

不同边界对花岗岩三轴试验影响的 三维离散元数值研究

王治林, 郑明明*, 夏敏, 熊亮, 吴祖锐, 王凯

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 为了研究边界对花岗岩常规三轴离散元模拟试验的影响, 使用颗粒流模拟软件(PFC3D), 基于三维等效晶质模型(Grain-Based-Model)方法生成花岗岩模型, 同时利用有限元-离散元(FDM-DEM)耦合建模技术, 分别建立刚性、柔性膜以及有限单元(“Shell”)3种边界下的离散元三轴试验, 结果表明: 相较于“Shell”边界, 刚性边界会提高岩样发生应力集中现象的概率, 影响岩样的破坏形态; 柔性膜边界会导致岩样在三轴加载过程中所受的实际围压大于目标围压, 并显著提高岩样的残余强度; 而“Shell”边界下的岩样所受围压稳定, 发生应力集中的概率最小。综合分析可得: 在花岗岩离散元三轴模拟中“Shell”边界是合适的选择。

关键词: 花岗岩; 三轴试验; 有限元-离散元耦合; 柔性膜边界; 刚性边界; “Shell”边界; 应力应变特性

中图分类号: TU458 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)01-0150-09

Discrete element numerical study on the influence of different 3D boundaries on the triaxial simulation test of granite

WANG Zhilin, ZHENG Mingming*, XIA Min, XIONG Liang, WU Zurui, WANG Kai

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China)

Abstract: This paper studies the influence of different boundaries on the conventional triaxial simulation test of granite. The particle flow code(PFC3D) was used to generate the granite model based on the method of grain-based model. At the same time, the discrete element triaxial test models were established respectively for the three boundaries of the rigid membrane, flexible membrane and finite element (“Shell”) by using the FDM-DEM coupling modeling technology. Test results shows that compared with the “Shell” boundary, the rigid boundary will increase the probability of stress concentration in the sample and affect the failure form of rock samples, the flexible membrane boundary will cause the actual confining pressure of the rock sample to be larger than the target confining pressure during the triaxial loading process, and significantly increase the residual strength of the rock sample. However, the confining pressure of the rock sample under the shell boundary is stable, and the probability of stress concentration is the smallest. Therefore, the shell boundary should be used in the triaxial test of discrete element simulation.

Key words: granite; triaxial test; FDM-DEM coupling; flexible membrane boundary; rigid boundary; “Shell” boundary; stress-strain characteristics

0 引言

花岗岩是由不同种类较大晶体颗粒与非晶体

颗粒等构成的非连续、非均质且力学行为较为复杂的岩石, 且在诸多掘进工程中极为常见, 杨达等^[1]认

收稿日期: 2022-04-13; 修回日期: 2022-09-17 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.01.021

第一作者: 王治林, 男, 汉族, 1998年生, 硕士研究生在读, 研究方向为岩土与地下工程, 四川省成都市成都理工大学环境与土木工程学院, wangzhilin2022@126.com。

通信作者: 郑明明, 男, 汉族, 1988年生, 副教授, 博士, 研究方向为地质工程与地下空间工程, 四川省成都市成都理工大学环境与土木工程学院, mingming_zheng513@163.com。

引用格式: 王治林, 郑明明, 夏敏, 等. 不同边界对花岗岩三轴试验影响的三维离散元数值研究[J]. 钻探工程, 2023, 50(1): 150-158.

WANG Zhilin, ZHENG Mingming, XIA Min, et al. Discrete element numerical study on the influence of different 3D boundaries on the triaxial simulation test of granite[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(1): 150-158.

为使用气动潜孔锤并且当球齿以30 J冲击功钻进花岗岩时,可有效降低能量损耗与提高碎岩效率。汤凤林等^[2]研究了钻进速度与规程参数的优化关系,提出了优化正常钻进的措施。张程等^[3]通过室内实验研究了超声波碎岩技术下花岗岩径向位移与内部损伤的关系,并认为超声波碎岩技术能提高在花岗岩等硬岩中的钻进效率,以上学者要么从钻进设备要么从工艺方法等方面研究如何提高钻进效率,而未考虑到花岗岩本身的力学特性,目前许多学者利用数值方法研究岩石的力学特性,而在数值方法中,离散元法对于探究岩石在变形破坏的细观机理方面具有巨大的优势^[4-6]。

许多学者^[7-9]使用颗粒流软件(PFC3D)分析岩石在不同围压下、加载速率下的力学特性时其边界均使用刚性边界,而常规室内三轴试验中,试样基本都采用橡胶膜或乳胶膜密封,刚性边界不符合实际边界情况,因此,金磊等^[10]根据细分概念,提出三维组合墙法模拟三轴边界,其在加载过程中体现出与室内试样相似的横向膨胀现象,能良好地模拟试样的变形特征。Xu等^[11]在双轴实验时使用一定厚度的光滑颗粒集合体来模拟柔性薄膜,发现边界条件一定程度上会影响剪切带的形成和形态。Cheung等^[12],Thmos等^[13]在双轴实验中对比了柔性边界和刚性边界对试验模拟结果的影响,发现刚性边界下试样变形与室内试样变形形态不符,而柔性边界下试样能够体现出与室内试样相同的横向膨胀现象。Qu等^[14]在PFC中提出用膜颗粒微观参数表示柔性膜边界物理属性的方法,并与大量三轴实验结果对比分析,指出使用柔性膜边界是当下较为适合的离散元边界模拟方法。但对于室内试验所用的橡胶膜或乳胶膜,无论是柔性边界还是三维组合墙在力学本质上都难以模拟出其弹塑性特征,而对于弹塑性物体的模拟,有限元软件有着极其显著的优势。

对此,基于最新的有限元-离散元(FDM-EDM)耦合技术,使用PFC分别生成“刚性”、“柔性膜”、“Shell”单元三种边界下的花岗岩三轴试验模型,进而分析“刚性”、“柔性膜”、“Shell”单元3种边界对花岗岩常规三轴模拟试验的影响。

1 花岗岩模型

1.1 花岗岩细观结构

花岗岩中的矿物颗粒是影响花岗岩力学性质的

重要因素之一,也是岩石非均质性的重要体现,花岗岩中矿物成分主要为长石、石英、黑云母以及其它矿物等,根据张涛等^[15]的研究,本文花岗岩内部矿物成分含量为:长石(57.6%)、石英(30.4%)、黑云母(10.1%)、其它矿物(2.0%)。本文中圆柱形岩样半径为2.1 cm,高度9 cm,岩样中颗粒数量为14799,粒径范围为0.028~0.056 cm,粒径分布服从均匀分布。

1.2 花岗岩模型的生成

颗粒流程序中不能直接生成三维等效品质模型(Grain-Based-Model),须借助其软件中自带的“块体(Rblock)”单元或者“几何体(geometry)”单元来间接生成三维等效品质模型。张涛等^[15]是通过3个不同阶段来生成三维等效品质模型:(1)构建试样初始颗粒模型;(2)矿物晶体分组,在初始颗粒模型外部构建一个外接“几何体”单元,将外接几何体单元转化为“块体”单元,根据矿物成分对“块体”单元进行分组,再将分组后的“块体”单元集合再次转化“几何体”单元集合;(3)利用“几何体”单元进行填充,最终生成三维等效品质模型。

上述过程最终实现了花岗岩三维等效品质模型的建立,但其生成步骤十分繁琐,且“块体”单元与“几何体”单元之间需要多次转化,降低了计算效率,为此本文在其基础上通过直接使用“Rblock”对初始颗粒模型进行划分,从而简化了生成步骤,提高了计算效率。花岗岩模型生成过程中的3个阶段如图1所示。

阶段一:确定试样尺寸,构建初始颗粒模型,如图1(a)所示。

阶段二:“块体”单元分组。在初始颗粒模型外部构建一个外接“几何体单元”,将外接“几何体”单元再次转化为“块体”单元,对“块体”单元进行分组,如图1(b)、(c)所示。

阶段三:生成三维等效品质模型。通过判断“块体”单元与初始模型颗粒位置的关系对初始模型颗粒进行分组,从而生成三维等效品质模型,如图1(d)、(e)所示。

1.3 模型微观参数确定

颗粒流程序中自带多种接触模型,其中平行黏结模型(Parallel Bond Model)适合用来模拟岩石颗粒之间的接触^[16-19],因此本文中岩石颗粒之间的接触均采用平行黏结模型。此外本文将岩石内部颗粒



图1 花岗岩模型生成示意

Fig.1 Schematic diagram of granite model generation

之间的接触称为晶体内接触和晶体间接触。根据Ding等^[20]以往的花岗岩常规三轴离散元模拟研究

以及目前效果较好的“试错法”,本文中微观接触参数如表1所示。

表1 平行粘结模型微观参数

Table 1 Micro-parameters of the parallel bonding model

微观参数	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	体积含 量/%	颗粒最 小半 径/cm	颗粒最 大半 径/cm	线性部分			粘结部分				
					线性弹 性模量/ GPa	线性刚 度比	摩擦因 数	粘结弹 性模量/ GPa	粘结刚 度比	粘聚强 度/MPa	拉伸强 度/MPa	摩擦角/ (°)
石英	2650	23			70	1.2	0.48	70	1.2	240	120	19.5
黑云母	3150	26			55	2.8	0.32	55	2.8	120	60	17.2
长石	2600	49	0.028	0.056	55	1.2	0.67	55	1.2	170	85	22.3
其他矿物	1600	2			30	3.7	0.4	30	3.7	80	40	23.7
晶间接触					45	1.3	0.8	45	1.3	50	27	34

2 三轴模拟试验建立

边界的建立和伺服是三轴模拟试验的关键步骤,前面已介绍过如何建立花岗岩模型的方法,因此这里主要介绍本文中花岗岩三轴压缩试验的3种边界。

2.1 “刚性”边界

PFC可以直接生成常规三轴模拟试验中的刚性边界,刚性边界属于刚体,受力后不会产生任何变形,但通过刚性伺服函数可以获得径向方向上的一个平移自由度,细观上表现为刚性边界顶点的径向位移,宏观上表现为刚性边界的整体放大与缩小^[21],由于毛海涛等^[21]对刚性伺服机制的深入解释,本文中便不再详细解释刚性伺服机制,“刚性”边界如图2(a)所示。

2.2 “柔性膜”边界

蒋成龙等^[22]详细介绍了柔性膜的生成方法和伺服理论。本文利用其方法生成常规三轴实验所用的柔性膜边界,基于柔性膜伺服理论,使柔性膜边界下的花岗岩模型达到目标围压。柔性膜颗粒在空间上具有6个自由度,可以任意变形,但本质上属于离散元边界,Qu等^[14]经过理论推导、试验验证找到了柔性膜颗粒间的接触参数与柔性膜宏观参数(弹性模量、泊松比)的关系,基此,本文使用Qu等^[14]发现的关系通过柔性膜宏观参数确定柔性膜颗粒的接触参数,本文中柔性膜边界的弹性模量和泊松比分别为7.8 MPa、0.46。“柔性膜”边界如图2(b)所示。

2.3 “Shell”单元边界

室内试验所用的橡皮膜在力学本质上属于弹性物体,而在模拟弹塑性物体时,有限元软件比离散

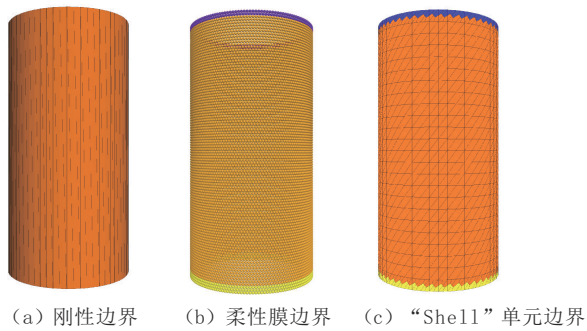


图2 3种不同边界条件示意图

Fig. 2 Schematic diagram of three different boundary conditions

元有巨大优势^[23],有限元法中的“Shell”单元由带有3个节点的三角面组成,其中每个节点都具有6个自由度(3个平移自由度、3个旋转自由度),如图3所示:其变形分为膜变形以及梁变形,对于各向同性的“Shell”单元,其力学控制方程符合式(1)与式(2),其中 E 和 ν 为“Shell”单元的弹性模量和泊松比,本文中 $E=7.8$ MPa, $\nu=0.46$ 。同时其显著优点是:“Shell”单元边界的围压可以通过 Structure Shell Apply 命令精准施加且围压在加载过程中保持恒定不变,因此引入FLAC中的“Shell”单元作为三轴模拟试验的边界。本文中“Shell”单元边界由2304个三角形“Shell”单元均匀组成,如图2(c)所示。

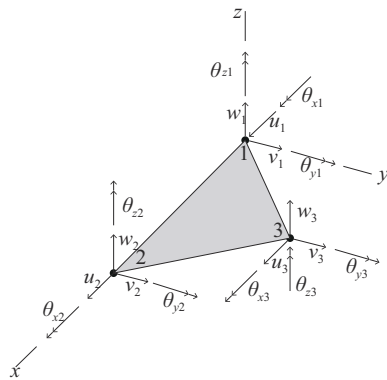


图3 Shell单元示意图

Fig. 3 Example of Shell element

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [E] \{\epsilon\} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ & c_{22} & c_{23} \\ sym. & & c_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} c_{11} &= c_{22} = \frac{E}{1-\nu^2} \\ c_{33} &= \frac{E}{2(1+\nu)} \\ c_{12} &= \nu \left(\frac{E}{1-\nu^2} \right) \\ c_{13} &= c_{23} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

2.4 花岗岩三轴加载

为在离散元中研究边界对花岗岩三轴压缩试验的影响,设计9种岩样在3种不同边界下的模拟实验,共计27组模拟试验,结果见表2。

表2 模拟岩样标号及试验参数

Table 2 The number of samples and experimental parameters

围压/MPa	岩样编号	加载速率/(mm·s ⁻¹)
6	X61	0.5
	X62	1.0
	X63	1.5
12	X121	0.5
	X122	1.0
	X123	1.5
24	X241	0.5
	X242	1.0
	X243	1.5

3 不同边界下模拟结果的对比分析

3.1 3种边界下的岩样变形差异

为对比不同情况下的岩样变形破坏情况,同时鉴于文章篇幅,本文仅列出了X61岩样在3种边界下的变形破坏情况,如图4(a)、(b)、(c)所示:岩样在柔性膜边界和“Shell”边界下都发生了明显的横向膨胀现象,这也与图4(d)中甘霖等^[24]所做的花岗岩

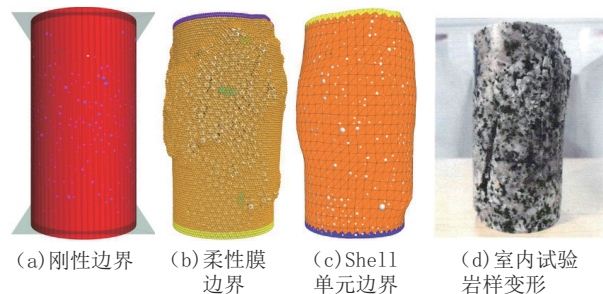


图4 试样变形形态对比

Fig. 4 Comparison of deformation of different samples

三轴试验中花岗岩发生横向膨胀的现象基本吻合,然而岩样在刚性边界下却没有发生横向膨胀的现象,这是一定程度上由于刚性伺服机制,为了保持伺服围压稳定在目标区间内,整个圆柱形刚性边界进行整体同步运动,因此在围压相同、轴应变(ϵ_1)相同的情况下,相对于Shell边界而言,刚性边界下岩样的径向应变(ϵ_3)大于“Shell”单元边界下岩样的径向应变(ϵ_3),而根据MARTIN^[25]所提出的体积应变公式(3),刚性边界下的岩样体积应变(ϵ_v)应大于Shell单元边界下的岩样体积应变(ϵ_v)。

$$\epsilon_v = \epsilon_1 + 2\epsilon_3 \quad (3)$$

为对上述猜想进行验证,列出模拟岩样的体积应变曲线,鉴于文章篇幅,本文仅列出X61岩样在3种边界情况下的体积应变曲线,如图5所示。从图5中可以看出,在同一轴应变时,X61岩样在刚性边界下的体积应变大于在Shell单元边界下的体积应变,从而验证了上述猜想的合理性。

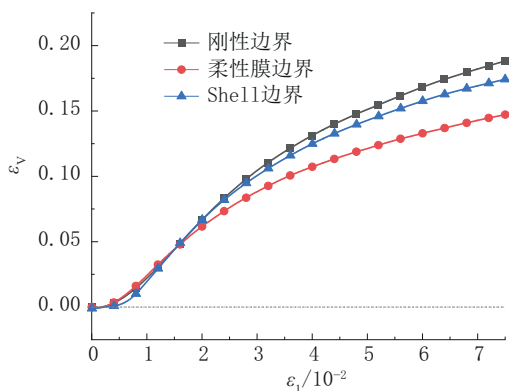


图5 3种边界下X61试样的应力-体积应变曲线
Fig. 5 Stress vs volume strain curves of X61 specimens under three boundaries

3.2 岩样应力-应变曲线

三轴试验中岩样的应力-应变曲线是反映不同边界对花岗岩三轴试验影响的主要形式,图6为27组岩样三轴模拟试验的应力-应变曲线图。

从图6中可知:不同边界下岩样的三轴压缩曲线的应力-应变曲线的变化趋势大体上是一致的,曲线在峰值应力前近似呈线性变化,岩样进入屈服阶段后,曲线斜率逐渐变小,峰后阶段岩样强度均出现明显的下降。相同加载速率下,岩样在3种边界条件下的峰值应力随围压的增加而增长,其中岩样在柔性膜边界下的峰值应力增加幅度最为剧烈。相同

围压条件下,岩样在刚性边界下的峰值强度受加载速度的增加影响最大,在柔性膜边界下的峰值强度受加载速率的增加影响最小。同一加载条件下,岩样在柔性膜边界下的残余强度大于在其它2种边界下的残余强度,这主要存在2个原因:一是由于根据柔性膜伺服理论计算出的柔性膜表面积略大于实际的柔性膜边界表面积,造成岩样在柔性膜边界下所受的实际围压大于设定的目标围压,尤其是目标围压越大的情况下,岩样所受的实际围压与目标围压差距越大;二是由柔性膜边界中的膜颗粒本身具有质量,对岩样形成了端部约束^[14]。因此相对比其他两种边界下的岩样,岩样在柔性膜边界下的峰值应力易受围压影响且残余强度普遍大于其他两种边界下岩样的残余强度。同时发现在同一加载条件下,岩样在刚性边界下的峰值应力大于在Shell边界下的峰值应力,这一定程度上是由于刚性伺服函数的连续运行之间存在时间间隔以及刚性伺服函数确定围压值时所存在的误差造成的^[21]。

3.3 不同边界对岩样力学强度影响

根据图6中的数据绘制出3种边界下岩样峰值应力、弹性模量随加载速率变化的分布曲线,如图7、8所示。

从图7中可以看出3种边界下,随着围压的增加,不同加载速率下的岩样峰值应力均大幅增加,各力学参数之间与围压之间满足线性正相关关系。Shell边界下的岩样在加载速率为0.5 mm/s,围压为6 MPa时峰值应力为222 MPa,当围压增加到12、24 MPa时,峰值应力增加到289、415 MPa,增长了约30%、86%。而当加载速率增加到1.0、1.5 mm/s时,峰值应力增加到239、253 MPa,增长了约7.6%、13.9%。柔性膜边界下的岩样在速率为0.5 mm/s,围压为6 MPa时,其峰值应力为232 MPa,当围压增加到12、24 MPa时,峰值应力增加到352、575 MPa,增长了约51%、147.8%,而当加载速率增加到1.0、1.5 mm/s时,峰值应力增加到242、254 MPa,增长了约4.3%、9.5%。刚性边界下的岩样在速率为0.5 mm/s,围压为6 MPa时,其峰值应力为270 MPa,当围压增加到12、24 MPa时,刚性边界下岩样的峰值应力增加到331、447 MPa,增长了约22.6%、65.6%,而当加载速率增加到1.0、1.5 mm/s时,峰值应力增加到293、318 MPa,增长了约8.5%、17.8%。对比发现,对于3种边界下岩样

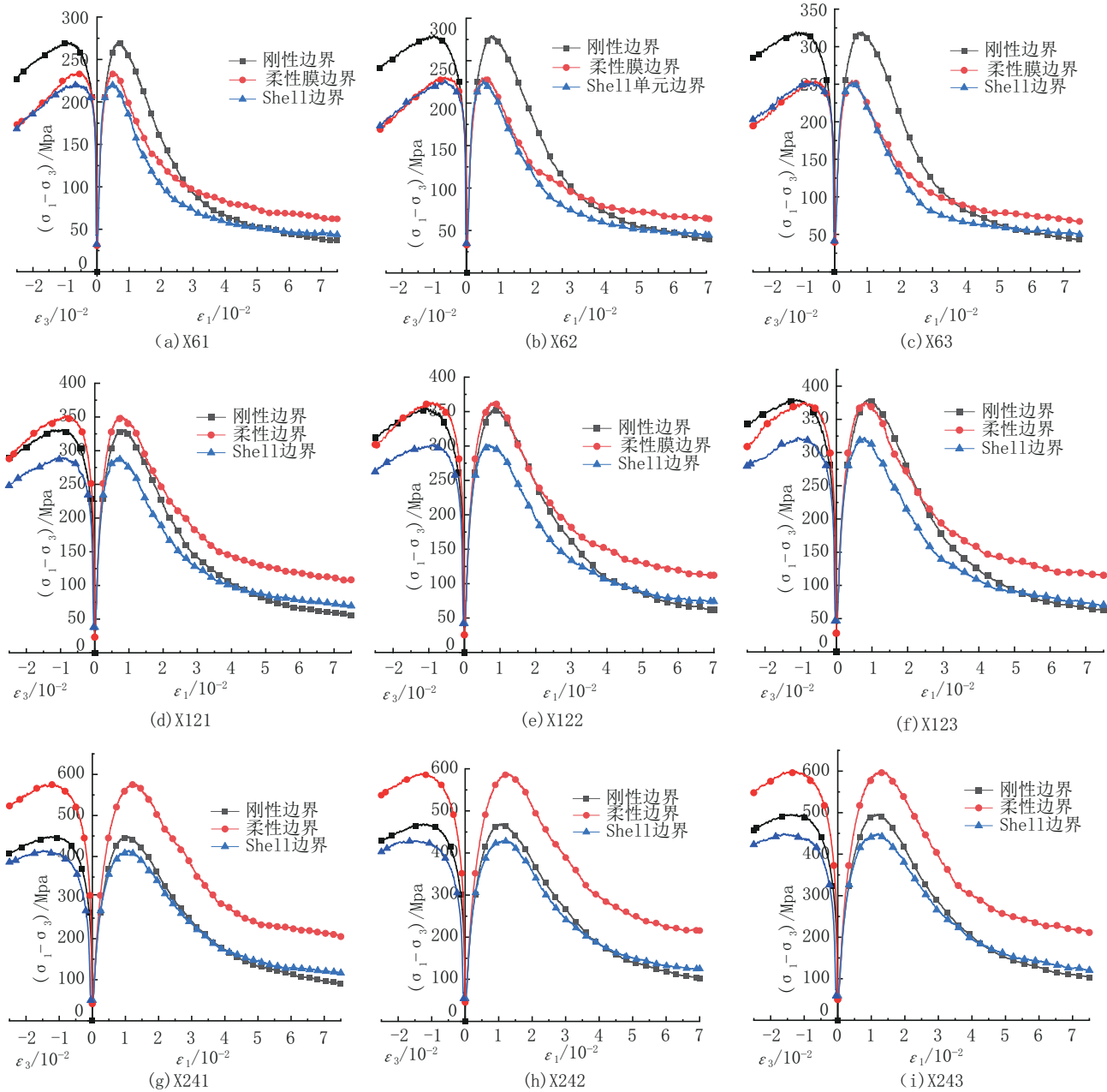


图6 3种边界下不同围压及加载速率下试样应力-应变曲线

Fig. 6 Axial and radial stress vs strain curves under three boundaries at different confining pressure and loading velocity

的峰值应力而言,由围压效应造成的影响大于由加载效应造成的影响,其中柔性膜边界下岩样的峰值应力受所受围压影响最大,刚性边界下岩样的峰值应力受加载速率影响最大。

从图8中可以看出,3种边界下岩样的弹性模量都随着围压或者加载速率的增加而增加,但增长幅度不大,其中Shell边界下岩样的弹性模量受加载速率影响较大,柔性膜边界和刚性边界下岩样的弹性模量受围压影响较大。

3.4 岩样力链分布

荷载在试样通过颗粒间的接触力链传递,分析接触力链可从细观角度上对比分析不同边界对岩样三轴压缩实验的影响,因此绘制出3种边界下岩样在轴应变(7%)的接触力链图,如图9所示,其中线条粗细代表接触力链强度大小。

从图9可知,岩样破坏后在不同边界下的力链强度、力链位置分布均存在差异。对于同一加载条件下的岩样,刚性边界下岩样在边界接触处存在一

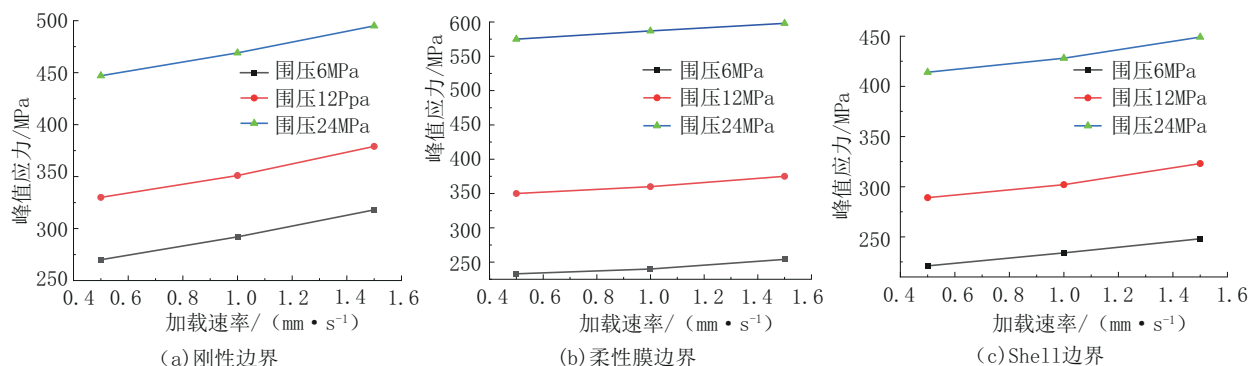


图7 三种边界下岩样峰值应力与加载速率关系

Fig. 7 Relationship between peak stress and loading rate of rock samples under three boundaries

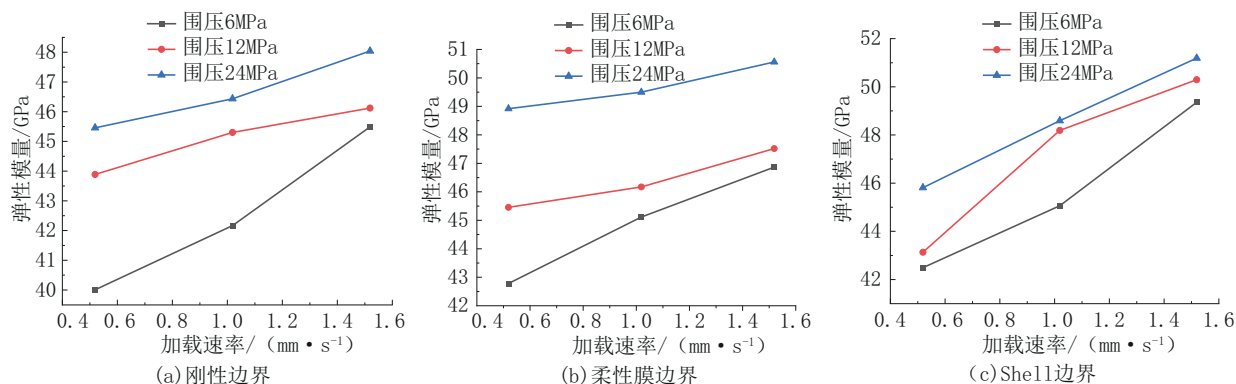


图8 三种边界下岩样弹性模量与加载速率关系

Fig. 8 Relationship between elastic modulus and loading rate of rock samples under three boundaries

条强度远大于其他接触力链的接触力链,这说明此时岩样在刚性边界下已经发生了应力集中现象,而Shell边界下岩样则未出现此情况。而对于Shell边界下岩样,其接触力链强度较为均匀,较少出现个别接触力链强度远大于其他接触力链强度的现象。

4 结论

本文使用颗粒程序研究了刚性、柔性膜、“Shell”3种边界对模拟花岗岩常规三轴试验的影响。针对3种边界下花岗岩的宏观破坏形态和应力应变关系、力链分布等模拟结果进行了分析。通过本文研究,得出结论如下:

(1)边界影响岩样的加载效应和围压效应。岩样在不同边界下,其受到加载速率和围压的影响程度不同,从上面的三轴模拟实验中可以看出,相同围压下,刚性边界下岩样的峰值应力易受加载速率的影响,相同加载速率下,柔性膜边界下岩样的峰值应力受围压影响最大。

(2)边界对岩样的破坏变形有显著影响。从图

4、图9中可知,柔性膜和Shell边界下的岩样会发生横向不均匀膨胀破坏,与花岗岩室内实验现象相符,而刚性边界下的岩样整体上呈现整体压缩破坏,不太符合花岗岩室内实验现象。

(3)刚性边界和柔性膜边界在三轴加载过程中无法对岩样施加精准且稳定的围压。其中刚性边界由于刚性伺服函数的连续运行之间存在时间间隔以及刚性伺服函数确定实际围压值时所存在的细小误差,导致岩样在刚性边界下无法获得稳定的围压。而柔性膜边界在三轴加载过程中根据柔性膜伺服理论计算出的柔性膜表面积略大于实际的柔性膜边界表面积,导致岩样在柔性膜边界下所受的实际围压大于目标围压,所以岩样在柔性膜边界下的峰值应力易受目标围压影响且残余强度普遍大于其他2种边界下岩样的残余强度。

(4)刚性边界对岩样在三轴加载过程中应力集中现象的产生具有影响。从图9中可知,岩样在刚性边界下发生应力集中的概率较大,这是由于对于Shell边界和柔性膜边界而言,二者在力学性质上具

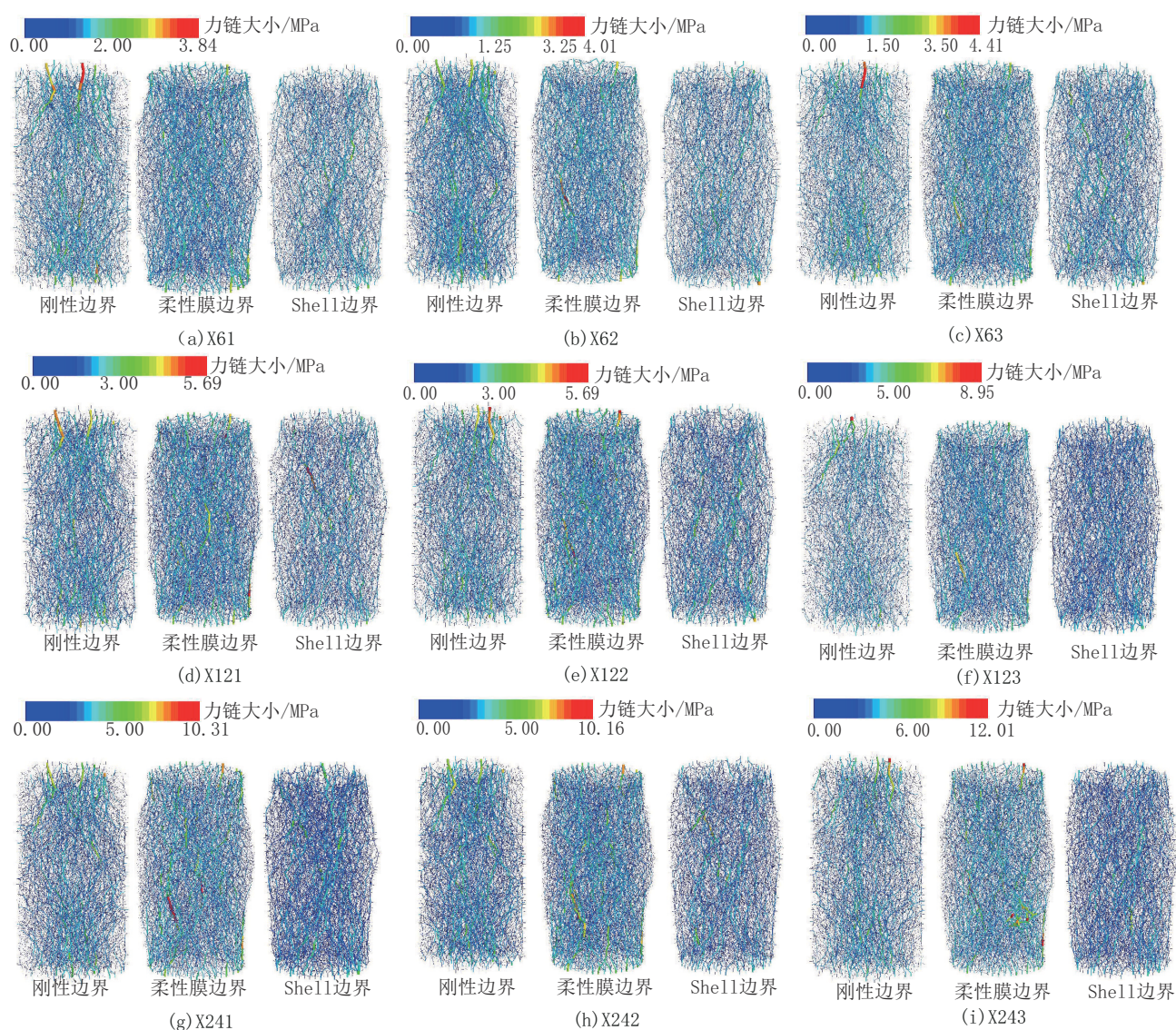


图9 3种边界下岩样接触力链图(轴应变为7%)

Fig. 9 Contact force chain of rock samples under three boundaries($\varepsilon_1 = 7\%$)

有6个自由度,而刚性边界由于其伺服机制,其在力学性质只具有一个自由度,因此相对于其他2种边界,岩样在刚性边界下发生应力集中的概率较大。

综合对比刚性边界、柔性膜边界和Shell边界,发现在Shell边界下,岩样围压施加简单精准且在加载过程中其所受围压恒定不变,应力集中发生概率较小,因此在花岗岩离散元常规三轴模拟时,Shell边界是合适的选择。

参考文献(References):

- [1] 杨达,陈宝义,曹宏宇,等.基于冲击载荷的硬质合金球齿碎岩机理研究[J].钻探工程,2022,49(1):142-152.
YANG Da, CHEN Baoyi, CAO Hongyu, et al. Study on rock fragmentation mechanism of carbide spherical teeth based on impact load[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1): 142-152.
- [2] 汤凤林, Нескоромных В. В., 宁伏龙,等.金刚石钻进岩石破碎过程及其与规程参数关系的研究[J].钻探工程,2021,48(10):43-55.
TANG Fenglin, NESKOROMNYH V. V., NING Fulong, et al. Research on the rock fragmentation process and its relationship with drilling parameters in diamond drilling[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(10): 43-55.
- [3] 张程,赵大军,张书磊,等.基于岩石表面位移场的超声波振动下花岗岩损伤特性试验研究[J].钻探工程,2021,48(3):39-45.
ZHANG Cheng, ZHAO Dajun, ZHANG Shulei, et al. Experimental study on damage characteristics of granite under ultrasonic vibration based on the displacement field of the rock surface[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(3): 39-45.
- [4] Li X F, Li H B, Zhao J. 3D polycrystalline discrete element

- method (3PDEM) for simulation of crack initiation and propagation in granular rock[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 90: 96-112.
- [5] Chen Q, Zhang C, Yang C, et al. Effect of fine-grained dipping interlayers on mechanical behavior of tailings using discrete element method [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2019, 104: 288-299.
- [6] Tang C. Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(2): 249-261.
- [7] Li H, Yang C, Ding X, et al. Weibull linear parallel bond model (WLPBM) for simulating micro-mechanical characteristics of heterogeneous rocks[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2019, 108: 82-94.
- [8] 李博, 朱强, 张丰收, 等. 基于矿物晶体模型的非均质性岩石双裂纹扩展规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(6): 1119-1131.
- LI Bo, ZHU Qiang, ZHANG Fengshou, et al. Influence of meso-structure heterogeneity on granite strength and deformation with particle flow code[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(6): 1119-1131.
- [9] 胡训健, 卞康, 谢正勇, 等. 细观结构的非均质性对花岗岩强度及变形影响的颗粒流模拟[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(8): 1540-1548.
- HU Xunjian, BIAN Kang, XIE Zhengyong, et al. Numerical simulation of large-scale triaxial tests on soil-rock mixture using DEM with three-dimensional flexible membrane boundary [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(8): 1540-1548.
- [10] 金磊, 曾亚武. 基于三维柔性薄膜边界的土石混合体大型三轴试验颗粒离散元模拟[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(12): 2296-2304.
- JIN Lei, ZENG Yawu. Numerical simulation of large-scale triaxial tests on soil-rock mixture using DEM with three-dimensional flexible membrane boundary[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(12): 2296-2304.
- [11] Xu Wenjie, Hu Liming, Gao W. Random generation of the meso-structure of a soil-rock mixture and its application in the study of the mechanical behavior in a landslide dam[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 86: 166-178.
- [12] Cheung G, O'Sullivan C. Effective simulation of flexible lateral boundaries in two- and three-dimensional DEM simulations [J]. Particulate, 2008, 6(6): 483-500.
- [13] Thomas P A, Bray J D. Capturing nonspherical shape of granular media with disk clusters [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(3): 169-178.
- [14] Qu T, Feng Y T, Wang Y, et al. Discrete element modelling of flexible membrane boundaries for triaxial tests [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 115: 103-154.
- [15] 张涛, 蔚立元, 鞠明和, 等. 基于 PFC3D-GBM 的晶体-单元体尺寸比对花岗岩动态拉伸特性影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(3): 28-38.
- ZHANG Tao, WEI Liyuan, JU Minghe, et al. Study on the effect of grain size-particle size ratio on the dynamic tensile properties of granite based on PFC3D-GBM [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 41(3): 28-38.
- [16] 刘静, 李江腾. 基于颗粒流的大理岩三轴循环加卸载细观损伤特性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(11): 2797-2803.
- LIU Jing, LI Jiangteng. Analysis on meso-damage characteristics of marble under triaxial cyclic loading and unloading based on particle flow simulation[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(11): 2797-2803.
- [17] HE Pengfei, KULATILAKE P H S W, YANG Xuxu, et al. Detailed comparison of nine intact rock failure criteria using polyaxial intact coal strength data obtained through PFC3D simulations[J]. Acta Geotechnica, 2018, 13(2): 419-445.
- [18] PARK B, MIN K B. Bonded-particle discrete element modeling of mechanical behavior of transversely isotropic rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2015, 76: 243-255.
- [19] Lu Z, Yao A, Su A, et al. Re-recognizing the impact of particle shape on physical and mechanical properties of sandy soils: A numerical study[J]. Engineering Geology, 2019, 253: 36-46.
- [20] Ding X, Zhang L, Zhu H, et al. Effect of model scale and particle size distribution on PFC3D simulation results[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(6): 2139-2156.
- [21] 毛海涛, 黄海均, 严新军, 等. 非饱和紫色土三轴试验颗粒流宏观细观参数关系研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(3): 711-723.
- MAO Haitao, HUANG Haijun, YAN Xinjun, et al. Numerical study on macroscopic and microscopic parameters of particle flow in unsaturated purple soil triaxial test[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(3): 711-723.
- [22] 蒋成龙, 许成顺, 张小玲, 等. 三维柔性边界构建方法及其对砾质土变形发展影响的离散元数值研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(5): 77-86.
- JIANG Chenglong, XU Chengshun, ZHANG Xiaoling, et al. Three-dimensional flexible boundary construction method and its influence on the deformation development of gravel soil by discrete element simulation[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(5): 77-86.
- [23] Shivakumar P N, Sivakumar K C. A review of infinite matrices and their applications[J]. Linear Algebra and its Applications, 2009, 430(4): 976-998.
- [24] 甘霖. 循环应力-温度作用下花岗岩常规三轴力学行为研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- GAN Lin. Study on conventional triaxial mechanical behavior of granite tender [D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [25] MARTIN C D. The effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(5): 698-725.

(编辑 王文)