

使用颗粒流方法研究单轴压缩条件下 石灰岩中的荷载传递机理

曹诗谈,徐金明

(上海大学土木工程系,上海 200072)

摘要: 研究荷载在岩石中的传递机理对岩石工程性质研究具有重要意义。本文以石灰岩试样为例,使用颗粒流方法来研究这一传递机理。研究试样大小为 50 mm × 50 mm,岩石成分使用圆盘颗粒集合体来表征,颗粒间的接触模型采用平行连接模型,岩石的弹性模量、峰值应力和泊松比分别为 44.24 GPa、101.05 MPa 和 0.267;将大于平均接触力的力链作为强力链,得到了外部荷载下试样中的强力链分布情况,研究了试样局部孔隙率、配位数等细观参数对接触力大小的影响,探讨了颗粒摩擦系数不同时外荷达到峰值应力后颗粒的接触力分布情况。结果表明,在全部颗粒接触点中,只有 19.8% 接触点的接触力大于平均接触力,但这些接触点应变能却占总应变能的 75%;当法向接触力与切向接触力比值大于 3.5 时,试样峰后应力主要由法向接触力控制;与样品破坏前相比,破坏后样品中的局部孔隙率变化不大,只减少了 0.002。

关键词: 石灰岩;荷载传递;应力分布;细观参数

中图分类号: TU458+.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2012)06-0057-05

颗粒流方法是一种离散元法,可以用于分析不连续材料的变形破坏过程。这一方法中,岩石颗粒通常使用圆盘来表征,模拟过程通常使用二维颗粒流程序 PFC2D(Particle Flow Code in 2-dimension, PFC2D)来实现^[1]。近年来,一些学者使用颗粒流方法对岩石变形过程进行了研究。

毕忠伟等^[2]用 PFC2D 模拟了双轴压缩条件下颗粒流体系中剪切带的形成和演变过程;韩永臣^[3]通过建立三维不规则模型模拟了岩石材料的脆性破裂过程;谢和平等^[4]从细观角度研究了岩体单元能量耗散与岩体单元损伤的关系、岩体单元内可释放应变能与岩体单元破坏的关系;展国伟等^[5]使用岩石破裂过程分析系统对不同界面模型进行了数值模拟;孙其诚等^[6]从接触力、能量分布和接触网络结构特点出发,提出了强力链的判定标准;Goldenberg 等^[7]使用不同模型来表征不同尺度的颗粒体系并分析了颗粒体系中的应力分布;Tordesillas 等^[8]使用复杂网络方法研究

了密集颗粒体系力链结构的演化特征;Mueth 等^[9]分析了单轴压缩下法向接触力分布与试样试验阶段和边界条件的关系;Alison 等^[10]用离散元方法模拟了颗粒材料内部接触力与力链结构的分布特点;Potyondy 等^[11]模拟了压缩荷载作用下闪长岩中空洞附近的损伤分布情况;Besuelle 等^[12]使用三轴试验研究了多孔砂岩内的局部化特征;Diederichs 等^[13]使用离散元数值模拟得到了旋转压力情况下硬岩表面裂纹的萌生发展情况。

虽然岩石变形破坏过程反映了外部荷载在岩石中的传递情况,但直接将岩石颗粒作为研究对象来探讨这一传递机理的成果还不多。本文拟采用 PFC2D 来模拟石灰岩室内单轴压缩试验,分析不同外部荷载作用下试样中的接触力大小、力链分布、孔隙率和配位数等细观参数的变化情况,研究外部荷载在试样中的传递特点。

1 试验数据

本次研究使用二维颗粒流代码 PFC2D 研究单轴压缩下石灰岩中的荷载传递机理。细观参数和宏观参数按照徐金明等^[14]的方法进行设置。试验模拟参数见表 1。根据表 1 得到单轴压缩条件下的石灰岩模型(图 1)。图 1 中共有 9 447 个颗粒。

收稿日期: 2012-03-28; 修订日期: 2012-04-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40972191)

作者简介: 曹诗谈(1987-),男,硕士研究生,主要从事岩土工程的科研工作。

E-mail: caoshitan@163.com

表1 模拟时选取的细观参数

Table 1 Micro-parameters in simulation

参数	数值
试样高度(mm)	50
试样宽度(mm)	50
颗粒半径比值	1.66
最小半径(mm)	0.2
密度(kg/m ³)	2630
颗粒接触模量(Pa)	37 × 10 ⁹
颗粒法向与切向接触刚度比	2.46
摩擦系数	0.5
平行连接模量(Pa)	37 × 10 ⁹
平行连接刚度比	2.46
平均法向平行连接强度(Pa)	77 × 10 ⁶
法向平行连接强度标准差(Pa)	10 × 10 ⁶
平均切向平行连接强度(Pa)	77 × 10 ⁶
切向平行连接强度标准差(Pa)	10 × 10 ⁶

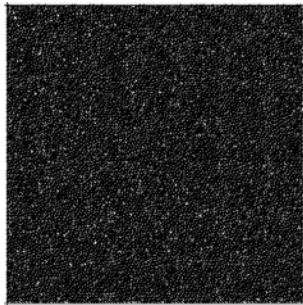


图1 颗粒分布图

Fig. 1 Distribution of grains

2 石灰岩中荷载传递机理分析

下面根据数值模拟结果,研究不同荷载下试样中接触力变化、强接触力链所占比例、孔隙率和配位数的变化,探讨石灰岩中的荷载传递机理。

2.1 不同加载时段接触力的变化情况

(1) 石灰岩破坏前接触力的变化情况

由模拟结果可知,切向接触力只有3个不为零(分别为1.08 kPa、2.70 kPa、2.06 kPa),其余均为零。因此,可从Y方向(竖直方向)的应力变化情况分析外部荷载在石灰岩中的传递机理。

试样中布置了25个测试圆,测试圆半径为5mm。图2是外荷载为2784kN和3925kN时的Y向应力等值线图。

由图2(a)可以看出,当荷载为2784kN时,试样Y向应力最大值为55MPa,位于试样的顶部和底部;试样左上角和右上角Y向应力较小(<40MPa)。由图2(b)可以看出,当荷载增加到3925kN时,试样的Y

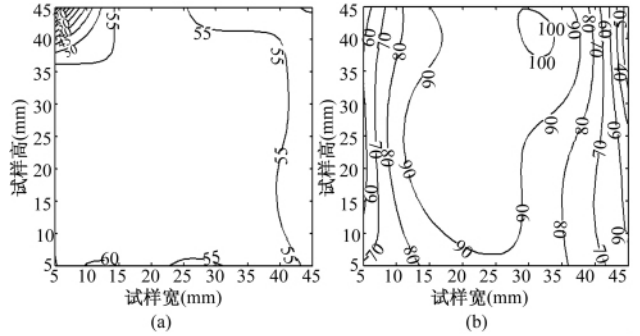


图2 加载2784 kN时(a)和3925 kN时(b) Y向应力

Fig. 2 Stress in Y direction under loading stages of 2784kN (a) and 3925kN (b)

向应力最大值达到100 MPa、最小值为50 MPa,应力值大于70 MPa的区域超过90%。对于该区域,大于均值(85MPa)的试样区域处于中间的竖条区域,这说明外部荷载主要是由该区域颗粒来承担。

(2) 石灰岩破坏后的接触力分布情况

将颗粒连接强度全部设为零、摩擦系数设为0.5、试验终止标准系数α(偏差应力与最大偏差应力比值小于α时试验终止)取0.4,其他参数取自表1中。通过模拟,可以得到法向接触力和切向接触力分布图(图3)。

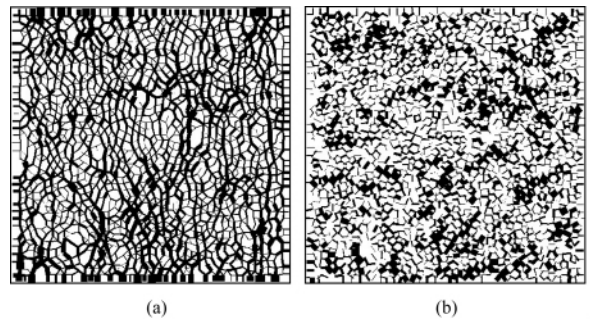


图3 石灰岩破坏后的法向(a)和切向(b)接触力分布图

Fig. 3 Distributions of normal contact force (a) and shear contact force chains (b) after failure

图3表明,石灰岩破坏后,岩石颗粒之间不仅有切向接触力,还有法向接触力。法向接触力最大值和平均值分别为0.625 MPa和0.068 MPa,切向接触力最大值和平均值分别为0.150 MPa和0.012 MPa。从图3(a)可以看出,法向接触力链方向与加载方向是一致的。由于最大法向接触力与切向接触力比值为4.167(0.625/0.150=4.167)。因此,法向接触力决定了石灰岩的峰后应力大小。岩石破坏后,外部荷载主要由法向接触力来传递。

为了研究石灰岩破坏以后的接触力大小,分别选

取摩擦系数为 0.1、0.3、0.7、0.9,得到了法向接触力最大值、切向接触最大值和平均接触力(表 2)。

表 2 不同摩擦系数下的接触力对比

Table 2 Contact forces under various frictional coefficients

接触力 (MPa)	摩擦系数			
	0.1	0.3	0.7	0.9
法向	0.562	0.609	0.631	0.640
切向	0.051	0.130	0.162	0.162
均值	0.105	0.111	0.115	0.116

从表 2 可以看出,摩擦系数发生变化后,法向接触力与切向接触力比值一直大于 3.5,且法向接触力大小保持在 0.6 MPa 左右;切向接触力开始是随摩擦系数增大而增大;当摩擦系数增大到 0.7 后,切向接触力不再增加,而是在 0.162 MPa 左右。因此,当法向接触力与切向接触力比值大于 3.5 时,决定石灰岩破坏后应力大小并传递主要荷载的接触力仍然是法向接触力。

2.2 外荷作用下的强接触力链分布

本次研究采用孙其诚等^[6]的方法来计算强力链。孙其诚等认为,由于大于平均力的接触力链与体系宏观性质直接相关,且占据了绝大部分能量,可以将接触力大于平均力的力链定义为强力链,反之定义为弱力链。

表 3 是不同大小范围内法向接触力的个数,图 4 为相应的总力链分布图与强力链分布图。从表 3 可以看出,接触力总数为 18 225 个,绝大多数(14 111 个)接触力大小为 0~0.025 MPa,4 114 个接触力为零。虽然有 588 个接触力大于 0.025 MPa,但考虑到数据的代表性,本文仅选大小为 0~0.025 MPa 的接触力来计算平均接触力。据此得到平均接触力为 0.012 5 MPa, >0.012 5 MPa 的接触力所占比例为 19.8% (2800/14111=0.198)。虽然这一比例较小,但这些接触力应变能之和却占到总应变能的 75%。

表 3 不同大小范围内法向接触力的个数

Table 3 Number of normal contact force of various intervals

接触力(MPa)	接触力数目	比例(%)	所占应变能(%)
0.000~0.0125	11311	80.2	19
0.0126~0.025	2800	19.8	75
0.026~0.050	523	/	5
0.051~0.075	48	/	1
0.076~0.100	12	/	/
0.101~0.125	5	/	/
0.126~0.150	1	/	/
0.151~0.175	0	/	/
0.176~0.200	1	/	/

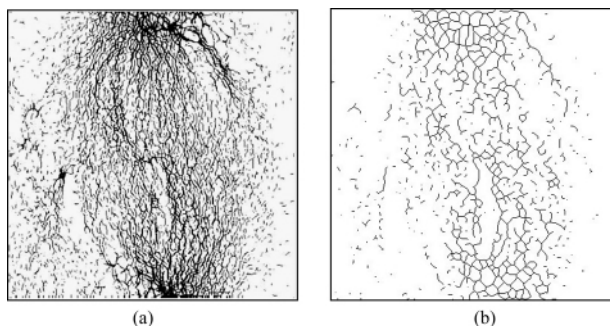


图 4 总力链(a)与强力链(b)分布对比图

Fig. 4 Comparison of total contact force chains (a) and strong contact force chains (b)

2.3 外荷不同时的细观参数变化情况

(1) 外载不同时试样中的孔隙率变化情况

如前所述,颗粒间切向接触力只有 3 个不为零,其余均为零,与法向接触力大小相比,切向接触力相比可忽略不计。因此,下面仅考虑法向接触力的情况,而平均法向接触力 N 与孔隙率 e 和颗粒平均直径 d 有关^[15]:

$$N = \sigma' d^2 [\pi(1 + e)^2 / 12] \quad (1)$$

式中: N ——平均法向接触力;

e ——孔隙率;

d ——颗粒平均直径;

σ' ——有效应力。

图 5 是外荷载 2 784kN 和 3 925kN 时的孔隙率等值线图。由图 5(a) 可以看出,外荷 2 784kN 时,最小孔隙率在试样中部偏下(0.157)和右上部(0.156~0.157)位置,最大孔隙率位于试样的右上角(0.162~0.163),试样剩余部分的孔隙率维持在 0.159~0.161 范围内。由图 5(b) 看出,当荷载增加到 3 925 kN 时,最小孔隙率减小到 0.156,同样位于试样的中部偏下位置和右上部,孔隙率在右上角达到最大值,在 0.166~0.17 之间。试样右侧平均孔隙率从 0.160 变化到 0.158。

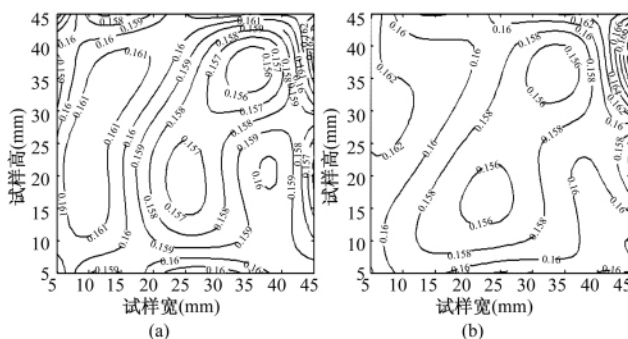


图 5 加载 2 784kN 时(a)和 3 925kN 时(b)的孔隙率

Fig. 5 Porosity under loading stages of 2 784kN (a) and 3 925kN (b)

(2) 不同加载时段试样配位数的变化情况

配位数是试样中颗粒的平均接触数。图6是外荷2 784kN和3 925kN时试样配位数的等值线图。由图6(a)看出,荷载2 784kN时,最大配位数3.25,位于试样的顶部和底部位置,剩余部分的配位数在3.0~3.1之间。由图6(b)看出,当荷载增加到3 925kN时,最大配位数为3.5,位于右上部,同时在试样中心偏左位置,配位数为3.4,最小配位数(2.9)位于试样左下角和右侧。

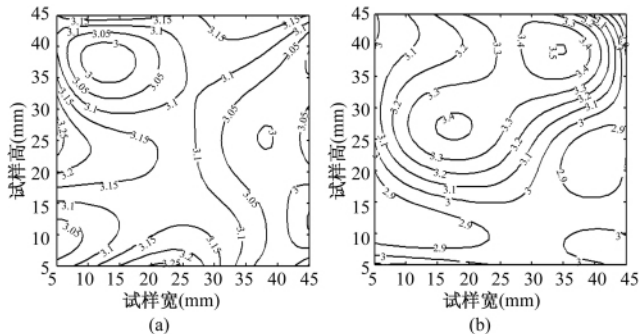


图6 加载2 784kN时(a)和3 925kN时(b)的配位数
Fig. 6 Coordination number under loading stages of 2 784kN (a) and 3 925kN (b)

由图5和图6可以看出,荷载从2 784kN增加到3 925kN,石灰岩孔隙率和配位数的变化很小,孔隙率均值从0.160减小到0.158,试样配位数均值从3.1增加到3.2。根据式(1)可知,尽管荷载增加了1 141kN,但平均接触力变化很小。

3 结论

(1) 通过选取50 mm × 50 mm的石灰岩试样进行单轴压缩试验的PFC模拟,由结果可知Y方向应力较大值(大于平均值85 MPa,在85~100 MPa)位于顶部加载位置的中下方,试样两侧的应力小于应力平均值85 MPa。

(2) 选取大小为0~0.025 MPa的接触力来计算平均接触力。由模拟结果可知,石灰岩试样的最大法向接触力和平均法向接触力分别为0.025 MPa和0.125 MPa,只有19.8%接触力大于平均值,但是这些接触力的应变能却占到总应变能的75%。

(3) 在峰后荷载传递过程中,随着摩擦系数增大,法向接触力一直保持在0.6 MPa左右;切向接触力先随着摩擦系数的增大而增大,当摩擦系数达到0.7后,切向接触力维持在0.162 MPa左右而不再增加;法向接触力与切向接触力比值大于3.5。因此,决定石灰

岩破坏后的应力是法向接触力,外部荷载主要由法向接触力传递。

(4) 在外部荷载作用下,孔隙率和配位数也在不断变化。外荷从2 784kN增加到3 925kN时,平均孔隙率从0.160减少到0.158,平均配位数从3.1增加到3.2。

参考文献:

- [1] PFC2D (Particle Flow Code in 2 Dimensions). Version 3.1 [M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group; 1999.
- [2] 毕忠伟,孙其诚,刘建国,等. 双轴压缩下颗粒物质剪切带的形成与发展[J]. 物理学报, 2011, 60(3): 376-385. [BI Z W, SUN Q C, LIU J G, et al. Development of shear band in a granular material in biaxial tests [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(3): 376-385. (in Chinese)]
- [3] 韩永臣,刘晓宇,李世海. 模拟岩石材料脆性破坏过程的三维离散元模型[J]. 力学与实践, 2010, 32(3): 50-56. [HAN Y C, LIU X Y, LI S H. Discrete element modeling of brittle failure process of rock materials [J]. Mechanics in Engineering, 2010, 32(3): 50-56. (in Chinese)]
- [4] 谢和平,鞠杨,黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 27(7): 3003-3010. [XIE H P, JU Y, LI L Y. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 27(7): 3003-3010. (in Chinese)]
- [5] 展国伟,夏玉成,杨创奇. 岩石裂纹扩展机理分析模型与应用[J]. 黑龙江科技学院学报, 2006, 16(4): 227-230. [ZHAN G W, XIA Y C, YANG C Q. Crack growth mechanism and its controlling effects in ground subsidence [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science and Technology, 2006, 16(4): 227-230. (in Chinese)]
- [6] 孙其诚,金峰,王光谦,等. 二维颗粒体系单轴压缩形成的力链结构[J]. 物理学报, 2010, 59(1): 31-38. [SUN Q C, JIN F, WANG G Q, et al. Force chains in a uniaxially compressed static granular matter in 2 dimensions [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(1): 31-38. (in Chinese)]
- [7] GOLDENBERG C, GOLDBIRSCHE I. Force chains, micro-elasticity and macro-elasticity [J]. Physical

- Review Letters ,2002 ,89: 084302.
- [8] TORDESILLAS A , WALKER D M , Lin Q. Force cycles and force chains [J]. Physical Review E , 2010 ,81: 011302.
- [9] MUETH D M , JAEGER H M , NAGEL S R. Force distribution in a granular medium [J]. Physical Review E ,1998 ,57: 3164 – 3169.
- [10] ALISON O , BRUCE H , KLAUS R. Shear band emergence in granular materials—A numerical study [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics ,2007 ,37(3) : 373 – 393.
- [11] POTYONDY D , AUTIO J. Bonded-particle simulations of the in situ failure test at Olkiluoto [C]//Rock Mechanics in the National Interest: Proceedings of the 38th US Rock Mechanics Symposium. Washington D C ,2001: 1553 – 1560.
- [12] BESUELLE P , DESRUES J , RAYNAUD S. Experimental characterization of the localization phenomenon inside a Vosges sandstone in a triaxial cell [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences ,2000 ,37(8) : 1223 – 1237.
- [13] DIEDERICHS M S , KAISER P K , EBERHARDT E. Damage initiation and propagation in hard rock during tunneling and the influence of near-face stress rotation [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences ,2004 ,41: 785 – 812.
- [14] 徐金明,谢芝蕾,贾海涛. 石灰岩细观力学特性的颗粒流模拟[J]. 岩土力学,2010,31(增2): 390 – 395. [XU J M , XIE Z L , JIA H T. Simulation of micromechanical properties of limestone using particle flow code [J]. Rock and Soil Mechanics ,2010 ,31 (s2) : 390 – 395. (in Chinese)]
- [15] SANTAMARINA J C. Soil behavior at the micro-scale: Particle forces [C]//Proc Symposium Soil Behavior and Soft Ground Construction , in Honor of Charles C Ladd , MIT ,2001: 1 – 32.

Load transfer mechanism of limestone under uniaxial compression using the particle flow method

CAO Shi-tan , XU Jin-ming

(Department of Civil Engineering , Shanghai University , Shanghai 200072 , China)

Abstract: The load transfer mechanism in rock is of great importance for investigating the engineering properties of rock materials. The particle flow method was used to simulate the load transfer mechanism in this study. Taking a limestone sample with the size of 50 mm × 50 mm as an example , the particles of rock were characterized with circular discs and the parallel bond model was adopted to simulate the linkages among the particles. Results of the uniaxial compression test indicate that the elastic modulus , peak stress and Poisson's ratio of the specimen are 44.24 GPa , 101.05 MPa and 0.267 , respectively. The force chains larger than the mean contact force were defined as the strong force chains , and the distributions of the strong force chains in the sample were thereafter obtained under the uniaxial compression conditions. The local micro-parameters , such as porosity and coordination number , were also examined. The distributions of the contact forces in the sample under various friction coefficients after reaching peak stress were taken into account. The results show that the strong contact forces were 19.8 percentages of all forces but took 75 percentages of the strain energy in the sample; the ratios of the normal to shear contact forces were larger than 3.5 , the normal contact forces dominated all of the stresses in the limestone; the local porosity of the sample after failure varied quite little with a decrease of only 0.002. This paper may be used as references in investigating the microscopic mechanism of the deformation and failure of rock materials under external load.

Key words: limestone; load transfer; stress distribution; micro-parameter

责任编辑:张明霞