

加载条件对不同尺寸岩石单轴压缩破裂过程的影响研究

潘鹏志, 周 辉, 冯夏庭

(中国科学院 武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 针对岩石单轴压缩试验中存在的加载条件敏感性的问题, 采用自行开发的二维弹塑性细胞自动机模拟系统 EPCA^{2D}, 对不同尺寸的非均质岩石试样进行单轴压缩破裂过程模拟, 研究不同的加载条件对岩石宏观变形行为和破裂模式的影响。结果表明, 均质性相同的岩石试样在单轴压缩破裂过程中所表现的尺寸效应和形状效应现象与岩石本身的非均质性关系不大, 加载垫板与试样之间力学性质的差异是造成岩样单轴压缩破裂过程尺寸效应和形状效应的根本原因, 模拟结果再现了典型的试验现象。通过研究加载垫板与试样端部之间不同的摩擦情况, 结果表明, 即使试样端部存在较小的摩擦, 仍然会造成岩样单轴强度和变形特性的离散性。因此, 通过减小试样端部的摩擦来提高岩石单轴压缩试验质量是不可靠的。

关键词: 岩石力学; 单轴压缩; 尺寸效应; 形状效应; 全程应力-应变曲线; 声发射

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)增 2 - 3636 - 07

RESEARCH ON EFFECT OF LOADING CONDITIONS ON FAILURE PROCESSES OF ROCKS WITH DIFFERENT SIZES UNDER UNIAXIAL COMPRESSION

PAN Pengzhi, ZHOU Hui, FENG Xiating

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Based on the phenomenon of loading condition sensitivity, which exists in the uniaxial compression tests of rocks, a numerical study is conducted to investigate the effect of loading conditions on the deformation behaviors and failure patterns of rocks with different sizes and shapes under uniaxial compression, using a self-developed numerical code EPCA^{2D}. It is concluded that, for rocks with the same homogeneity, the size and shape effects are mainly caused by the mismatch of mechanical properties between rock specimen and loading platen. The simulation results agree with the experimental phenomenon well. Different friction conditions between loading platen and specimen's ends are considered in the simulation. Results indicate that the discreteness of uniaxial strength and deformation behaviours with different frictions exist even when the frictions are reduced to a very low value. Therefore, it is unfavourable to improve the experimental quality by reducing the frictions.

Key words: rock mechanics; uniaxial compression; size effect; shape effect; complete stress-strain curve; acoustic emission

收稿日期: 2007 - 08 - 06; **修回日期:** 2007 - 10 - 19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50709036); 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室开放课题资助项目(O710121Z01)

作者简介: 潘鹏志(1976 -), 男, 博士, 2000年毕业于武汉理工大学工程力学专业, 现任助理研究员, 主要从事岩石破裂过程及其多场耦合方面的研究工作。E-mail: pzpan@whrsm.ac.cn

1 引言

进行实验室岩样试验是确定岩体工程岩石力学性质的重要手段, 岩石单轴压缩破裂过程试验是所有岩石力学试验中最简单也是最基本的试验方法。通过进行室内岩石单轴压缩破坏过程试验可以获取岩石的应力-应变曲线, 进而获得弹性模量, 强度等力学参数, 但试验结果往往存在较大的离散性。

例如, 不同尺寸、不同形状岩石试样在单轴压缩破裂过程中表现出的尺寸效应和形状效应就是试验结果离散性的一种典型表现。已有很多学者针对岩石、混凝土等脆性材料开展了尺寸效应方面的研究^[1]。Z. P. Bažant 等^[2-3]从细观力学角度, 通过对传播中的轴向劈裂裂纹带所做的能量分析表明, 整体压缩断裂存在尺寸效应, 提出了抗压强度的尺寸效应理论。刘宝琛等^[4]在 7 种岩石力学试验的基础上, 研究了岩石抗压强度的尺寸效应, 获得了一个经验公式。J. A. Hudson 等^[5]对 3 组不同大小不同形状的岩石试样, 采用等应变控制法研究了岩石单轴压缩破裂过程的尺寸效应和形状效应。潘一山和魏建明^[6]采用同直径不同高度的砂岩试件进行岩石全程应力-应变试验, 发现了砂岩的应变软化尺寸效应, 并采用梯度塑性理论进行分析。李彦明^[7]基于能量耗散理论, 对混凝土的受力变形过程、强度本质进行了研究分析, 并提出混凝土材料强度的尺度效应律预期形式。周青松和于清树^[8]讨论了混凝土材料的各种断裂模型, 并给出了不同断裂模型下的 Bažant 尺寸效应公式。尤明庆和邹友峰^[9]对岩石非均质性与强度尺寸效应进行了探讨。杨圣奇等^[10]对大理岩的尺寸效应进行了理论和试验研究, 得出了大理岩材料尺寸效应的理论模型。另一方面, 也有学者^[11, 12]通过试验研究表明岩石强度与试样尺寸无关。

在数值模拟方面, 唐春安等^[13]采用 RFPA 模拟系统研究了不同尺寸和形状岩石的破裂过程, 通过加载垫板刚度的变化来研究岩样端部与加载垫板之间的摩擦情况。赵康等^[14]利用 RFPA 软件研究了岩石端部效应对其声发射的影响。薛俊华和余国锋^[15]研究端部效应对岩石单轴压缩条件下的试样强度和破裂模式的影响。

综上所述, 国内外学者针对岩石单轴压缩的尺寸效应和形状效应进行了深入的研究, 但是上述研

究很少涉及不同加载条件(例如试样端部与加载板之间的不同摩擦情况等)对岩石破裂过程宏观变形行为和破裂模式的影响。

因此, 根据前人的试验成果, 本文采用自行开发的岩石破裂过程的弹塑性细胞自动机模拟系统 EPCA^{2D} [16, 17], 对不同尺寸、不同形状的非均质岩石试样进行单轴压缩破裂过程模拟, 分别考虑不同的加载条件, 即考虑和不考虑试样端部与加载板之间的相互作用, 以及考虑试样端部与加载板之间的不同的摩擦情况, 研究不同加载条件(即边界条件)对岩石的宏观变形行为和破裂模式的影响。

2 岩样不同尺寸和形状的定义

为便于比较, 本文采用 J. A. Hudson 等^[5]所用的岩样的几何数据, 如表 1 所示。这里, 把长径比相同, 大小不同的岩石试样定义为不同的尺寸(例如表 1 中长径比为 1:1, 不同尺寸的岩石试样), 由此造成的不同岩样间强度和变形特性的显著差异的现象叫做尺寸效应现象。直径相同, 高度不同的岩石试样具有不同的形状(例如表 1 中直径为 50.8 mm, 不同长度的岩样), 由此造成的宏观变形特性和强度特性的显著差异的现象称为形状效应现象。

表 1 试样的几何数据

Table 1 Geometry of rock specimen in modeling

第 1 组		第 2 组		第 3 组		长径比
直径 /mm	长度 /mm	直径 /mm	长度 /mm	直径 /mm	长度 /mm	
19.05	6.350	50.8	16.9	101.6	33.9	1:3
19.05	9.525	50.8	25.4	101.6	50.8	1:2
19.05	19.050	50.8	50.8	101.6	101.6	1:1
19.05	38.100	50.8	101.6	101.6	203.2	2:1
19.05	57.150	50.8	152.4	101.6	304.8	3:1

3 模拟方法

3.1 EPCA 模拟系统

岩石破裂过程的弹塑性细胞自动机模型包括以下几个主要的内容, 即非均质材料力学模型, 弹塑性细胞自动机更新规则, 元胞单元弹脆塑性本构关系以及元胞单元强度准则和流动法则等。该模型已经在岩石单轴压缩破裂过程模拟、I 和 II 类全过程

应力 - 应变曲线模拟、裂纹扩展、渗流 - 应力耦合作用下的破裂过程模拟以及开挖损伤区的 THM 耦合过程模拟等方面得到了成功的应用, 关于弹塑性细胞自动机模型更详细的描述参见 X. T. Feng 等^[16, 17]的研究。

3.2 模拟方案

采用表 1 所示的试样几何数据, 分成 3 组, 进行不同形状、尺寸的岩石试样单轴压缩破裂过程模拟。首先分别考虑图 1 所示 2 种数值试验方案, 即考虑和不考虑试样端部与加载板之间的相互作用。然后利用图 1(a) 的模型, 通过将试样端部不同数目的元胞节点施加径向(即水平 x 方向)约束, 来模拟试样端部与加载垫板之间的不同摩擦情况。计算中, 设置细胞自动机迭代精度为 1×10^{-10} , 容许误差为 1%, 非线性最大迭代步为 500, 采用平面应变模型。元胞单元服从弹脆塑性本构关系, 采用 Mohr-Coulomb 强度准则和塑性关联流动法则^[16, 17]。

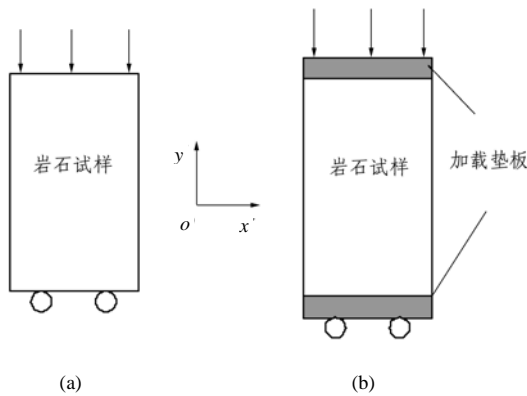


图 1 加载条件示意图

Fig.1 Schematic diagram of loading conditions

在绘制应力 - 应变曲线时, 轴向应力是通过将试样端部的反力除以试样的横截面积得到, 轴向应变是将轴向位移除以试样的原始长度得到。另外, 轴向应力也可以通过将组成岩石试样(不包括加载垫板)的所有元胞单元轴向的应力相加, 再除以元胞单元的总数而得到, 轴向应变通过将组成岩石试样(不包括加载垫板)的所有元胞单元的轴向应变相加, 再除以元胞单元的总数而得到。这样, 所得到的全程应力 - 应变曲线是岩样本身的应力 - 应变曲线, 而不包含加载垫板。通过这 2 种途径得到的全程应力 - 应变曲线是等价的。

3.3 岩石试样的非均质性

由于不考虑试样材料的离散性对不同尺寸岩石

试样破裂过程的影响, 认为不同尺寸岩石试样的均质度相同, 在弹塑性细胞自动机模型中, 岩石试样的力学参数, 包括弹性模量、黏聚力等均服从 Weibull 分布, 用均质度系数 m 和随机种子数 s 对岩石的弹性参数和强度参数进行赋值, 这里取 $m = 2.0$, $s = 10$, 从而确保不同尺寸岩石试样包含缺陷的概率大致相同。关于岩石非均质性的赋值参见 X. F. Feng 等^[16]的研究, 岩样的力学参数见表 2。

表 2 岩样力学参数

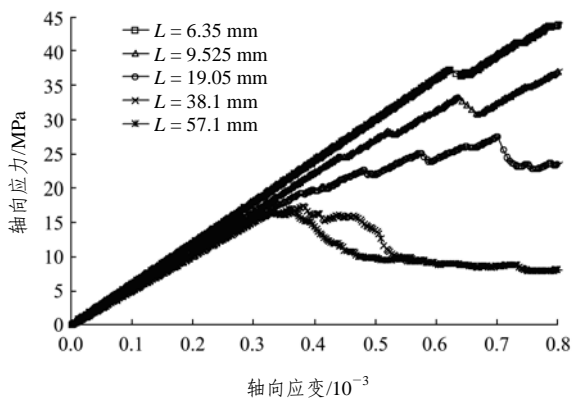
Table 2 Mechanical properties of rock specimens

弹性模量 均值/GPa	泊松 比	黏聚力均 值/MPa	随机种 子数	残余强 度系数	内摩擦 角/(°)	均质度 系数	软化 因子
70	0.3	10	10	0.01	49	2.0	0.1

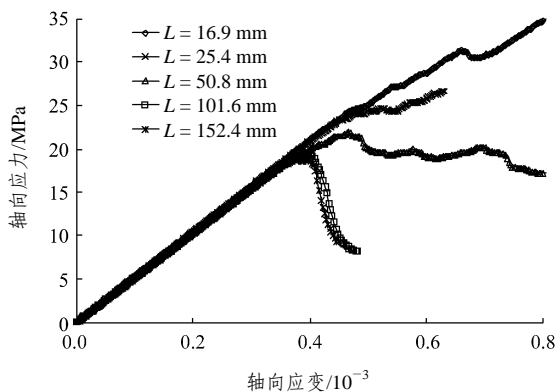
4 端部效应的影响

图 2 是考虑岩样端部摩擦效应的不同形状岩石试样单轴压缩全程应力 - 应变曲线, 可以看出, 同一直径不同长度的岩石试样, 试样的长度对峰值以前岩样的变形行为影响较小。但是峰后的应力 - 应变曲线受岩样长度的影响较大, 长度较大的岩样, 峰后曲线下落较快, 坡度较陡, 表现为脆性和应变软化的特征。随着岩样长度的减小, 岩样峰后曲线下落越来越缓, 有的岩样呈现应变硬化的特征。同一直径、不同长度岩样所表现的不同的应力 - 应变特征就是通常所说的形状效应。这是因为在存在加载垫板的作用时, 其对试样端部有“钳住”的效应, 使得在岩样端部附近存在三轴压缩区。岩样长度越小, 这个三轴压缩区对岩样的变形和强度特性影响越大。当长度小到一定程度后, 整个岩样将都处于三轴压缩状态。随着岩样长度的增大, 三轴压缩区对整个岩样的影响逐渐减小, 当岩样长度大到一定程度后, 加载垫板所产生的端部效应对于岩样的变形、强度特性和破裂模式的影响可以忽略不计, 此时得到的试验数据能够较好地反映岩样本身的固有属性。本文的模拟结果与刘宝琛等^[5]的试验结果吻合较好。

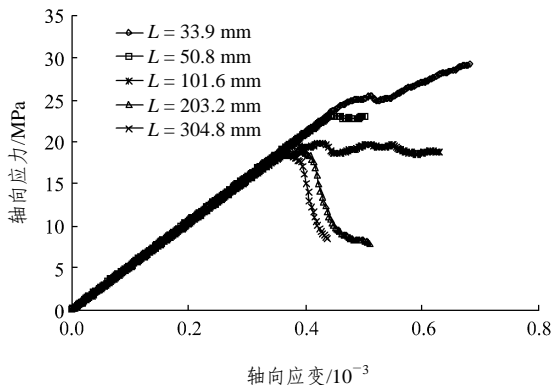
当不考虑岩样端部与加载垫板的相互作用时, 即两者之间在径向方向不存在任何摩擦时(对应于图 1(a)的加载条件), 岩样处于一种“纯粹”的单轴压缩状态, 端部不存在被“钳住”的效应。在这种情况下, 相同直径不同长度的岩石试样表现为较为



(a) 直径 19.05 mm



(b) 直径 50.8 mm



(c) 直径 101.6 mm

图 2 考虑加载板作用效应, 相同直径不同长度单轴压缩下岩样全程应力 - 应变曲线(EPCA 模拟结果)

Fig.2 Complete stress-strain curves of rocks with certain diameter but different lengths considering platen effect during failure process of uniaxial compression (simulating results of EPCA)

相近的宏观变形特征, 在全程应力 - 应变曲线上表现为几乎在同一应力水平达到其峰值强度, 峰前曲线重合, 而峰后变形曲线也相差不大(如图 3 所示), 因此在图 1(a)所示的单轴压缩条件下, 同一直径不同长度的岩样几乎不存在形状效应现象。

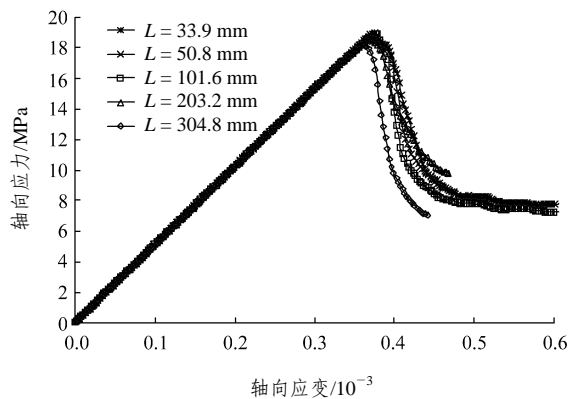
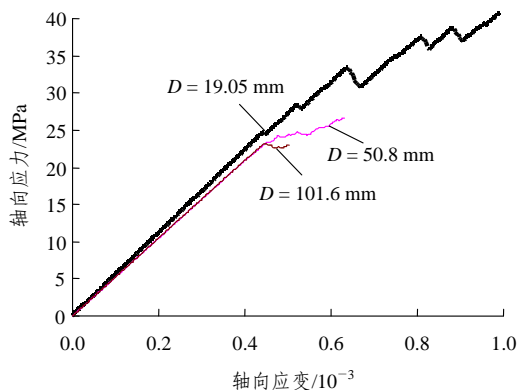


图 3 不考虑加载板作用效应的相同直径(101.6 mm)不同长度单轴压缩下岩样全程应力 - 应变曲线(EPCA 模拟结果)

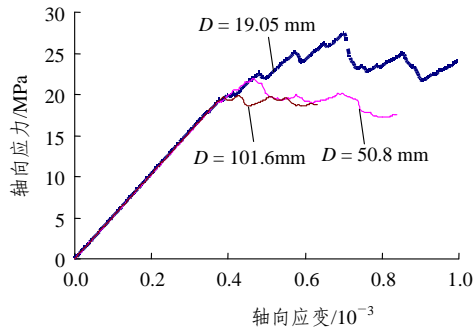
Fig.3 Complete stress-strain curves of rocks with certain diameter but different lengths without considering platen effect during failure process of uniaxial compression(simulating results of EPCA)

对比图 2, 3 可以看出, 在岩样的均质性大致相同的情况下, 形状效应与边界加载条件密切相关, 而非均质性关系不大。

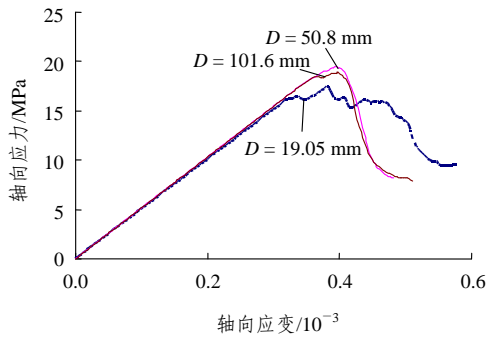
图 4 是考虑加载板作用, 长径比相同, 不同尺寸岩样的全程应力 - 应变曲线, 可以看出, 不同尺寸岩样几乎在同一应力水平达到初始屈服, 而峰后的变形几乎表现为相似的变形形态, 对于长径比较小的试样, 峰后表现为应变硬化的现象, 且尺寸较大试样应变硬化的程度较小。而长径比较大的试样多表现为应变软化的现象, 且不同尺寸岩样的软化程度有一些差别。但总的看来, 长径比相同、尺寸不同的试样, 其尺寸效应不是很明显。这是因为, 长径比相同的试样, 加载垫板在试样端部产生的端部效应是相似的。而当不考虑加载垫板的作用时(见图 5), 岩样的峰值强度几乎是相同的, 但峰后变形



(a) 长径比 1 : 2



(b) 长径比 1 : 1



(c) 长径比 2 : 1

图 4 考虑加载板作用效应的长径比相同,不同尺寸岩样的全程应力应变曲线

Fig.4 Complete stress-strain curves of rocks with certain L/D ratio but different sizes considering platen effect during failure process of uniaxial compression

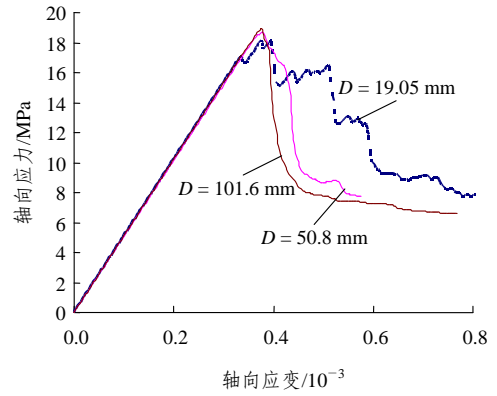
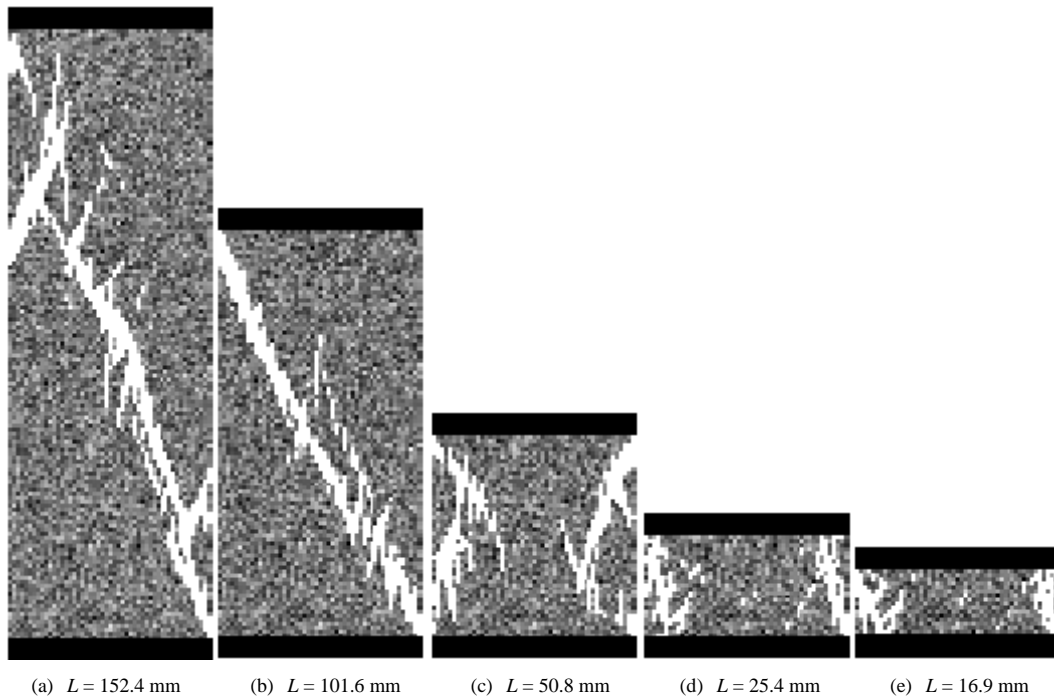


图 5 不考虑加载板作用效应,长径比 1 : 1 不同尺寸岩石试样全程应力 - 应变曲线

Fig.5 Complete stress-strain curves of rocks with certain L/D ratio but different sizes without considering platen effect during failure process of uniaxial compression

存在一些差别,可以认为是由于非均质性引起的。尽管本文对岩样采用相同的均质度系数,但是不同尺寸岩样之间的非均质性还是有些差别的。

由图 6, 7 可知,由于加载板与试样端部的相互作用,对于长度较小的岩石试样,其破裂模式主要表现为表层的剥落形式,随着试样长度的增加,岩样破裂模式逐渐转为贯穿中部的剪切破裂模式,长度较大的岩样其破裂模式不受端部效应的影响。当



(a) $L = 152.4$ mm (b) $L = 101.6$ mm (c) $L = 50.8$ mm (d) $L = 25.4$ mm (e) $L = 16.9$ mm

图 6 考虑加载垫板的作用,直径为 50.8 mm,不同长度的岩样的破裂模式

Fig.6 Final failure patterns of rocks with diameter 50.8 mm and different lengths considering loading platen effect

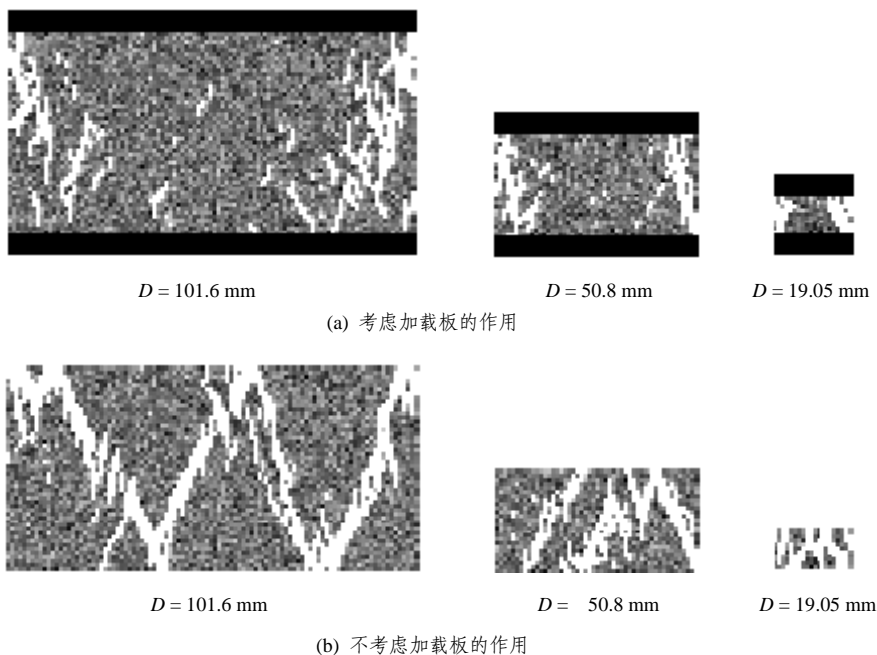


图 7 长径比为 1 : 2, 不同尺寸岩样的破裂模式
Fig.7 Final failure patterns of rocks with L/D ratio 1 : 2 and different sizes

不考虑岩样端部与加载板之间的相互作用时, 直径相同, 长度不同的试样, 其破裂模式差别较大。长度较小的岩样多表现为轴向劈裂破坏, 长度较大的试样多表现为剪切破坏。

5 不同摩擦情况的影响

由上可知, 不同尺寸岩样在单轴压缩破裂过程中所表现的尺寸效应和形状效应是由于加载垫板与试样之间力学性质的差异造成的, 而这个差异归根结底是由于试样端部径向变形受到约束引起的, 上面的模拟结果对应了 2 种极端的情况, 当不考虑加载板的作用时, 试样端部的径向完全不受约束的作用, 此时对应了一种“纯粹”的单轴压缩状态。而当考虑加载垫板作用时, 试样端部的径向方向完全受约束的作用。但在试验中, 上述 2 种极端的情况是比较少碰到的, 更多的加载情况是介于 2 种极端情况之间。为了反映单轴压缩过程中试样端部摩擦对结果的影响, 这里考虑不同的径向约束的情况。将图 1(a)中的岩石试样端部不同数目的元胞节点施加径向方向位移约束来定性反映试样端部的不同摩擦情况。

选用直径 50.8 mm, 长度 25.4 mm 的试样进行模拟, 因为从前面的模拟发现, 这种尺寸的试样受端部效应的影响较为显著。设置端部径向方向受约

束的元胞节点数目占端部元胞节点总数的百分比, 则纯单轴压缩情况对应受约束的元胞节点数目的百分比为 0, 径向位移完全约束时的百分比为 100%。

模拟结果(见图 8)表明, 试样端部的摩擦情况对岩石变形和强度特性影响较大, 即使端部摩擦降低到一个比较小的数值, 仍然存在明显的端部效应现象, 只有摩擦减小到比较小或者完全消除的情况, 端部效应现象才能较为彻底的清除。但是在试验中, 端部摩擦是很难降到比较小或者完全消除, 因此, 在试验中通过减小摩擦来提高试验数据的质量是不可靠的。K. Mogi^[18]提出了几种减小端部效应的方法, 包括在试样端部涂抹润滑剂、增加岩样长度、改变岩样的形状(例如把试样加工成骨头形状)、施加围压以及在试样和加载板连接的位置用环氧树脂

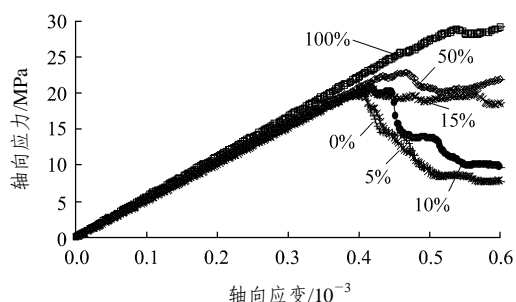


图 8 考虑试样端部摩擦情况的全程应力 - 应变曲线
Fig.8 Complete stress-strain curves of rock specimens with considering of different friction on the ends

进行固定等。并且指出,通过施加润滑剂来减小摩擦是不可靠的,因为采用不同的润滑剂所得的结果差别较大,这一观点跟本文的模拟结果是一致的。

6 结 论

造成岩石单轴压缩试验结果离散性的原因是很多的,但总的来说可以分为2个方面,一是岩石本身性质的离散性,例如岩石的非均质性。二是试验过程中边界条件的离散性,例如加载方式、加载速率、环境温度、湿度以及试验机的刚度等。针对这一问题,本文采用自行开发的岩石破裂过程弹塑性细胞自动机模拟系统 EPCA,对不同尺寸、形状的岩石试样,在均质性大致相同的情况下,分别在不同的边界加载条件下进行的单轴压缩破裂过程模拟,可以得出以下结论:

(1) 当岩石试样的均质性相同时,岩石破裂过程中存在的尺寸效应和形状效应是由于边界加载条件的不同引起的。当考虑试样端部效应时,在单轴压缩破裂过程中会存在形状和尺寸效应,而如果岩样处于一种“纯粹”的单轴压缩状态,则基本上不存在形状和尺寸效应现象。由于端部的“钳住”效应,长度较短的岩样,强度较高。随着长度的增大,这种“钳住”效应对试样整体强度的影响逐渐降低。当长度达到某一极限值时,再增加长度,岩样的强度趋于一个稳定值,这个稳定的值可以认为是岩样单轴抗压强度。

(2) 通过对岩样施加不同的径向约束来模拟试样端部存在的不同的摩擦情况,结果表明,即使端部摩擦减小比较小的数值,仍然会存在明显的端部效应现象,通过减小端部摩擦来提高岩石单轴试验的质量是不可靠的。

参考文献(References):

[1] 张立军, 安明喆. 混凝土强度的尺寸效应评述[J]. 煤炭工程, 2005, (10): 50 - 53.(ZHANG Lijun, AN Mingzhe. Review on size effects of concrete strength[J]. Coal Engineering, 2005, (10): 50 - 53.(in Chinese))

[2] BAŽANT Z P, CHEN E P. Scaling of structural failure[J]. Appl. Mech. Rev., 1997, 50(10): 593 - 627.

[3] BAŽANT Z P, XIANG Y X. Size effect in compression fracture: splitting crack band propagation[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1997, 12(2): 162 - 172.

[4] 刘宝琛, 张家生, 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.(LIU Baochen, ZHANG Jiasheng, DU Qizhong, et al. A study of size effect for compression strength of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

Engineering, 1998, 17(6): 611 - 614.(in Chinese))

[5] HUDSON J A, BROWN E T, FAIRHURST C. Shape of the complete stress-strain curve for rock[C]// Stability of Rock Slopes, Proceedings of the 13th Symposium on Rock Mechanics, Urbana: University of Illinois, ASCE, 1971.

[6] 潘一山, 魏建明. 岩石材料应变软化尺寸效应的试验和理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 215 - 218.(PAN Yishan, WEI Jianming. Experimental and theoretical study on size effect on strain softening of rock materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(2): 215 - 218.(in Chinese))

[7] 李彦明. 混凝土材料强度的尺度效应律[J]. 山西建筑, 2007, 33(6): 166 - 167.(LI Yanming. Scale effects of strength on concrete material[J]. Shanxi Architecture, 2007, 33(6): 166 - 167.(in Chinese))

[8] 周青松, 于清树. 混凝土材料的断裂模型和强度尺寸效应[J]. 安徽工业大学学报, 2006, 23(1): 59 - 63.(ZHOU Qingsong, YU Qingshu. Fracture models of concrete and Bazant size effect law[J]. Journal of Anhui University of Technology, 2006, 23(1): 59 - 63.(in Chinese))

[9] 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.(YOU Mingqing, ZOU Youfeng. Discussion on heterogeneity of rock material and size effect on specimen strength[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 391 - 395.(in Chinese))

[10] 杨圣奇, 苏承东, 徐卫亚. 岩石材料尺寸效应的试验和理论研究[J]. 工程力学, 2005, 22(4): 112 - 118.(YANG Shengqi, SU Chengdong, XU Weiya. Experimental and theoretical study of size effect of rock material[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(4): 112 - 118.(in Chinese))

[11] HODGSON K, COOK N G W. The effects of size and stress gradient on the strength of rock[C]// The 2nd Cong. Int. Soc. Rock Mech.. Bgrade: [s. n.], 1970: 3 - 5.

[12] OBERT L, WINDES S L, DUVAL W I. Standardized tests for determining the physical properties of mine rock[R]. [S. l.]: US Bureau of Mines Report of Investigations, 1946.

[13] TANG C A, THAM L G, LEE P K K, et al. Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression—part II: constraint, slenderness and size effect[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(4): 571 - 583.

[14] 赵康, 贾群燕, 赵奎, 等. 岩石端部效应对其声发射影响的数值模拟研究[J]. 矿业研究与开发, 2008, 28(1): 13 - 15.(ZHAO Kang, JIA Qunyan, ZHAO Kui, et al. Numerical studies of the influence of end effect on rock acoustic emission[J]. Mining Research and Development, 2008, 28(1): 13 - 15.(in Chinese))

[15] 薛俊华, 余国锋. 岩石单轴压缩端部效应的数值试验研究[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版), 2008, 16(2): 23 - 25.(XUE Junhua, YU Guofeng. Numerical experiment research on end effect of rock uniaxial compression test[J]. Journal of Anhui Institute of Architecture and Industry(Natural Science), 2008, 16(2): 23 - 25.(in Chinese))

[16] FENG X T, PAN P Z, ZHOU H. Simulation of the rock microfracturing process under uniaxial compression using an elasto-plastic cellular automaton[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(7): 1 091 - 1 108.

[17] PAN P Z, FENG X T, HUDSON J A. Numerical simulations of class I and class II uniaxial compression curves using an elasto-plastic cellular automaton and a linear combination of stress and strain as the control method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(7): 1 109 - 1 117.

[18] MOGI K. Experimental rock mechanics[M]. London: Taylor and Francis, 2006.