

DOI: 10.11779/CJGE202009013

花岗岩细观破裂特征及宏观尺度效应的颗粒流研究

孙 闯¹, 敖云鹤¹, 张家鸣¹, 王 帅²

(1. 辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘 要: 基于颗粒流方法, 提出可变半径比例 Clump 结构的构建方法, 分析颗粒流细观参数及细观结构特征对模拟岩石试件拉、压特性的影响规律, 构建适用于花岗岩力学特性的 Clump 颗粒流结构模型, 验证可变半径比例 Clump 结构及细观力学参数的可靠性; 构建不同尺度的深部洞室颗粒流模型, 分析深部围岩宏观破裂的尺度效应。研究表明, Ball 和 Clump 模型的拉压比对细观力学参数变化的敏感度小, 可变半径比例 Clump 模型的力学特性对粒径尺寸及比例变化的敏感度大; 对比分析花岗岩室内试验与数值模拟的拉、压强度曲线及破裂模式, 基于可变粒径比例的 Clump 计算模型与试验结果基本吻合; 采用小尺度颗粒模型的深部围岩宏观破裂区主要以局部区域破碎为主, 随着颗粒模型尺度逐渐增大, 围岩表现出明显的剪切滑移及板裂破坏特征, 构建的深部围岩颗粒流模型具有明显的宏观破裂尺度效应。

关键词: 颗粒流; 破裂特征; 尺度效应; 花岗岩; 裂隙

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)09-1687-09

作者简介: 孙 闯(1983—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩石力学试验与数值计算方面的研究工作。E-mail: sunchuang88@163.com。

Particle flow of meso-fracture characteristics and macro-scale effect of granites

SUN Chuang¹, AO Yun-he¹, ZHANG Jia-ming¹, WANG Shuai²

(1. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: A formulation method for variable radius proportional clump structure is proposed according to the particle flow method. The effects of mesoparameters and meso-structural characteristics of particle flow on the compressive and tensile properties of simulated rocks are investigated. A clump particle flow structure is constructed, which is suitable for the mechanical characteristics of granite. The reliability of clump structure with variable radius ratio and meso-mechanical parameters is verified. The particle flow models for deep caverns with different sizes are developed, and the scale effect of macro fractures of deep surrounding rock is evaluated. The research results show that the tensile compression ratios of ball and clump models are less sensitive to the changes of meso parameters, and the mechanical properties of variable radius proportional clump model are more sensitive to the changes of particle size and proportion. Using the clump models with different particle size ratios, the compressive and tensile strength curves and fracture modes of numerical simulations and experimental tests are investigated. A good compliance is observed between the numerical and experimental findings. In the small-scale particle model, the fracture zones of the surrounding rocks are mainly broken in local area. By increasing the particle model scale, the clear shear-slip fracture characteristics appear. Simulating the fracture properties by the particle flow model for deep surrounding rocks exhibits clear macro-scale effects.

Key words: particle flow; fracture characteristic; scale effect; granite; crack

0 引 言

自然界中的岩石因受到长期地质构造作用和复杂物理地质环境的影响, 表现为非均质、不连续等复杂特性^[1]。在岩土工程的计算分析中, 常采用离散元方法分析岩体的复杂力学特性, 随着近年来离散元方法的快速发展, 其中的颗粒流方法已经实现了对脆性岩石材料微裂纹行为的模拟分析^[2]。通过对岩石细观及

微观的观察, 发现多数岩石都是由不规则的矿物颗粒紧密结合在一起组成, 矿物颗粒的形状对岩石宏观力学行为存在一定的影响。所以, 提出一种能够符合不同类型岩石力学特性的颗粒流模型, 并实现构建大尺

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1503101); 国家自然科学基金项目(51704144); 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1807107)
收稿日期: 2019-11-11

度颗粒模型的数值方法,对深入研究岩体的细观破裂特征,分析深部洞室围岩宏观破裂尺度效应规律等方面具有重要意义。

近年来,学者们主要从裂隙扩展的角度开展了岩石细观破裂特征的颗粒流研究,如胡波等^[3]采用颗粒流程序对试样的三轴压缩及蠕变进行了数值模拟,研究了含裂隙硬岩长期蠕变变形行为及蠕变模型;邓树新等^[4]利用试验设计法针对硬质岩体颗粒离散元数值计算中的细观参数标定问题进行了研究;Bahrani等^[5]提出SDA法估算微裂纹岩石的强度以及含不同种类岩石试样的极限强度裂纹密度;Shi等^[6]采用离散元方法,研究了矿物配比和微裂隙分布对岩石宏观力学性能的影响。丛宇等^[7]基于颗粒流原理并结合大理岩室内加、卸荷试验确定了适用于岩石类材料的细观参数,提出了裂纹分布多样化的本质原因。

在颗粒流分析岩石宏观破裂过程中,岩体颗粒流模型具有一定的尺度效应,如Stavrou等^[8]采用离散元方法进行岩体的尺度分析,提出了块石强度与其体积和条件的关系;孙超等^[9]通过不同高宽比均质岩样在不同端部约束条件下的离散元单轴压缩数值试验,探讨了无微裂隙均质岩石尺寸效应产生的微观机制;谢璨等^[10]开展了不同试件尺寸及裂隙倾角的光弹性单轴压缩试验,分析了岩石裂隙扩展失稳尺寸效应的影响;Peng等^[11]对粒子效应进行了数值研究,分析了粒度对比对材料的变形和强度行为、微裂纹扩展过程和诱发微裂纹形态的影响;陈庆发等^[12]利用块体化程度指标,从岩体空间结构角度,揭示了岩体几何与力学尺寸效应的关联性;梁昌玉等^[13]通过对中低应变率加载条件下岩石尺寸效应能量特征进行物理试验,探究了引起强度尺寸效应的本质动因。

在颗粒流分析中,如何获得准确的岩石拉压比细观参数,如何构建大尺度颗粒流模型等方面,仍然是科研工作者面临的主要问题。本文基于颗粒流方法,提出可变半径比例的Clump模型构建方法,计算分析模型细观参数及细观结构特征对模拟岩石试件拉、压特性的影响,采用室内试验方法分析不同类型裂隙花岗岩细观破裂特征,并构建适用于花岗岩力学特性的Clump颗粒流结构,提出构建大尺度颗粒流模型方法,分析深部围岩局部破裂的宏观尺度效应。研究成果对深入研究硬岩的岩爆、水压致裂及锚固失效机理等具有重要参考意义。

1 PFC 模拟岩石力学行为的方法

颗粒流程序PFC (particle flow code)是通过离散单元方法来模拟圆形颗粒的运动及其相互作用,从基

本颗粒结构角度考虑基本力学特性,在分析材料从线弹性阶段至断裂破坏的大变形过程中,能直观反映裂纹的形成、扩展及贯通过程^[2],因此,颗粒流方法已经成为模拟岩石类材料宏观细观力学行为的主要方法。

PFC中提供了两种基本的黏结模型:接触黏结模型(CBM)和平行黏结模型(PBM)。在接触黏结模型中,黏结剪切破坏后,只要颗粒保持接触,剪切强度就跌落至由摩擦决定的恒定值,接触刚度仍存在。然而,一旦黏结张拉破坏,不论颗粒是否接触,黏结的拉伸强度为零,如图1所示。因此,在接触黏结模型中,如果保持颗粒接触,黏结破坏可能不会显著影响宏观刚度,这对于岩石来说是不可能的。

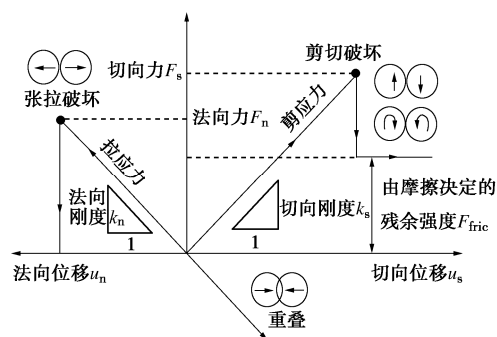


图1 接触黏结模型 (CBM) 法向与切向力学响应

Fig. 1 Normal and tangential mechanical responses of CBM

平行黏结模型由线性模型与黏结模型组成,当荷载过大导致黏结破坏时,平行黏结模型就等价于线性模型^[14],如图2所示, k_n 为法向刚度, k_s 为切向刚度, g_s 为黏结激活间隙, $\bar{\sigma}_c$ 为黏结抗拉强度, \bar{c} 为黏结内聚力, $\bar{\phi}$ 为摩擦角, μ 为摩擦系数。平行黏结模型的刚度由接触刚度和黏结刚度共同决定,黏结断裂会立即导致刚度降低,这不仅会影响所黏结颗粒的刚度,还会影响整个模型的宏观刚度,从这个意义上讲,平行黏结模型更加适用于岩石类材料。因此,本文选用平行黏结模型来模拟花岗岩的宏观细观破裂特征。

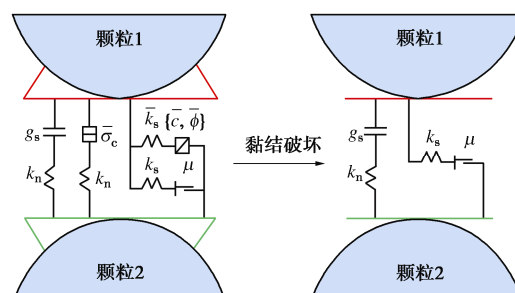


图2 平行黏结模型(PBM)示意图

Fig. 2 Diagrams of parallel bond model (PBM)

2 Clump 模型及参数

2.1 Clump 模型

Cho 等^[15]首先提出了 Clump 平行黏结模型 (CPBM), 随机将多个颗粒黏结组合形成一个 Clump 结构体, 团聚的颗粒可以像单个具有不规则形状但作为刚体移动的颗粒一样运行。Clump 中颗粒的旋转速度是固定的, 只有 Clump 结构体本身才能有旋转速度, 如图 3 所示。Potyondy 等^[16]的研究表明, 使用普通 PFC 模型会与试验实测值有较大的偏差, 而采用 Clump 建模方法, 可以限制过多的颗粒旋转, 能够较好地模拟颗粒的加载和破坏过程。

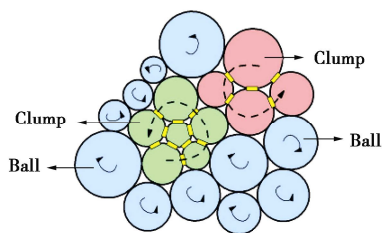


图 3 颗粒模型中的 Ball 与 Clump 旋转机制

Fig. 3 Ball and Clump rotation mechanism in particle model

2.2 Clump 模型构建方法

目前建立 Clump 模型的方法主要有 3 种: Cho 等^[15]通过限制一个 Clump 中颗粒的数量, 形成不规则颗粒模型; Yoon 等^[17]通过定义各个 Clump 外轮廓圆形的位置, 将中心位于同一圆形中的颗粒组成一个 Clump; Shi 等^[18]先建立模型外轮廓, 通过一系列 pebble 相互重叠以形成 Clump。

本文基于颗粒流的基本原理, 提出一种可变半径比例的 Clump 结构, 该结构的建模方法如下:

(1) 在给定范围的墙体 (Wall) 内生成半径比例为 $R_{\min} : R_{\max} = 1 : x$ ($x > 1$) 的大颗粒 (Ball_{max}), 如图 4 (a) 所示; 然后通过编写 Fish 语言将这些颗粒的坐标点及半径等信息存储到数据库中, 再将这大颗粒 (Ball_{max}) 删除。

(2) 在给定范围的墙体 (wall) 内重新生成 $r_{\min} : r_{\max} = 1 : y$ ($r < R, y > 1$) 的小颗粒 (Ball_{min}), 如图 4 (b) 所示。

(3) 从数据库中调出大颗粒的坐标及半径数据, 并对墙体 (Wall) 内的小颗粒进行标记, 如图 4 (c) 所示, 即将每个大颗粒圆形范围内的小颗粒分别划分成组 (Group), 而未被标记分组的颗粒, 通过 Fish 语言将该颗粒所有接触的未分组的颗粒分成一组, 所建立的这些组数就是后续建立的 Clump 数。

(4) 通过 Fish 语言将每一组小颗粒转化成 Clump

模板, 然后按照这些模板建立 Clump 结构, 最后将这些小颗粒 (Ball_{min}) 删除, 最终的结构模型如图 4 (d) 所示。

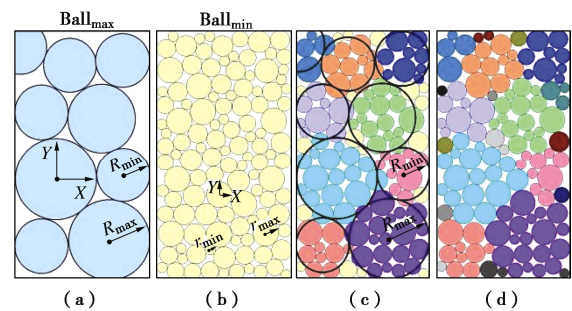


图 4 Clump 结构建模方法示意图

Fig. 4 Diagram of modeling method for Clump structure

2.3 Clump 模型参数

基于本文提出的可变半径比例 Clump 模型, 通过颗粒流程序 PFC^{2D}, 进行单轴压缩与巴西圆盘劈裂试验数值模拟, 探究 Clump 模型与 Ball 模型的粒径尺寸、细观参数对模拟岩石试件宏观力学特性的影响, 找到能够更好地匹配室内试验参数的规律。其中单轴压缩试验颗粒流试件尺寸为长 100 mm、宽 50 mm, 巴西圆盘劈裂试验颗粒流试件尺寸为直径 50 mm, 模型内小颗粒 (Ball_{min}) 的 $r_{\min} = 0.26 \text{ mm}$, $r_{\min} : r_{\max} = 1 : 1.5$ 。

(1) 粒径尺寸的影响

以表 1 中的模型力学参数为基础, 保持模型细观力学参数及大颗粒的粒径比 $R_{\min} : R_{\max} = 1 : 1.5$ 不变, 改变 Clump 与 Ball 的最小粒径 r_{\min} , 变化区间为 0.3 ~ 1.0 mm, 研究 Clump 模型与 Ball 模型粒径尺寸变化对模拟岩石试件宏观力学特性的影响。

表 1 模型力学参数

Table 1 Mechanical parameters of model	
参数	Ball 模型/ Clump 模型
颗粒刚度比 k_n/k_s	2.0
颗粒摩擦系数 μ	0.2
黏结模量 E^*/GPa	2.0
黏结刚度比 k_n^*/k_s^*	2.0
黏结抗拉强度 σ_b/MPa	36
黏结内聚力 c_b/MPa	27
摩擦角 $f(^{\circ})$	32

拉压强度变化如图 5 (a) 所示, 由于 Clump 结构限制了其内颗粒的旋转, 导致抗压强度比 Ball 模型大, 随着 Clump 半径的增大, Clump 结构内的颗粒增多, Clump 结构体之间的边界摩擦效应随之增强, 因此 Clump 模型试件的单轴抗压强度与抗拉强度均不断增加, 而 Ball 模型试件的单轴抗压强度随着 Ball 半径的增大无明显变化, 抗拉强度呈增大趋势。

张拉裂纹比例及单轴抗压强度 (UCS) 与抗拉强度 (TS) 之比如图 5 (b) 所示, 通过计算可知, Clump 模型试件的张拉裂纹比例随着半径的增大而逐渐减小, 这是因为张拉裂纹沿轴向扩展时, Clump 结构特性导致应力路径发生改变, 转为剪切破坏。粒径尺寸变化对 Ball 模型试件微裂纹扩展路径的影响并不明显, 张拉裂纹比例趋于平稳, 基本保持不变。Clump 模型试件的拉压比随半径的增大呈显著增大趋势, 而 Ball 模型试件的拉压比受颗粒半径的影响很小。

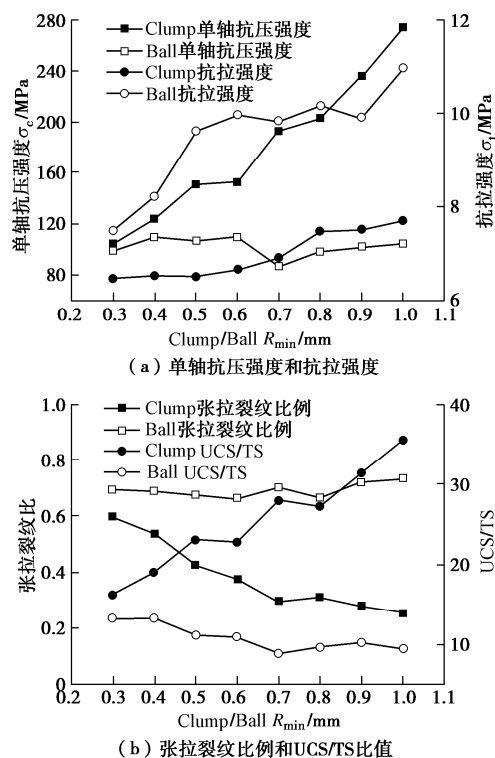


图 5 Clump/Ball 粒径对试件宏观力学特性的影响

Fig. 5 Effects of Clump/Ball particle size on macro-mechanical properties of specimens

(2) 模型力学参数的影响

选取半径比例 $R_{min}:R_{max}=1:1.5$ 的 Ball 模型与 Clump 模型, 以表 1 中模型细观力学参数为基础, 逐渐调整其中一个参数, 保持其它参数不变, 在一定参数变化范围内, 研究黏结模量 E^* 、黏结刚度比 k_n^*/k_s^* 、黏结内聚力 c_b 与黏结抗拉强度 σ_b 对单轴抗压强度与抗拉强度之比 UCS/TS 的影响。

图 6 为 Ball 模型模拟结果, 随着各参数的增大, 拉压比逐渐趋于稳定。通过对 Ball 模型参数变化的计算可知, 各参数对 Ball 模型的拉压比有一定的影响, 其中黏结模量 E^* 的影响最大。但是, 在参数达到一定值时, 对拉压比影响减小, 尤其是在黏结刚度比 k_n^*/k_s^* 达到 1.6 后影响较小。

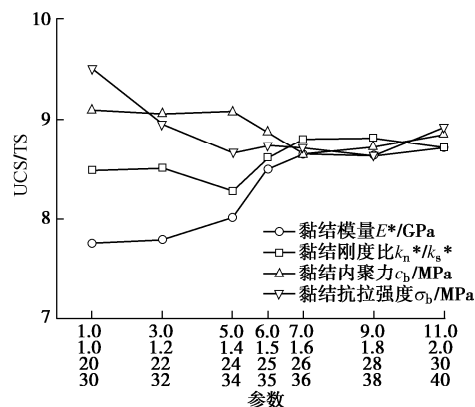


图 6 细观参数对 Ball 模型 UCS/TS 的影响

Fig. 6 Effects of meso parameters on UCS/TS of Ball model

图 7 为 Clump 模型模拟结果, 黏结内聚力 c_b 与黏结抗拉强度 σ_b 对 Clump 模型的拉压比影响较明显, 其中黏结抗拉强度 σ_b 的影响最大, 随着黏结抗拉强度 σ_b 的增大, 拉压比呈减小趋势。黏结刚度比 k_n^*/k_s^* 对 Clump 模型的拉压比无较大影响, 对模型的破裂模式有一定影响。

通过对比参数分析可知, 各参数在一定程度上对岩石的宏观力学特性有影响, 但是通过对比 Ball 模型与 Clump 模型可知, 在一定参数范围内, 拉压比随参数的变化并不明显, 可见, 在构建不同岩石材料的颗粒流模型时, 参数能起到一定的微调作用, 而颗粒的形状尺寸是影响岩石拉压力学特性的主要因素。

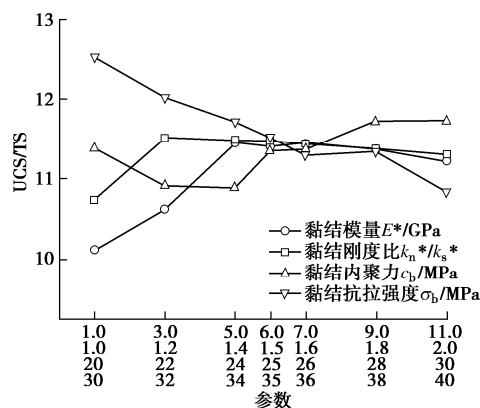


图 7 细观参数对 Clump 模型 UCS/TS 的影响

Fig. 7 Effects of meso parameters on UCS/TS of Clump model

通过以上方法建立的 Clump 结构, 可以任意调节 Clump 结构的大小比例, 也可以调节 Clump 结构内 Pabble 的半径比例, 通过这些结构尺寸比例的调节, 来调整颗粒流模型的宏观结构力学特性, 进而较为快捷准确地匹配不同的岩石材料。这一方法不仅能够有效克服普通颗粒模型与试验实测值有较大偏差的问题, 而且能够提高数值模拟的精度与效率, 更真实准确地反映出岩石的宏观破裂特征。

3 裂隙花岗岩细观破裂特征

3.1 裂隙花岗岩力学特性试验

试验所选用的花岗岩岩样取自山东新城金矿 1020 m 水平工作面, 岩块质地均匀, 总体完整性好。采集的花岗岩材料经试验室精加工, 制备成 $\phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的圆柱试件及 $\phi 50\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 的圆盘试件, 其中裂隙试件在完整试件基础上在试件中心点水力切割不同倾角的贯穿裂隙, 试件的加工精度满足国际岩石力学学会建议试验规范要求, 岩石单轴压缩及巴西劈裂试验在朝阳仪器有限公司生产的 GAW-2000 微机控制电液伺服刚性压力试验机上进行。完整试件及裂隙花岗岩试件如图 8 所示, 其中 a 为 12.5 mm, b 为 10 mm。试验工况及力学参数计算结果如表 2 所示。

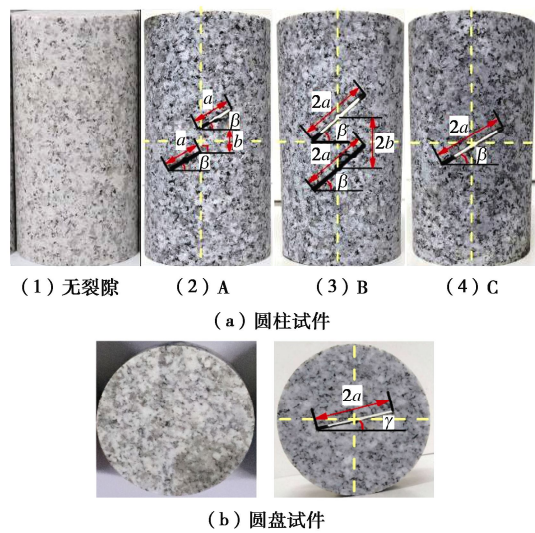


图 8 完整及含裂隙花岗岩试件
Fig. 8 Complete and fractured granite specimens

表 2 试验工况及力学参数

单轴压缩试验			巴西圆盘劈裂试验		
试件 编号	裂隙 角度 $\beta/(^{\circ})$	单轴抗 压强度 σ_c/MPa	试件 编号	裂隙 角度 $\gamma/(^{\circ})$	抗拉 强度 σ_t/MPa
无裂隙	—	138.73			
A	35	55.14	1	—	11.85
	45	60.91	2	0	4.97
B	35	48.03	3	20	3.69
	45	60.68	4	40	4.07
C	35	47.87	5	60	2.27
	45	56.58	6	90	3.11

3.2 颗粒流模型参数标定

采用可变半径比例 Clump 模型, 通过颗粒流 PFC^{2D} 软件进行单轴压缩试验及巴西圆盘劈裂试验的

数值模拟。数值计算模型尺寸与室内试验试件尺寸一致, Clump 模型如图 9 所示, 其中单轴 Clump 模型的 Pebble 数为 14616, 巴西 Clump 模型的 Pebble 数为 4986。参数标定过程中, 基于前文粒径尺寸及力学参数对拉压强度的影响分析, 配置花岗岩颗粒流模型, 根据花岗岩拉压强度经验值确定 Clump R_{\min} 为 0.6 mm, 考虑黏结内聚力 c_b 与黏结抗拉强度 σ_b 对 Clump 模型拉压比影响, 以及黏结刚度比 k_n^*/k_s^* 对破裂模式的影响, 对表 1 中的细观力学参数进行微调, 确定模型力学参数如表 3 所示。

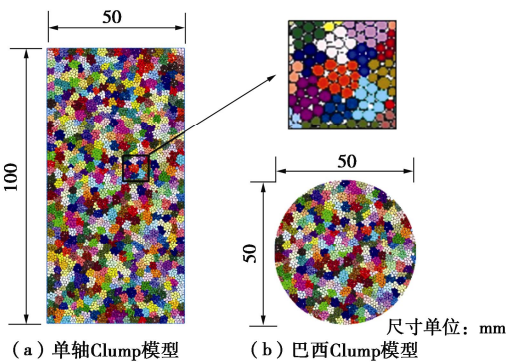


图 9 Clump 模型示意图
Fig. 9 Diagram of Clump model

表 3 模型力学参数

Table 3 Mechanical parameters of model			
参数	取值	参数	取值
Ball R_{\min}/mm	0.26	黏结模量 E^*/GPa	2.0
Ball 粒径比 $R_{\min}:R_{\max}$	1.5	黏结刚度比 k_n^*/k_s^*	2.5
颗粒刚度比 k_n/k_s	2.0	黏结抗拉强度	32
		σ_b/MPa	
颗粒摩擦系数 μ	0.2	黏结内聚力 c_b/MPa	24
Clump R_{\min}/mm	0.6	黏结摩擦系数 μ^*	0.2
Clump 粒径比 $R_{\min}:R_{\max}$	1.5	摩擦角 $f/(^{\circ})$	32

3.3 单轴压缩试验结果及分析

单轴压缩数值模拟与室内试验的轴向应力 - 应变曲线如图 10 所示, 最终破裂模式如表 4 所示。

由图 10 (a) 可知, 无裂隙花岗岩试件单轴压缩数值模拟与室内试验的应力 - 应变曲线吻合较好, 室内试验单轴抗压强度为 135.86 MPa, 数值模拟单轴抗压强度为 141.39 MPa, 相对误差为 4.07%。同时, 在峰值强度之后, 轴向应力迅速跌落, 试件失稳破坏, 表现出典型的脆性特征, 由表 4 可知, 数值模拟的破裂模式为沿加载轴线的劈裂破坏, 与室内试验结果吻合。

由图 10 (b), (c) 与 (d) 可知, 35° 裂隙试件单轴压缩数值模拟与室内试验的应力 - 应变曲线吻合较好, 其中 B-35° 试件的数值计算曲线与室内试验曲线的应力峰值吻合, 而峰值点对应的应变值相差

0.05%; 45° 裂隙试件数值模拟应力 - 应变曲线与室内试验应力 - 应变曲线基本吻合。由表 4 可知, 35° 及 45° 的裂隙试件数值模拟的破裂模式与室内试验结果吻合。

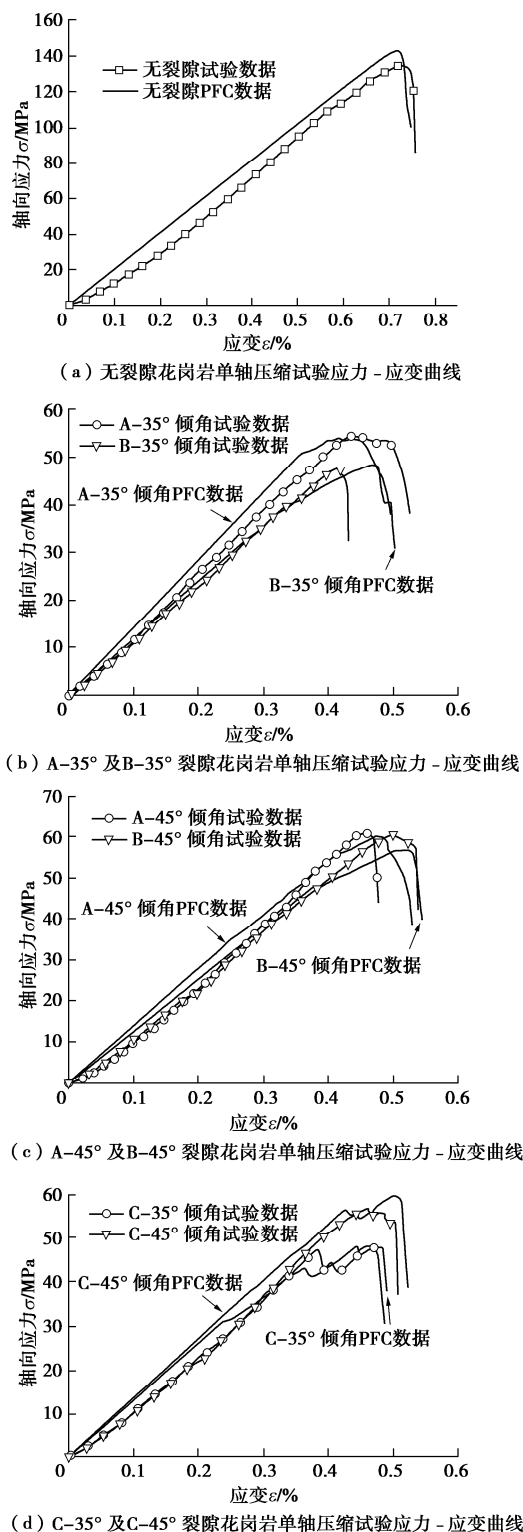


图 10 花岗岩单轴压缩试验与模拟应力 - 应变曲线对比

Fig. 10 Comparison of uniaxial compression tests on granite and simulated stress-strain curves

3.4 巴西圆盘劈裂试验结果分析

巴西圆盘劈裂数值模拟与室内试验的拉应力 - 应变曲线如图 11 所示, 最终破裂模式如表 5 所示。

由图 11 (a) 可知, 无裂隙花岗岩圆盘试件数值模拟应力 - 应变曲线与室内试验应力 - 应变曲线吻合较好, 室内试验抗拉强度为 11.85 MPa, 数值模拟抗拉强度为 10.37 MPa, 相对误差为 12.49%。同时, 数值模拟结果的破裂模式为沿加载轴线的拉伸破坏, 由表 5 可知, 其最终破裂模式与室内试验结果吻合较好。

由图 11 (a), (b) 与表 5 可知, 20°, 40° 及 60° 倾角花岗岩圆盘试件数值计算曲线与室内试验曲线基本吻合, 破裂模式吻合较好; 0° 倾角试件数值计算曲线与室内试验曲线相比略有偏差, 破裂模式较为相似; 90° 倾角试件数值计算曲线与室内试验曲线的应力峰值基本吻合, 而峰值点对应的应变值相差 0.06%, 破裂模式基本吻合。

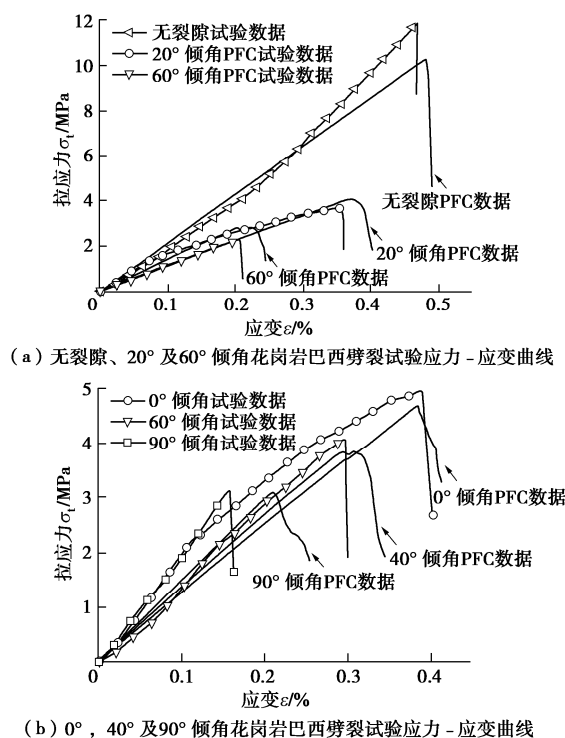


图 11 花岗岩巴西劈裂试验与模拟应力 - 应变曲线对比

Fig. 11 Comparison of Brazilian splitting tests on granite and simulated stress-strain curves

4 高应力围岩宏观破裂尺度效应

4.1 数值计算模型

不同尺寸及边界的岩体, 其力学性质存在一定差别, 形成了岩体力学性质及破裂特征的尺度效应。在构建大尺度颗粒流模型方面, 目前仍然面临较大困难, 尤其是大尺度 Clump 模型的构建, 按照常规方法会浪费大量的时间。基于前文所提出的可变半径比例

表 4 花岗岩单轴压缩试验与模拟破裂特征

Table 4 Uniaxial compression tests and numerical simulation fracture characteristics of granite							
试件类型	无	A		B		C	
裂隙角度 $\beta/(^{\circ})$	—	35	45	35	45	35	45
颗粒流 计算结果							
室内试验 结果							

表 5 花岗岩巴西劈裂试验与模拟破裂特征

Table 5 Brazilian splitting tests and numerical simulation fracture characteristics of granite						
裂隙角度 $\gamma/(^{\circ})$	无	0	20	40	60	90
颗粒流 计算结果						
室内试验 结果						

Clump 模型构造方法, 以及所选取的模型细观力学参数, 首先建立 100 mm×100 mm 小尺度的 Ball-Brick, 然后转化为 Clump 模型, 最后通过 Copy 功能建立不同尺度的颗粒流模型。值得注意的是, 在构建小尺度 Ball-Brick 模型时, 模型的尺度不宜过大, 应控制颗粒在 1 万个内, 否则在转化时, 会出现边界不能正常接触的情况。

颗粒流模型的边界条件及尺寸如图 12 所示, 模型以边长为 L 的正方形为边界, 在保证模型颗粒密度相同的条件下, L 分别取 0.5, 2.0, 8.0 m, 圆形洞室的半径取 $0.3L$, 侧压力系数 $\lambda=0.5$, 原岩应力 $\sigma=100$ MPa, 模型中的颗粒细观结构尺寸按本文校对的花岗岩模型参数选取, 3 种颗粒模型的 Clump 个数分别为 1.2 万, 19.1 万和 304.1 万, 分析不同尺度的高应力洞室围岩局部破裂特征及尺度效应。

4.2 洞室围岩局部破裂尺度效应分析

洞室的开挖是一个卸载过程, 基于所构建的不同尺度的颗粒流模型, 从破裂模式及裂纹扩展这两个方面, 研究洞室围岩的宏观破裂尺度效应。围岩模拟开挖后运行 10000 步的计算结果如图 13 所示。

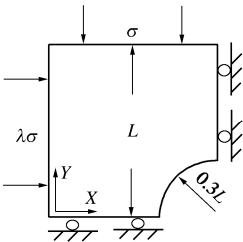


图 12 数值计算模型示意图

Fig. 12 Diagram of numerical model

图 13 (a) 为模型尺寸 $L=0.5$ m 的洞室开挖后围岩破裂区及裂纹扩展区分布特征, 洞室开挖后, 围岩沿水平方向出现了三角形的破碎区域, 该破碎区域的边界清晰, 厚度约为 $0.25L$, 并且已经逐渐脱离洞室轮廓线向内部移动, 围岩破裂区内岩体破碎, 但是没有出现明显的剪切带, 裂纹扩展区的分布也主要集中在三角区域内。

图 13 (b) 为模型尺寸 $L=2.0$ m 的洞室开挖后围岩破裂区及裂纹扩展区分布特征, 开挖后围岩出现了不规则的破碎区域, 破裂边界较为清晰, 围岩破裂区内完整岩块占破裂区的大部分, 并且沿着开挖边界出现了明显的剪切带, 裂纹扩展区主要集中在 $0.13L$ 范

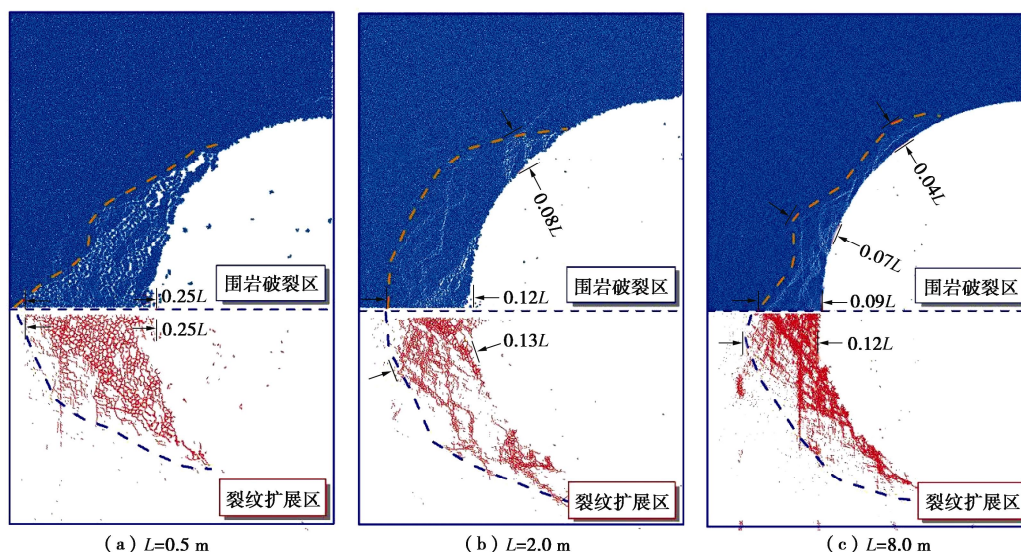


图 13 不同尺度围岩破裂区及裂纹扩展区

Fig. 13 Fracture zones and crack propagation zones of surrounding rock under different scales

围内, 相比图 13 (a) 的破裂区域, 该模型的破裂范围比例明显减小。

图 13 (c) 为模型尺寸 $L = 8.0$ m 的洞室开挖后围岩破裂区及裂纹扩展区分布特征, 在保证相同颗粒密度而增大模型尺度条件下, 围岩的破裂特征与图 13 (a), (b) 不同, 围岩破裂深度较小, 在 $0.12L$ 范围内, 沿着围岩垂直方向的扩展范围较大, 破裂形式主要是以剪切滑移破坏和板裂破坏为主, 裂纹扩展范围比例明显减小, 围岩体现出了明显的高应力局部破裂特征。

5 结 论

(1) 通过对比 Ball 和 Clump 模型在不同细观力学参数及不同粒径尺寸变化情况下的拉压比可知, Ball 和 Clump 模型的拉压比受细观力学参数的影响较小, Ball 模型受粒径尺寸的影响同样较小, 而 Clump 模型受粒径尺寸及比例的影响较大, 在构建其它类型岩石的颗粒模型时, 可通过调整 Clump 颗粒结构来体现岩石材料不同的拉压比力学特性。

(2) 对比分析裂隙花岗岩试件数值模拟与室内试验的拉、压强度曲线及破裂模式, 结果表明二者吻合度较高, 本文所提出的 Clump 建模方法与 Ball 建模方法相比, 可以较好的控制拉压比, 得到更符合工程实际的计算结果。

(3) 当围岩尺度较小时, 围岩的破裂区主要以局部区域破碎为主, 而当围岩尺度逐渐增大时, 围岩表现出了明显的剪切滑移及板裂破坏特征。可见, 基于花岗岩细观颗粒模型的深部围岩破坏特征具有明显的尺度效应。在分析工程问题时, 应建立符合工程尺度

的颗粒模型, 才能在硬岩破裂及支护失效机理等研究方面获得合理的计算结果。

参考文献:

- [1] 蒋明镜, 张 宁, 申志福, 等. 含裂隙岩体单轴压缩裂纹扩展机制离散元分析[J]. 岩土力学, 2015, **36**(11): 3293 - 3300, 3314. (JIANG Ming-jing, ZHANG Ning, SHEN Zhi-fu, et al. DEM analyses of crack propagation in flawed rock mass under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(11): 3293 - 3300, 3314. (in Chinese))
- [2] 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 Chong-bin. 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))
- [3] 胡 波, 杨圣奇, 徐 鹏, 等. 单裂隙砂岩蠕变模型参数时间尺度效应及颗粒流数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(5): 864 - 873. (HU Bo, YANG Sheng-qi, XU Peng, et al. Time-scale effect of the creep model parameters and particle flow simulation of sandstone with a single crack[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(5): 864 - 873. (in Chinese))
- [4] 邓树新, 郑永来, 冯利坡, 等. 试验设计法在硬岩 PFC^{3D} 模型细观参数标定中的应用[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(4): 655 - 664. (DENG Shu-xin, ZHENG Yong-lai, FENG Li-po, et al. Application of design of experiments in microscopic parameter calibration for hard rocks of PFC^{3D} model[J].

- Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(4): 655 - 664. (in Chinese))
- [5] BAHRAANI N, KAISER P K. Estimation of confined peak strength of crack-damaged rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, **50**(2): 309 - 326.
- [6] SHI C, YANG W K, YANG J X, et al. Calibration of micro-scaled mechanical parameters of granite based on a bonded-particle model with 2D particle flow code[J]. Granular Matter, 2019, **21**(2): 3801 - 3813.
- [7] 丛 宇, 王在泉, 郑颖人, 等. 基于颗粒流原理的岩石类材料细观参数的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(6): 1031 - 1040. (CONG Yu, WANG Zai-quan, ZHENG Ying-ren, et al. Experimental study on microscopic parameters of brittle materials based on particle flow theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(6): 1031 - 1040. (in Chinese))
- [8] STAVROU A, MURPHY W. Quantifying the effects of scale and heterogeneity on the confined strength of micro-defected rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, **102**: 131 - 143.
- [9] 孙 超, 刘 芳, 蒋明镜, 等. 岩石抗压强度的尺寸效应及端部约束的离散元数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(增刊 2): 3421 - 3428. (SUN Chao, LIU Fang, JIANG Ming-jing, et al. Size effect of compression strength and end constraint of rocks by distinct element simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(S2): 3421 - 3428. (in Chinese))
- [10] 谢 璨, 李树忱, 晏 勤, 等. 不同尺寸裂隙岩石损伤破坏特性光弹性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(3): 568 - 575. (XIE Can, LI Shu-chen, YAN Qin, et al. Photoelastic experiments on failure characteristics of fractured rock with different sizes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(3): 568 - 575. (in Chinese))
- [11] PENG J, LOUIS N Y, TEH C I. Effects of grain size-to-particle size ratio on micro-cracking behavior using a bonded-particle grain-based model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, **100**: 207 - 217.
- [12] 陈庆发, 郑文师, 牛文静, 等. 裂隙岩体几何与力学尺寸效应的关联性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(增刊 1): 2857 - 2870. (CHEN Qing-fa, ZHENG Wen-shi, NIU Wen-jing, et al. Correlation of the geometrical and mechanical size effects of fractured rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(S1): 2857 - 2870. (in Chinese))
- [13] 梁昌玉, 李 晓, 吴树仁. 中低应变率加载条件下花岗岩尺寸效应的能量特征研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(12): 3472 - 3480. (LIANG Chang-yu, LI Xiao, WU Shu-ren. Research on energy characteristics of size effect of granite under low/intermediate strain rates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(12): 3472 - 3480. (in Chinese))
- [14] 唐礼忠, 宋祥霖. 含非共面重叠型微裂隙类岩石试样单轴受压宏细观力学特性颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(11): 2161 - 2171. (TANG Li-zhong, SONG Yang-lin. Particle flow simulation of macro- and meso-mechanical properties of uniaxially compressed rock-like specimens with non-coplanar overlapping flaws[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(11): 2161 - 2171. (in Chinese))
- [15] CHO N, MARTIN C D, SEGO D C. A clumped particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, **44**(7): 997 - 1010.
- [16] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, **41**(8): 1329 - 1364.
- [17] YOON J S, ZANG A, STEPHANSSON O. Simulating fracture and friction of aue granite under confined asymmetric compressive test using clumped particle model[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2012, **49**: 68 - 83.
- [18] SHI C, LI D J, XU W Y, et al. Failure mechanism and stability analysis of the Zhenggang landslide in Yunnan Province of China using 3D particle flow code simulation[J]. Journal of Mountain Science, 2016, **13**(5): 891 - 905.