

岩石颗粒流模型单轴压缩的加载速率效应研究\*

陈鹏宇

(内江师范学院 地理与资源科学学院,四川 内江 641100)

**摘 要:**选用平直节理模型建立了岩石单轴压缩的颗粒流模型,分析加载速率、计算时步和加载方式对颗粒流模型力学特性的影响。结果表明:(1) 加载速率 0.1 m/s 为明显的分界点,加载速率小于 0.1 m/s 时,数值试样的轴向应力-轴向应变曲线、体积应变-轴向应变曲线和强度参数等差异较小;加载速率大于 0.1 m/s 时,随加载速率增大,数值试样的脆性特征越不明显,强度参数逐渐增大,试样破坏更为破碎。(2) 对比连续加载法与冻结加载法下的应力-应变曲线的相似度,并综合考虑加载速率效应和计算效率,建议取 0.01 m/s 作为模拟室内岩石静态加载试验的加载速率,并通过实例分析验证了该加载速率是可行的。(3) 计算时步控制着颗粒流模型中扰动的传播速度,颗粒流模型的加载速率效应是由一个计算时步内形成的扰动所控制的,一个计算时步内形成的扰动越小越接近准静态。颗粒流的计算理论是符合应力波传播理论的,也可以利用颗粒流模拟岩石的动力加载试验。

**关键词:**颗粒流程序;加载速率;单轴压缩;计算时步;扰动

中图分类号:TU45      文献标识码:A      文章编号:1673-0836(2018)03-0635-08

Loading Rate Effect Analysis on Rock Particle Flow Model under Uniaxial Compression

Chen Pengyu

(School of Geography & Resource Science, Neijiang Normal University, Neijiang, Sichuan 641100, P.R. China)

**Abstract:** The flat-jointed contact model is adopted to establish rock particle flow model for uniaxial compression. The effects of loading rate, calculation timestep and loading methods on the mechanical response of a particle model are investigated. The numerical results have demonstrated that: (1) Loading rate of 0.1m/s is an obvious boundary. When the loading rate is less than 0.1 m/s, the differences of axial stress vs. axial stain curves, volumetric strain vs. axial stain curves and strength parameters are smaller. However, when the loading rate is more than 0.1 m/s, as loading rate increases, the brittle characteristics of numerical sample are less obvious, the values of strength parameters increase, and the specimen has broken into more pieces. (2) Considering the similar between axial stress vs. axial stain curve of continuous loading method and that of freeze loading method, the effects of loading rate and the computational efficiency, it is suggested that the loading rate of 0.01m/s can be used for simulate the static loading test of rocks. A case study results validate 0.01m/s is a reasonable loading rate. (3) The propagation speed of a disturbance is affected by calculation timestep. The effects of loading rate are affected by the disturbance formed in a calculation timestep. The loading is more closed to quasi-static, while the disturbance is smaller. The calculation theory of particle flow model is in conformity with the propagation theory of stress wave. Therefore, the particle flow model can be also used to simulate the dynamic load test of the rock.

**Keywords:** Particle Flow Code ( PFC ); loading rate effect; uniaxial compression; calculation timestep; disturbance

\* 收稿日期:2017-12-23(修改稿)  
作者简介:陈鹏宇(1987-),男,四川富顺人,博士,副教授,主要从事地质灾害分析评估、预测预报与数值模拟等方面的研究工作。E-mail:79012983@qq.com  
基金项目:国家自然科学基金(41272377);四川省教育厅科研项目(17ZB0222)

0 引言

大量试验结果表明,不同加载速率下岩石的本构关系和力学性质存在明显的差异,尤其是岩石在承受动、静载荷时,差异更加明显<sup>[1]</sup>。目前,关于岩石加载速率效应的室内试验研究很多<sup>[2-4]</sup>。颗粒流模型以介质内部结构为基本单元(颗粒和接触),从介质结构力学行为角度研究介质系统的力学特征和力学响应,也用于研究岩石的加载速率效应,如尹小涛等<sup>[5]</sup>通过颗粒流模型研究了不同加载速率下的岩石材料的力学行为。倪红梅等<sup>[6]</sup>采用颗粒流模型研究了加载速率对非共面双裂隙红砂岩数值试样力学行为的影响。黄达等<sup>[7]</sup>利用颗粒流模型研究了中等应变率对裂隙砂岩力学响应的影响规律。上述模拟结果表明,岩石颗粒流模型也存在加载速率效应。一般认为应变率以  $10^{-1}/s$  为界,当应变率小于  $10^{-1}/s$  时为岩石静力学涉及范围,大于  $10^{-1}/s$  时为岩石动力学范围<sup>[8]</sup>。室内试验确定岩石单轴压缩强度一般都在静态加载速率范围,但是颗粒流模拟时如果选用过低的加载速率,则需要很长的运算时间。因此,一般采用的加载速率都高于室内试验,甚至高于静态加载应变率界限值  $10^{-1}/s$ <sup>[9]</sup>。为了确定一个既能满足计算效率又能实现静态加载的速率,本文进行了不同加载速率下的岩石单轴压缩数值试验,研究其加载速率效应,并以此作为颗粒流数值模拟时选择加载速率的依据。

1 岩石单轴压缩的颗粒流模型

1.1 平直节理模型

颗粒黏结模型常用于研究岩石单轴压缩破坏的细观力学性质,其中最常用的是平行黏结模型、但是在实际应用中,发现采用平行黏结模型所得的单轴抗压强度与单轴抗拉强度之比(UCS/TS)为 3~4,低于许多岩石的 UCS/TS(一般超过 10)<sup>[10]</sup>。为了解决这个问题,Potyondy<sup>[11]</sup>提出了一种适用于硬质岩石的平直节理模型,该模型将圆形颗粒改造成多边形颗粒,使得颗粒破坏后的旋转被抑制。相比于等效晶质模型<sup>[9]</sup>和簇平行黏结模型<sup>[10]</sup>,平直节理模型应用起来更为方便。典型的平直节理模型如图 1 所示。

平直节理模型有未黏结和黏结两种模式,两者的本构关系不同。对于未黏结部分,剪切强度为

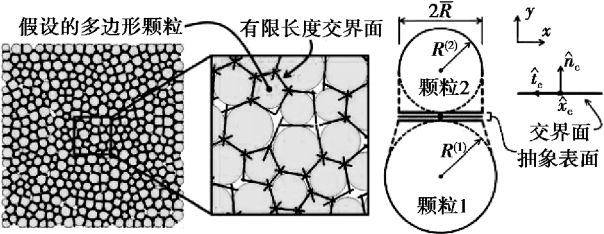


图 1 平直节理模型<sup>[11]</sup>  
Fig. 1 Flat-jointed contact model<sup>[11]</sup>

$$\tau_b = \begin{cases} -\mu_b \hat{\sigma}, \hat{\sigma} < 0 \\ 0, \hat{\sigma} \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mu_b$  是摩擦系数; $\hat{\sigma}$  为正应力( $\hat{\sigma} > 0$  为拉应力)。如果  $|\hat{\tau}'| \leq \tau_c$ , 则  $\hat{\tau} = \hat{\tau}'$ ; 否则执行滑动条件,  $\hat{\tau} = \hat{\tau}'(\tau_c/|\hat{\tau}'|)$ 。

对于黏结部分,剪切强度为

$$\tau_b = c_b - \hat{\sigma} \tan \varphi_b \quad (2)$$

式中: $c_b$  为内聚力; $\varphi_b$  为内摩擦角。如果  $|\hat{\tau}'| \leq \tau_b$ , 则  $\hat{\tau} = \hat{\tau}'$ ; 否则,黏结发生剪切破坏。当  $\hat{\sigma} > \sigma_b$  时,黏结发生拉伸破坏( $\sigma_b$  为法向强度)。

1.2 单轴压缩数值模型和数值试验

生成尺寸为  $100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$  颗粒流模型,模型中最小粒径  $R_{\min} = 0.45\text{ mm}$ ,最大粒径  $R_{\max} = 0.90\text{ mm}$ ,颗粒粒径  $R_{\min} - R_{\max}$  采用均匀分布,总共生成颗粒 3 019 个。取颗粒密度  $\rho_s = 2\,700\text{ kg/m}^3$ ,清除浮子,删除两侧墙体,在颗粒之间装配平直节理模型,最终生成如图 2(a) 所示的单轴压缩数值模型。平直节理模型的细观参数根据经验设置,使得宏观参数符合一般岩石力学性质。主要细观参数包括: $N, E_c, k_n/k_s, \mu_b, \lambda, \sigma_b, c_b, \tan \varphi_b$ 。其中, $N$  为交界面段数, $E_c$  为平直节理模量, $k_n/k_s$  为平直节理刚度比, $\mu_b$  为平直节理摩擦系数, $\lambda$  为平直节理两端较小颗粒的半径比, $\sigma_b$  为平直节理抗拉强度, $c_b$  为平直节理黏聚力, $\tan \varphi_b$  为平直节理内摩擦系数。细观参数如表 1 所示。

表 1 平直节理模型细观参数

Table 1 Meso-parameters of flat-jointed contact model			
细观参数	取值	细观参数	取值
N	4	$\sigma_{b, \text{std}}/\text{MPa}$	$0.25\sigma_{b, \text{min}}$
$\lambda$	1	$c_{b, \text{min}}/\text{MPa}$	105
$E_c/\text{GPa}$	45	$c_{b, \text{std}}/\text{MPa}$	$0.5c_{b, \text{min}}$
$k_n/k_s$	2.5	$\tan \varphi_b$	0.5
$\sigma_{b, \text{min}}/\text{MPa}$	15	$\mu_b$	0.5

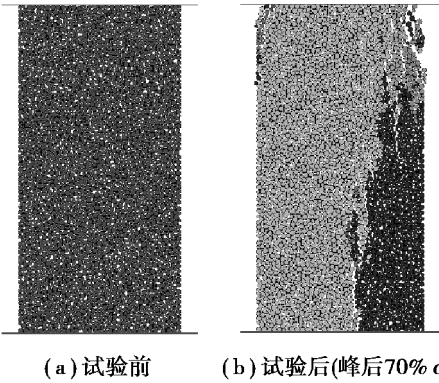


图 2 单轴压缩数值模型(不同的颜色代表不同的碎块)

Fig. 2 Numerical model for uniaxial compression  
(different colors represent different pieces)

对上下墙施加 0.001 m/s 的加载速率,直至试样破坏,记录数值试验过程中的应力、应变和裂纹数量,通过计算获得试样的宏观参数,同时进行直接拉伸试验确定抗拉强度,结果如表 2 所示。

表 2 数值试样宏观参数

Table 2 Macro-parameters of numerical sample

参数	$\sigma_{ci}/\text{MPa}$	$\sigma_{cd}/\text{MPa}$	$\sigma_f/\text{MPa}$	$\sigma_t/\text{MPa}$	$E/\text{GPa}$	$\nu$
数值	40.7	113.2	122.6	8.92	48.5	0.185

从表 2 中可以看出,数值试样宏观参数符合一般岩石力学性质, $UCS/TS=13.74$ ,比平行黏结模型更符合实际。图 3 为单轴压缩下数值试样的应力、裂纹数量和体积应变-轴向应变曲线。

图 3 中,当拉裂纹出现明显增长时,对应的轴向应力为数值试样的启裂应力  $\sigma_{ci}$ ,体积应变的峰值对应的轴向应力为数值试样的损伤应力  $\sigma_{cd}$ 。当轴向应力达到损伤应力  $\sigma_{cd}$  时,拉裂纹和剪裂纹都出现了明显增长,随后轴向应力出现不稳定的增长趋势,直至达到峰值应力  $\sigma_f$ 。峰值应力后,轴向应力迅速跌落,和脆性岩石室内试验结果<sup>[10]</sup>一致,说明平直节理模型可以再现脆性岩石应力-应变曲线的峰后特性。试样破坏结果如图 2(b) 所示,宏观上表现为轴向劈裂破坏,同样说明平直节理模型可以很好地模拟硬质岩石的脆性力学行为。

1.3 单轴压缩颗粒流模型中扰动的传播

为了研究颗粒流模型的加载速率效应,分析加载时应力在模型中的传播方式也是必要的。根据应力波理论可知,当外载荷作用于可变形固体的表面时,在表面上引起的扰动(应力)将在介质中逐

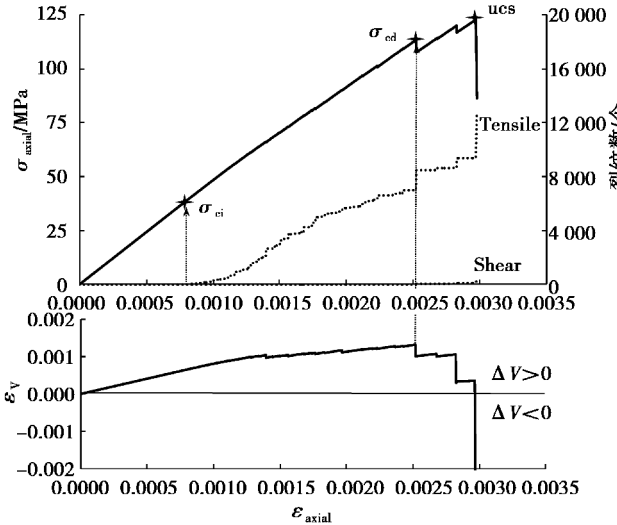


图 3 单轴压缩下数值试样的轴向应力、裂纹数量和体积应变-轴向应变曲线

Fig. 3 Axial stress, number of cracks and volumetric strain vs. axial strain curves of numerical sample tested under uniaxial compression

渐由近及远传播出去<sup>[12]</sup>。根据颗粒流的计算原理可知,在进行单轴压缩试验时,墙在表面颗粒引起的扰动也是由近及远传播出去的,其传播速度与计算时步有关。

颗粒流中的循环计算是一个时步运算法则,即不断地重复颗粒的运动定律和接触的力-位移定律,以及更新墙的位置<sup>[13]</sup>。其中,牛顿第二定律用于确定颗粒的运动,力-位移定律用于更新由于颗粒相对运动而引起的接触力。

颗粒流采用显式有限差分方法进行连续分析。为了保证牛顿定律显式解的稳定性,计算时步应选择得足够小,使得扰动的传播不会超出相邻颗粒。时步的选择与整个系统的最小特征周期有关,其计算公式如下<sup>[14]</sup>:

$$t_{crit} = \begin{cases} \sqrt{m/k^{tran}} \\ \sqrt{I/k^{rot}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $k^{tran}$  和  $k^{rot}$  分别是平移刚度和转动刚度; $I$  为颗粒的转动惯量; $m$  为颗粒的质量。

以所有颗粒的  $t_{crit}$  中的最小值作为计算采用的最终时步,由此,扰动在试样中的传播是与离散系统的物理性质相关的。颗粒流模型中的颗粒以黏结紧密结合在一起,加载时墙的移动会使表面部分的颗粒因变形离开初始平衡位置。由于这部分颗粒与相邻颗粒发生了相对运动,必然将受到相邻颗粒所给予的作用力(应力),同时也给相邻颗粒予反作用力,因而使它们离开平衡位置而运动起来。



这样,外载荷在试样表面上引起的扰动将在试样中传播出去,而计算时步则控制着扰动的传播速度。

2 颗粒流模型单轴压缩加载速率效应

2.1 加载速率对岩石颗粒流模型力学特征的影响

为了研究加载速率对颗粒流模型力学特征的影响,对图 2(a) 所示颗粒流模型设置不同的加载速率,记录轴向应力-轴向应变曲线、体积应变-轴向应变曲线、峰值强度、弹性模量、泊松比和试样的破坏特征如图 4~7 所示。

2.1.1 加载速率与轴向应力-轴向应变曲线的关系

图 4 为不同加载速率下数值试样单轴压缩下的应力-应变曲线。由图 4 可以看出,在峰前阶段,不同加载速率下的应力-应变曲线平均斜率基本一致,并且随着加载速率增大,曲线波动性越大。随着加载速率的增大,峰后曲线由陡峭跌落逐渐变缓,说明随着加载速率变缓,试样的脆性特征越来越不明显,尤其在加载速率大于 0.1 m/s 以后,试样的峰值强度和脆性特征区别明显。在加载速率小于 0.1 m/s 时,试样的峰值强度变化幅度不大,应力-应变曲线在加载速率小于 0.025 m/s 时变化不明显,试样的脆性特征明显。

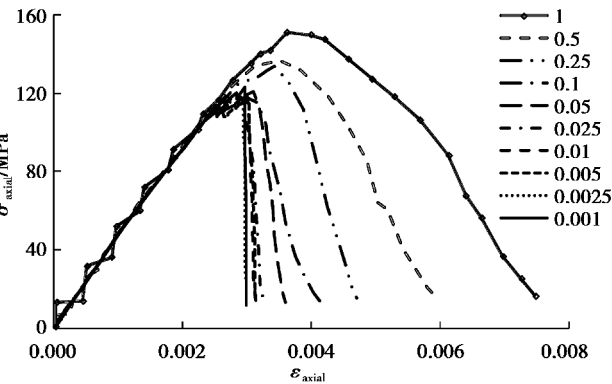


图 4 不同加载速率下的轴向应力-轴向应变曲线

Fig. 4 Axial stress vs. axial strain curves with different loading rates

2.1.2 加载速率与体积应变-轴向应变曲线的关系

图 5 为不同加载速率下试样的体积应变-轴向应变曲线。由图 5 可知,在不同加载速率下,峰前的体积应变-轴向应变曲线基本一致。随着加载速率的增大,峰后曲线由陡峭跌落逐渐变缓,同时峰值点所对应的轴向应变增加,说明试样达到最小体积所经历的轴向应变随加载速率增加而增大。加载速率 0.1m/s 为明显的分界点,加载速率大于 0.1 m/s 以后,不同试样的体积应变-轴向应变曲线

区别明显。

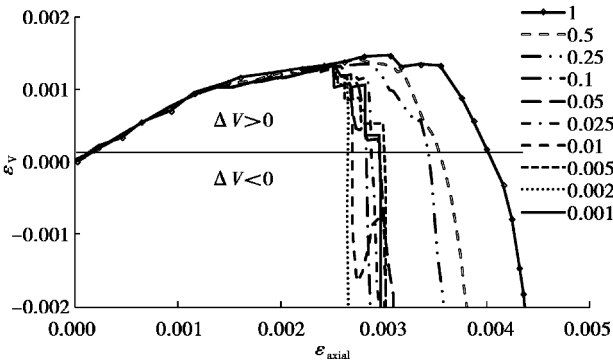


图 5 不同加载速率下的体积应变-轴向应变曲线

Fig. 5 Volumetric strain vs. axial strain curves of different loading rates

2.1.3 加载速率与力学参数的关系

图 6 为不同加载速率下试样的强度参数随加载速率的变化曲线。从图 6 中可以看出,加载速率 0.1 m/s 为明显的分界点,当加载速率小于 0.1 m/s 时,试样的峰值强度和损伤应力变化幅度很小,与加载速率不具备显著相关性;当加载速率大于 0.1 m/s 时,试样的峰值强度和损伤应力随加载速率增大,并且增幅越来越大,峰值强度和启裂应力与加载速率整体呈现出指数函数变化趋势。随着加载速率的变化,启裂应力变化幅度很小,仅在加载速率为 1.0 m/s 时出现小幅下降。从图 4 和图 5 可以得出,不同加载速率下弹性模量和泊松比变化不大,说明加载速率对变形参数的影响很小。

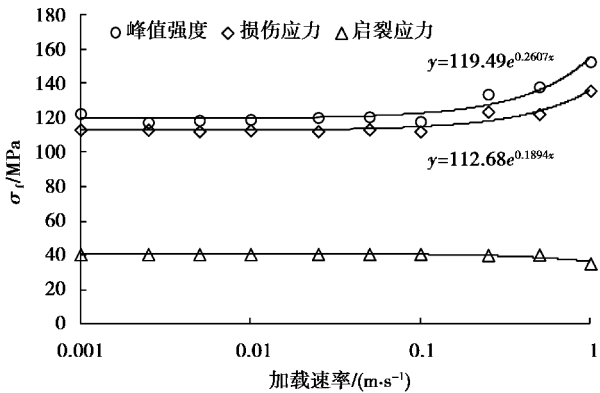


图 6 强度参数随加载速率变化

Fig. 6 Variation of strength parameters vs. loading rate

2.1.4 加载速率与破坏形态的关系

图 7 为不同加载速率下试样的破坏形态。从图 7 中可以看出,试样主要表现为轴向劈裂破坏,不通过加载速率下破坏模式整体类似,但是随着加载速率的增大,试样破坏更为破碎,这与室内试验所观察到的现象基本一致<sup>[15-16]</sup>。

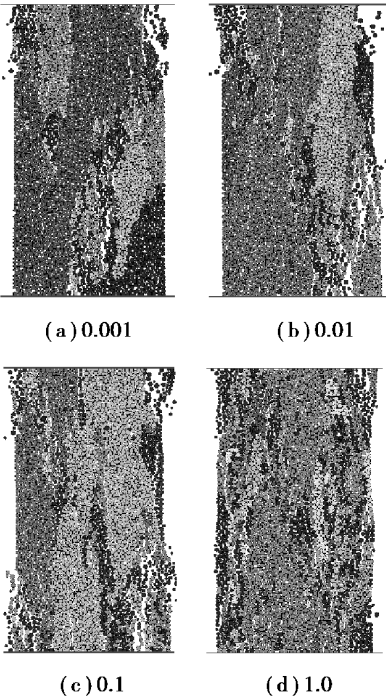


图 7 不同加载速率下的试样单轴压缩破坏形态(峰后 10% $\sigma_t$ )

Fig. 7 Failure patterns of numerical specimens tested under uniaxial compression with different loading rates

2.2 计算时步对应力-应变曲线的影响

在 1.3 节中本文说明了计算时步控制着颗粒流模型中应力的传播速度,在一个计算时步内扰动的传播不会超出相邻颗粒。因此,对于同一个颗粒流模型,单轴压缩时加载速率越大,在一个计算时步内造成的扰动越大,越不易实现静态加载。与此类似,对于同样的加载速率,计算时步越大,在一个计算时步内造成的扰动越大,越不易实现静态加载。根据公式(3)可知,临界时步与颗粒密度平方根 $\sqrt{\rho}$ 线性相关。相对于峰值应力,颗粒自重应力可以忽略不计。因此,本文通过减小颗粒密度来减小计算时步,从而研究计算时步对应力-应变曲线的影响。仍以图 2(a)所示颗粒流模型为例,其计算时步为  $7.940\ 5\times 10^{-8}$  s,改变颗粒密度进行单轴压缩试验,记录应力-应变曲线,如图 8 所示。图 8 中的图例为  $v-\rho$  模式,即第一个数据为加载速率,第二个数据为颗粒密度。

从图 8 中可以看出,随着颗粒密度的减小(即计算时步分别减小为原计算时步的 1/2、1/4 和 1/10),在加载速率保持 1.0 m/s 不变的情况下,应力-应变曲线表现出同图 4 中加载速率减小时一样的变化特征,并分别与加载速率 0.5 m/s、0.25 m/s、0.01 m/s 时(加载速率为 1.0 m/s 的 1/2、1/4 和

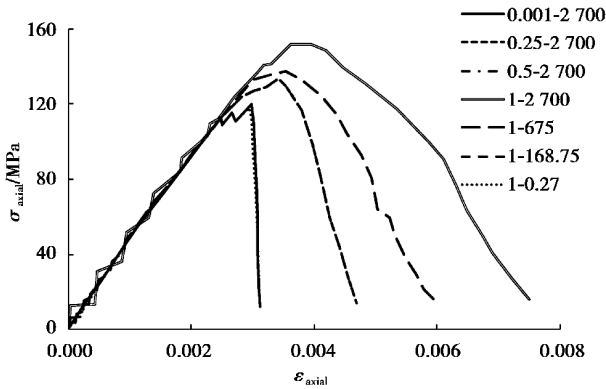


图 8 计算时步对轴向应力-轴向应变曲线的影响  
Fig. 8 The effect of calculation timestep on axial stress vs. axial strain curves

1/10)的应力-应变曲线高度一致。这是因为在一个计算时步内,形成的扰动(墙的位移  $vt_{crit}$ )是一样的。由此可知,颗粒流模型的加载速率效应是由一个计算时步内形成的扰动所控制的。

3 数值模拟时加载速率的选择与讨论

3.1 数值模拟时加载速率的选择

由于颗粒流模型存在加载速率效应,在模拟室内岩石静态加载试验时,需要选择一个合适的加载速率,既能满足静态加载,又能满足计算效率。在确定数值模拟加载速率时,本文先讨论另一种加载方法(本文称之为冻结加载法),它由 Zhao 等<sup>[17]</sup>提出,夏明等<sup>[10]</sup>对其进行了进一步验证。该加载方法包含两种类型——加载期和冻结期。在加载期,荷载(速度)增量施加到系统边界上;而在冻结期,固定系统边界,使系统运行很多步后达到准静态<sup>[10]</sup>。

该方法实际上是一种分级加载法,只不过每一级增加的应力很小,由加载期的加载速率和时间决定。参考夏明等<sup>[10]</sup>的分析结果,取加载速率为 1.0 m/s,加载期为 5 步,冻结期为 1 000 步进行单轴压缩试验。图 9 中给出了冻结加载法所得应力-应变曲线与颗粒流连续加载方法的对比结果。

从图 9 中可以看出,采用冻结加载法后,颗粒流模型的加载速率效应被消除了,应力-应变曲线与低应变率下的应力-应变曲线基本一致,所得峰值强度也相差较小。由于冻结加载法是属于静态加载法,对比不同加载速率下的连续加载法与冻结加载法下的应力-应变曲线的相似度,可作为模拟时选用数值模拟加载速率的依据。综合考虑本文第 2 节中所得分析结果,并考虑计算效率,建议取

0.01 m/s 作为模拟室内岩石静态加载试验的加载速率。

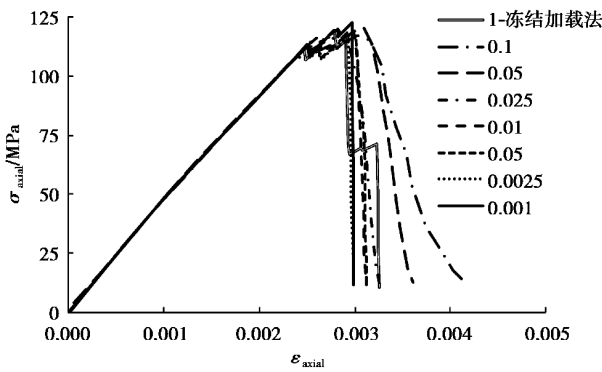


图 9 不同加载法下的轴向应力-轴向应变曲线  
Fig. 9 Axial stress vs. axial strain curves by different loading methods

3.2 讨论

夏明等<sup>[10]</sup>曾通过对比连续加载法与冻结加载法所得应力-应变曲线的不同来说明连续加载法是不准确的,但是其采用的加载速率分别为 0.5 m/s 和 1.0 m/s,属于岩石动力学的范围,其应力-应变曲线必然与静态加载下的应力-应变曲线存在明显区别。因此,这种对比不足以作为验证连续加载法错误的证据。

其次,夏明等<sup>[10]</sup>提出的另一个证据是:如果模拟中计算时步为  $10^{-8}$  s (本文为  $7.9405 \times 10^{-8}$  s),加载速率为 1.0 m/s,就需要运行 100 000 步才能使加载墙移动 1 mm,说明在颗粒流模型中当加载速率为 1.0 m/s 时,模型应处于准静态,所以强度值就应与加载速率不相关。这是未能正确认识颗粒流模型计算原理所导致的错误结论,本文 1.3 节和 2.2 节中已经指出颗粒流模型的加载速率效应是由一个计算时步内形成的扰动所导致的,与循环步数并无直接关系。颗粒流模型是否能处于准静态,与一个计算时步内形成的扰动有关,扰动越小,越接近准静态。

岩石中的颗粒与颗粒流模型一样,以黏结紧密结合在一起,当表面颗粒受到力的作用而产生变形时,必然会引发与相邻颗粒之间的相互作用,从而引起扰动的传播。根据一维应力波传播理论可知,扰动(应力波)在介质中的传播速度为  $v = \sqrt{E\rho}^{-1}$ <sup>[18]</sup>。对于图 2(a)所示颗粒流模型,其宏观参数  $E = 48.5$  GPa,  $\rho = 2\,430$  kg/m<sup>3</sup>,则  $v = 4.47 \times 10^3$  m/s。给上墙一定加载速率,固定下墙,记录应力从加载时传播到下墙的所需循环步数  $\Delta n$ ,如图 10 所示。再根据  $v = h/(\Delta n t_{crit})$  ( $h$  为试样高度),即可计

算扰动传播速度  $v = 4.84 \times 10^3$  m/s。宏观计算公式和细观计算公式所得结果差异较小,这说明颗粒流的计算理论是符合应力波传播理论的,正因如此才可以利用颗粒流模型正确模拟岩石的 SHPB 试验<sup>[18-19]</sup>。

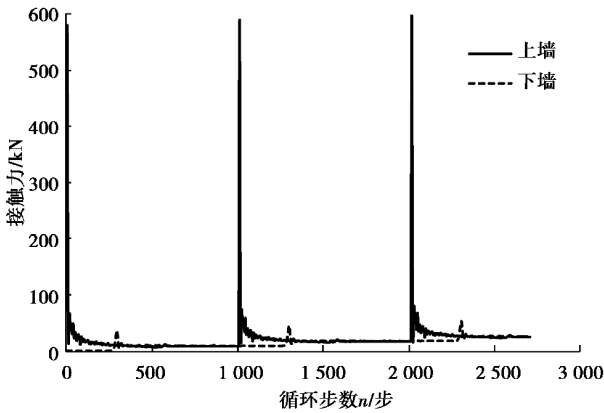


图 10 冻结加载法时墙接触力的变化情况  
Fig. 10 Variation of contact force of walls of freezing loading method

图 10 中,在加载初期,上墙施加一定速率后接触力急速上升引起扰动,经过循环步数  $\Delta n$  后,扰动传播到下墙引起下墙接触力上升,同时将扰动反射回上墙,然后经过一定循环步数后上墙和下墙达到应力平衡。由此可见,冻结加载法的实质是在冻结期内消除加载期引起的扰动,从而达到静力平衡。连续加载法下的扰动是持续不断输入了,当一次计算时步内的扰动足够小时,才会随着循环时步的增加而不断被均衡,以达到准静态平衡。

4 实例分析

以颗粒流模拟灰岩的单轴压缩试验。岩石试样直径为 50 mm,高度为 100 mm,密度为 2 849 kg/m<sup>3</sup>,在 INSTORN-1346 电液伺服岩石力学测试系统进行单轴压缩试验。加载速率为 0.01 mm/s,获得试样的力学参数为:弹性模量  $E = 51.90$  GPa,泊松比  $\nu = 0.207$ ,单轴抗压强度 UCS = 119.96 MPa,单轴抗拉强度 TS = 5.26 MPa。选择加载速率 0.01 m/s,采用试错法标定细观参数: $R_{min} = 0.5$  mm,  $R_{max}/R_{min} = 1.66$ ,  $E_c = 50$  GPa,  $k_n/k_s = 2.85$ ,  $\sigma_{b, min} = 9.0$  MPa,  $\sigma_{b, std} = 0.25\sigma_{b, min}$ ,  $c_{b, min} = 90$  MPa,  $c_{b, std} = 0.25c_{b, min}$ ,  $\tan\varphi_b = 0.5$ ,  $\mu_b = 0.5$ ,  $N = 4$ ,  $\lambda = 1$ 。通过模拟计算,可得相应的宏观参数为:弹性模量  $E = 51.40$  GPa,泊松比  $\nu = 0.203$ ,单轴抗压强度 UCS = 118.99 MPa,单轴抗拉强度 TS = 5.90 MPa。数值模拟结果与实际结果差异较小,说明模拟的效果较好。



室内试验和颗粒流模拟所得的应力-应变曲线如图 11 所示。从图 11 中可以看出,颗粒流模拟的应力-应变曲线同室内试验结果比较接近。颗粒流模型中颗粒是紧密结合在一起的,所以模拟曲线中并未出现初始的裂隙压密阶段,而表现为峰前线弹性、峰前非线性和峰后软化 3 个阶段。图 12 为室内试验和颗粒流模拟的试样破坏形态。从图 12 中可以看出,颗粒流模拟的破坏形态与试验结果很接近,都表现为轴向劈裂和表层剥离。上述结果说明,选用 0.01 m/s 的加载速率进行单轴压缩模拟试验,可以获得和室内静态加载试验比较相符的模拟结果。

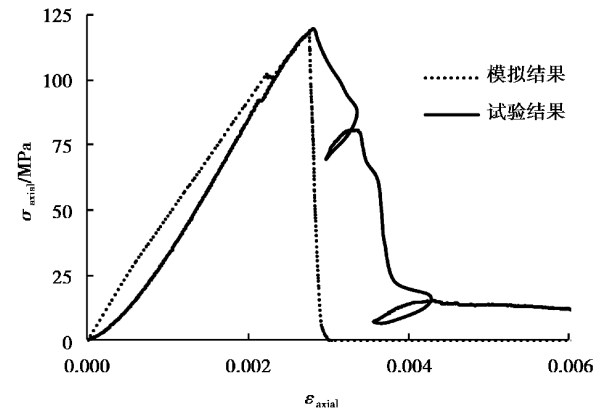


图 11 试样的轴向应力-轴向应变曲线

Fig. 11 Axial stress vs. axial strain curves of specimens

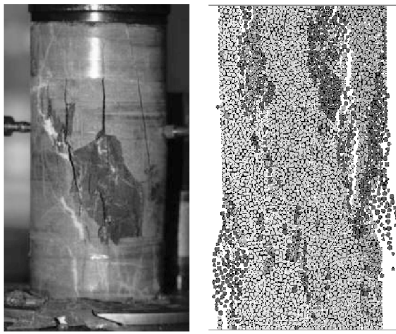


图 12 试样破坏形态

Fig. 12 Failure patterns of specimens

最后需要指出的是,本文的研究对象为岩石颗粒流模型的加载速率效应,并非针对真实岩石。本文以平直节理黏结颗粒模型来近似表达硬脆性岩石,并不能完全真实表达岩石的所有力学性质,如岩石的流变性质等。除此以外,颗粒流模型的加载速率效应与其计算原理有关,其与真实岩石的加载速率效应并非是一一对应的,如本文实例中室内试验采用静态加载速率为 0.01 mm/s,对应的数值模拟时采用的加载速率为 0.01 m/s。至于三维颗粒

流模型的加载速率效应是否如此,还需进一步研究。

## 5 结论

(1) 选用平直节理模型建立了岩石单轴压缩的颗粒流模型,分析了加载速率对颗粒流模型力学特性的影响。结果表明:加载速率 0.1 m/s 为明显的分界点,加载速率小于 0.1 m/s 时,数值试样的轴向应力-轴向应变曲线、体积应变-轴向应变曲线和强度参数等差异较小;当加载速率大于 0.1 m/s 时,随加载速率增大,数值试样的脆性特征越不明显,强度参数逐渐增大,试样破坏更为破碎。

(2) 对比不同加载速率下的连续加载法与冻结加载法下的应力-应变曲线的相似度,并综合考虑加载速率效应和计算效率,本文建议取 0.01 m/s 作为模拟室内岩石静态加载试验的加载速率。实例分析结果验证了该加载速率是可行的。

(3) 分析了颗粒流模型的计算原理,并通过颗粒流模拟实例可知,计算时步控制着颗粒流模型中扰动的传播速度,颗粒流模型的加载速率效应是由一个计算时步内形成的扰动所控制的,一个计算时步内形成的扰动越小,越接近准静态。颗粒流的计算理论是符合应力波传播理论的,也可以利用颗粒流模型模拟岩石的动力加载试验。

## 参考文献 (References)

[1] 杨仕教,曾晟,王和龙. 加载速率对石灰岩力学效应的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 786-788. ( Yang Shijiao, Zeng Sheng, Wang Helong. Experimental analysis on mechanical effects of loading rates on limestone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(7): 786-788. (in Chinese) )

[2] 黄达,黄润秋,张永兴. 粗晶大理岩单轴压缩力学特性的静态加载速率效应及能量机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 245-255. ( Huang Da, Huang Runqiu, Zhang Yongxing. Experimental investigations on static loading rate effects on mechanical properties and energy mechanism of coarse crystal grain marble under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 245-255. (in Chinese) )

[3] 苏海健,靖洪文,赵洪辉. 高温后砂岩单轴压缩加载速率效应的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1064-1071. ( Su Haijian, Jing Hongwen, Zhao Honghui. Experimental investigation on loading rate effect of sandstone after high temperature under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of Geotechnical

- Engineering, 2014, 36(6): 1064-1071. (in Chinese))
- [4] 徐小丽, 陈琳, 高峰, 等. 花岗岩的加载速率效应及能量机制研究[J]. 固体力学学报, 2015, 36(2): 154-163. (Xu Xiaoli, Chen Lin, Gao Feng, et al. Studies on loading rate effects and energy mechanism of granite[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2015, 36(2): 154-163. (in Chinese))
- [5] 尹小涛, 葛修润, 李春光, 等. 加载速率对岩石材料力学行为的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增1): 2610-2615. (Yin Xiaotao, Ge Xiurun, Li Chunguang, et al. Influences of loading rates on mechanical behaviors of rock materials [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (Supp.1): 2610-2615. (in Chinese))
- [6] 倪红梅, 黄彦华, 刘相如, 等. 断续双裂隙红砂岩加载速率效应颗粒流分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(5): 1010-1016. (Ni Hongmei, Huang Yanhua, Liu Xiangru. Particle flow simulation on loading rate effects of red sandstone containing two pre-existing fissures [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(5): 1010-1016. (in Chinese))
- [7] 黄达, 岑夺丰, 黄润秋. 单裂隙砂岩单轴压缩的中等应变率效应颗粒流模拟[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 535-545. (Huang Da, Cen Duofeng, Huang Runqiu. Influence of medium strain rate on sandstone with a single pre-crack under uniaxial compression using PFC simulation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 535-545. (in Chinese))
- [8] 李夕兵, 古德生. 岩石冲击动力学研究内容及其应用[J]. 西部探矿工程, 1996, 8(6): 1-2. (Li Xibing, Gu Desheng. Research content and application of rock impulsion dynamics [J]. West-China Exploration Engineering, 1996, 8(6): 1-2. (in Chinese))
- [9] 周喻, 高永涛, 吴顺川, 等. 等效晶质模型及岩石力学特征细观研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 511-519. (Zhou Yu, Gao Yongtao, Wu Shunchuan, et al. Equivalent crystal model for mesoscopic behaviour of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3): 511-519. (in Chinese))
- [10] 夏明, 赵崇斌. 簇平行黏结模型中微观参数对宏观参数影响的量纲研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(2): 327-338. (Xia Ming, Zhao Chongbin. Dimensional analysis of effects of microscopic parameters on macroscopic parameters for clump parallel-bond model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(2): 327-338. (in Chinese))
- [11] Potyondy D O. A flat-jointed bonded-particle material for hard rock [A]//Proceedings of the 46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium [C]. Chicago, 2012: 24-27.
- [12] 肖刚. 岩体冒落诱发冲击振动特征及其动力响应机理研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2011. (Xiao Gang. Study on the feature of impact vibration and dynamic response of cause by roof caving [D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [13] Itasca Consulting Group. PFC2D (particle flow code in 2 dimensions) theory and background [R]. Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group, 2002.
- [14] Itasca Consulting Group. PFC 5.0 documentation [R]. Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group, 2014.
- [15] 李刚, 陈正汉, 谢云, 等. 高应变率条件下三峡工程花岗岩动力特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1833-1840. (Li Gang, Chen Zhenghan, Xie Yun, et al. Test research on dynamic characteristics of Three Gorges granite under high strain rate [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1833-1840. (in Chinese))
- [16] 梁昌玉, 吴树仁, 李晓. 中低应变率范围内单轴压缩下花岗岩断口细-微观特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增1): 2977-2986. (Liang Changyu, Wu Shuren, Li Xiao. Research on micro-meso characteristics of granite fracture under uniaxial compression at low and intermediate strain rates [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Supp.1): 2977-2986. (in Chinese))
- [17] Zhao C, Hobbs B E, Ord A, et al. Particle simulation of spontaneous crack generation problems in large-scale quasi-static systems [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2007, 69(11): 2302-2329.
- [18] 江益辉. 冲击荷载作用下岩石峰后损伤破坏特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014. (Jiang Yihui. Study on post failure behaviors of rock under impact loading [D]. Changsha: Central South University, 2014. (in Chinese))
- [19] Li X B, Zou Y, Zhou Z L. Numerical simulation of the rock SHPB test with a special shape striker based on the discrete element method [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(5): 1693-1709.