pressure could reduce the sensitivity of the size of rock materials to their strength. The inhomogeneity of rock materials is not a static variable but a dynamic parameter, which has a close relationship with the crack development of rock materials. At low confining pressures, the inhomogeneity of rock materials results in obvious strength-size effect. However, at high confining pressures, yield and failure gradually occur in rock materials, which make the materials tend to be homogeneous, therefore, the strength-size effect of the materials is not remarkable.

Key words: rock material; inhomogeneity; confining pressure; strength; size effect