

基于细观组分实际分布的花岗岩宏细观参数关系

徐金明¹, 黄大勇^{1,2}, 朱洪昌¹

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200444; 2. 常州工程职业技术学院 土木工程系, 江苏 常州 213164)

摘要: 岩石通常由不同细观组分组成, 细观组分的类型与相互作用决定了岩石的宏观力学性质。以北山花岗岩为例, 使用室内试验视频和阈值分割技术确定细观组分的类别与位置, 将细观组分颗粒和胶结物分别用圆盘和平行黏结来表征, 细观力学性质使用颗粒力学性质参数(弹性模量、刚度比、摩擦因数)和平行黏结力学性质参数(弹性模量、刚度比、法向强度均值、切向强度均值)7 个指标来表征, 宏观力学性质使用弹性模量、泊松比、峰值应力 3 个指标来表征, 使用颗粒流代码、像素和颗粒循环技术, 建立考虑细观组分实际分布的颗粒流模型, 进行 7 因素、4 水平的 32 次正交数值模拟试验, 研究宏观细观力学性质关系和细观力学性质参数的调整方法。结果表明, 数字图像处理技术可以有效用于建立基于细观组分实际分布的颗粒流模型; 宏观弹性模量-细观弹性模量、宏观泊松比-细观刚度比、宏观峰值应力-细观强度具有很好的对应关系; 宏观弹性模量、泊松比、刚度比有较好的相关关系。由于细观组分的实际分布与力学特点控制了岩石的变形破坏过程, 研究成果对估计岩石细观力学参数、预测宏观力学性状具有一定的参考价值。

关键词: 岩石力学; 花岗岩; 实际分布; 颗粒流模型; 宏细观参数关系

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2016)增 1-2635-09

Relations between macro- and meso-scopic mechanical parameters of granite based on actual distributions of mesocompositions

XU Jinming¹, HUANG Dayong^{1,2}, ZHU Hongchang¹

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Department of Civil Engineering, Changzhou Institute of Engineering Technology, Changzhou, Jiangsu 213164, China)

Abstract: Rock is generally composed of various meso-compositions. The type and interaction between these compositions may affect the macro mechanical properties. Taking the Beishan granite as an example, the video images photographed during the laboratory test and the threshold segmentation technique were used to determine the actual types and locations of the various compositions. The particles and cements of the compositions were then assumed as disks and parallel bonds in simulation. The meso-scale mechanical properties were characterized with seven parameters, including the elasticity modulus, stiffness ratio and frictional coefficient of the particles, and the elasticity modulus, stiffness ratio, average normal and tangential strengths of parallel bonds. Macro-scale mechanical properties were characterized with three parameters, including the elasticity modulus, Poisson's ratio, and peak stress of the specimen. The particle flow code and the pixel and particle loops were combined to establish the particle flow model based on the actual compositions. Thirty-two orthogonal simulation tests were then conducted using the seven meso-mechanical parameters in a four level. The macro-meso mechanical relations and the adjustment method in calibrating the meso-mechanical parameters were thereafter proposed. It shows that the

收稿日期: 2014-10-27; **修回日期:** 2015-06-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41472254, 40972191)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 41472254 and 40972191)

作者简介: 徐金明(1963-), 男, 2003 年于同济大学岩土工程专业获博士学位, 现任教授, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: xjming@163.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.1448

digital image processing techniques may be efficiently used to develop a particle flow model reflecting the actual distributions of the multi-compositions; there are good agreements between the elasticity modulus-modulus, Poisson's ratio-stiffness ratio, and peak stress-strength respectively in the macro- and meso-scales. A good correlation exists in the elasticity modulus-stiffness ratio-Poisson's ratio in the macro- and meso-scales. Because the distributions and mechanical features of the meso-compositions control the deformation/failure process, the results presented herein may provide references both in determining the meso-parameters and in estimating the macro parameters of rock materials.

Key words : rock mechanics ; granite ; actual distribution ; particle flow model ; relation between macro-meso parameters

1 引言

岩石通常由不同细观组分组成(比如,花岗岩通常由石英、黑云母和长石组成)。细观组分的类别差异与物理力学性质,对宏观物理力学性质具有控制作用。岩石宏细观参数关系的研究,是分析岩石宏观变形破坏机制、预测岩石破坏过程的重要基础。

目前,研究岩土材料宏细观参数关系时,多使用室内试验结果和颗粒流方法来确定试样整体的宏细观参数关系。比如,D. O. Potyondy^[1]获得了 Lac du Bonnet 花岗岩的细观参数;徐金明等^[2]获得了石灰岩的主要细观力学参数;Y. M. Hsieh 等^[3]分析了砂岩细观组分含量与宏观力学特性之间的关系;包春燕等^[4]分析了非均质岩石裂纹间距对应力分布的影响;罗荣等^[5]研究了非均质岩石中矿物细胞元种类、含量、力学参数与宏观力学参数的关系;尹成薇等^[6]利用颗粒流软件、莫尔-库仑破坏准则,分析了砂土抗剪强度指标(黏聚力、内摩擦角)与颗粒摩擦角粒接触强度之间的关系;D. O. Potyondy 和 P. A. Cundall^[7]使用颗粒黏结模型,通过大量细观数值试验研究了 Lac du Bonnet 花岗岩的变形破坏过程;陈建峰等^[8]探讨了黏性土宏观强度指标(黏聚力、内摩擦角)与细观参数(颗粒接触强度、颗粒摩擦角)之间的关系;周喻等^[9]采用神经网络方法,通过建立宏观-细观力学参数的非线性模型来反演细观力学参数;史旦达等^[10]探讨了颗粒位移、旋转特征与剪切带演化的关系,认为试样剪切强度主要受控于粒间法向接触力的分布及其演化过程。

为了考虑试样细节对试样宏细观参数关系的影响,一些研究者使用数字图像处理技术(多采用二值化方法)提取材料的组成特征,进而研究宏细观参数关系。徐文杰等^[11]使用二值化方法研究了土石混合料的细观特性;丁秀丽等^[12]由二值化图像处理结果生成了土石混合体双轴压缩试验的颗粒流模型;周

基等^[13]使用特征聚类方法、链码边界跟踪和线段表算法分离不同成分,使用聚粒和圆盘单元建立了沥青混合料的离散元几何模型。

建立材料宏细观参数关系的基本内容是确定材料的细观几何模型和细观力学参数,决定于细观组分的具体类型和实际分布。现有成果中,细观组分类型和分布多进行概化处理,很少真正考虑组分的具体类型和实际分布、且难以真正考虑组分的相互作用;使用二值化图像处理方法区分不同组分也不适用于 3 种以上成分组成的岩石。本文拟以含有 3 种组分的甘肃北山花岗岩为例,根据室内单轴抗压强度试验资料和试验视频图像,使用数字图像处理技术确定细观组分的类型与分布,使用正交数值试验研究细观组分力学性质参数不同时的宏观力学性状,建立反映细观组分实际分布的宏细观参数关系。

2 颗粒流模型的建立

2.1 细观组分实际位置与类型的确定

试验所用花岗岩岩块取自甘肃北山。将岩块切割成 50 mm × 50 mm × 100 mm 大小的试块,在室内进行单轴抗压强度试验,使用佳能(Cannon)摄像机与 EOS Utility 设置、摄取整个加载过程的试验视频。取整个样本为研究区域、样本总像素数为 266×546。

首先根据室内岩石试验时拍摄的试验视频图像,使用抽取方法获得任一时刻的单帧图像,将原始彩色图像转化为灰度图像(见图 1),样本大小为 49.9 mm×99.9 mm(与 50 mm×100 mm 略有差异,是加工误差所致),使用灰度阈值分割得到不同成分的类型和分布:使用矿物鉴定方法和点选技术将黑云母、石英、长石的分界阈值定为 87, 202, 使用 8 连通方式获得任一组分的对象集,抽取对象集中每一对象所有像素在像素坐标系中的坐标,根据像素坐标系与物理坐标系关系计算像素坐标在颗粒流模拟时的对应坐标。据此得到花岗岩中黑云母、长石、

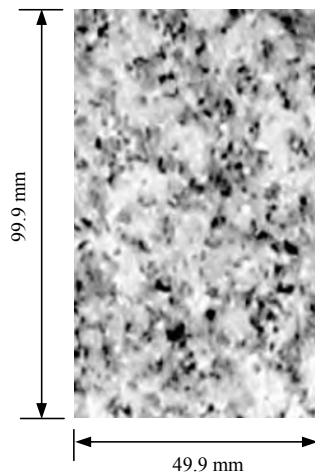


图 1 花岗岩图像外观图

Fig.1 A frame of granite specimen

石英的百分含量分别为 4.94%，60.49%，34.56%。

颗粒流模拟时，若考虑所有像素分布和类型，计算量过大。因此采用邻域平均与隔行抽取方法对灰度图像进行处理(邻域大小取为 3×3)。这种处理，既可以基本保持细观组分的实际分布、又可以大大降低计算工作量。

2.2 颗粒流模拟几何模型的建立

建立颗粒流模拟几何模型，主要包括确定颗粒大小、成分类型和实际位置。先采用成熟算法生成“虚拟”分布，再根据数字图像处理结果赋予实际分布和类型。

生成“虚拟”分布时，使用 Itasca 公司的二维颗粒流代码 PFC^{2D}(即 Particle Flow Code in 2 dimensions)、采用集成代码包 Augmented FishTank^[14]来实现。颗粒假设为圆盘，颗粒之间的接触(胶结物)以平行黏结来表征，所有颗粒随机生成，最小颗粒半径取为 $R_{\min} = 0.50 \text{ mm}$ ，取为粒径比 $R_{\max}/R_{\min} = 1.66$ ，颗粒密度取为 $\rho = 2630.0 \text{ kg/m}^3$ 。

根据数字图像处理结果赋予实际分布和类型时，颗粒类型使用颜色来标识、通过调用数字图像识别文件来实现：使用像素循环和颗粒循环，找出距像素附近最近的颗粒，该颗粒类型以对应像素的组分类型来设置。

颗粒流模拟时花岗岩试样的几何模型见图 2。

2.3 细观力学性质参数的确定

将 D. O. Potyondy^[11]的成果作为确定细观力学性质参数的基础，通过宏观弹性模量—细观弹性模量、宏观泊松比—细观刚度比、宏观峰值应力—平行黏结强度为对应关系进行细观参数的标定^[2, 15]。首先将平行黏结法向和切向强度设为一个较大值

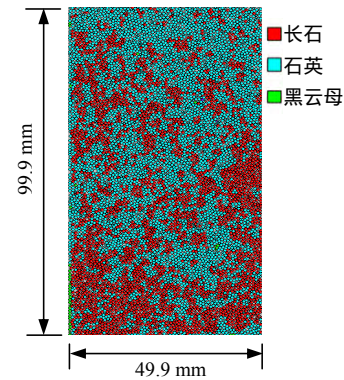


图 2 花岗岩细观组分模拟的几何模型

Fig.2 Specimen geometry in particle flow simulation

(比如峰值应力)、将颗粒接触模量和平行黏结弹性模量比值设为 1.0，通过改变颗粒接触模量大小来匹配岩样弹性模量；然后将颗粒法向刚度和切向刚度比值设为 1.0，通过改变颗粒法向刚度来匹配泊松比；再将侧限压力设置为 0，将平行黏结法向/切向强度均值比值设为一个较小数值，通过改变平行黏结法向强度来匹配峰值应力。

经过多次标定得到了细观力学性质参数为： $E_P = 3.10 \text{ GPa}$ ， $k_{nP}/k_{sP} = 2.00$ ， $\mu_P = 0.30$ ， $\bar{E}_c = 2.85 \text{ GPa}$ ， $k_n/k_s = 2.50$ ， $\bar{\sigma} = 23.01 \text{ MPa}$ ， $\bar{\tau} = 22.85 \text{ MPa}$ ，其中， E_P ， k_{nP}/k_{sP} ， μ_P 分别为颗粒的弹性模量(GPa)、刚度比、摩擦因数； \bar{E}_c ， k_n/k_s ， $\bar{\sigma}$ ， $\bar{\tau}$ 分别为平行黏结的弹性模量(GPa)、刚度比、法向强度均值(MPa)、切向强度均值(MPa)；对应宏观力学性质指标为：弹性模量 $E_2 = 3.10 \text{ GPa}$ ，泊松比 $\mu_2 = 0.243$ ，峰值应力 $\sigma_2 = 31.318 \text{ MPa}$ 。这 3 个宏观指标相对误差的平方和为

$$E_R = [(E_1 - E_2)/E_1]^2 + [(\mu_1 - \mu_2)/\mu_1]^2 + [(\sigma_1 - \sigma_2)/\sigma_1]^2 = 0.00118 \quad (1)$$

由于总误差较小，将相应细观力学性质参数 (E_P ， k_{nP}/k_{sP} ， μ_P ， \bar{E}_c ， k_n/k_s ， $\bar{\tau}$) 作为细观力学参数的基本值。

这些细观力学性质参数基本值与颗粒类型、粒间接触力学性质密切相关，目前还没有考虑这种关系的具体方法。本文采用了考虑矿物硬度相对大小的一种变通方法：(1) 使用正交试验方法，研究细观力学性质参数基本值与宏观力学性质参数的关系；(2) 将长石—长石平行黏结力学参数值作为平行黏结力学参数基本值，将石英—石英、黑云母—黑云母平行黏结力学参数分别取为基本值的 1.2 和

0.4 倍，不同成分接触平行黏结的力学性质参数取为颗粒接触对中 2 个颗粒相应参数的平均值。比如，黑云母 - 石英的法向平行黏结强度均值取为 $\bar{\sigma} = \{[(2.301 \times 10^7 \times 0.4) + [(2.301 \times 10^7 \times 1.2)]] / 2 = 1.841 \times 10^7 \text{ Pa} = 18.41 \text{ MPa}$ 。

3 宏细观参数关系研究

3.1 模拟试验方案设计

为了建立宏细观力学性质参数的关系，需要进行颗粒流模拟试验。但宏细观参数很多，采用所有可能组合既不可能、也不现实。正交试验通过选取“均匀分散、齐整可比”的代表性点进行试验，大大减少了试验工作量、还可进行多因素多水平的试验，可以用于建立岩石宏细观参数关系的研究。

细观力学参数采用的水平是 4，细观力学性质参数的数量是 7，包括：(1) 颗粒的细观力学参数，即弹性模量 E 、颗粒刚度比 k_n/k_s 、颗粒摩擦因数 μ ；(2) 平行黏结参数，即弹性模量 \bar{E}_c 、刚度比 k_n/k_s 、法向强度均值 $\bar{\sigma}$ 、切向强度均值 $\bar{\tau}$ 。

进行颗粒流模拟正交试验设计时，不考虑所选 7 个参数之间的相互作用，采用正交表 $L_{32}(4^9)$ (32, 4, 9 分别为试验次数、因素水平数、因素总数) 的前 7 列得到 7 因素 4 水平下的试验方案(见表 1)，7 因素为前述颗粒和平行黏结的力学性质参数，4 水平为前述基本参数及其增加 20%、减少 20%、减少 40% 后的数值。比如，颗粒弹性模量基本值是 3.10 GPa，这一数值增加 20%、数值本身、减少 20%、减少 40% 后分别是 3.72, 3.10, 2.48, 1.24 GPa，表示颗粒弹性模量分别为水平 1, 2, 3, 4。表 1 还列出了各次试验宏观力学参数(包括弹性模量、泊松比、峰值应力)的模拟结果。

任意位置处颗粒和接触关系的细观力学性质参数，根据前述数字图像处理结果、组分类型和接触情况，通过颗粒循环和接触循环进行设置。

3.2 宏细观参数多元线性回归方程的建立

根据正交数值试验结果，可以建立由宏观参数标定细观参数的宏 - 细观参数模型、由细观参数估计宏观参数的细 - 宏观参数模型。对于第 i 次正交试验，设细观力学性质参数为 $\{x_{ij}\}$ ，对应的宏观力学性质参数为 $\{y_i\}$ ， $\{y_i\}$ 和 $\{x_{ij}\}$ 构成了回归方程：

$$\{y_i\} = \beta_0 + \{\beta_j x_{ij}\} + \varepsilon_i \quad (2)$$

式中： β_0 为常数； β_j 为回归系数； j 为参与回归分析的细观力学性质参数个数； ε_i 为随机误差， $i = 1, 2, \dots, n$ ，其中 n 为参与回归分析的正交试验次数。回归系数 β_j 可以通过最小二乘法求解式(2)得到。

为了建立花岗岩的宏 - 细观参数关系，将细观力学性质参数选为 7 个(包括 3 个颗粒性质参数和 4 个平行黏结参数)、宏观力学性质参数选为 3 个(弹性模量、泊松比、峰值强度)，将表 1 中的细观力学性质参数作为因变量 $\{x_{ij}\}$ 、宏观力学性质参数作为自变量 $\{y_i\}$ 。使用多元线性回归式(1)，可以得到宏 - 细观参数关系：

$$E_p = -4.532 + 0.963E + 17.972\mu - 0.002\sigma \quad (3a)$$

$$\mu_p = 2.626 - 0.031E - 3.746\mu - 0.007\sigma \quad (3b)$$

$$k_{np}/k_{sp} = 0.297 - 0.017E - 0.132\mu - 0.002\sigma \quad (3c)$$

$$\bar{E}_c = 1.004 + 0.528E + 0.315\mu - 0.008\sigma \quad (3d)$$

$$k_n/k_s = 0.165 + 0.017E + 8.300\mu + 0.002\sigma \quad (3e)$$

$$\bar{\sigma} = 8.696 - 0.149E - 0.748\mu + 0.504\sigma \quad (3f)$$

$$\bar{\tau} = 11.865 + 0.380E - 14.693\mu + 0.439\sigma \quad (3g)$$

式中： E, μ, σ 分别为试样的弹性模量(GPa)、泊松比、峰值应力(MPa)。

类似地，将表 1 中的宏观力学性质参数作为因变量 $\{x_{ij}\}$ 、细观力学性质参数作为自变量 $\{y_i\}$ ，可以得到细 - 宏观参数关系：

$$E = 1.485 + 0.405E_p + 0.162\mu_p - 1.311k_{np}/k_{sp} + 0.549\bar{E}_c - 0.301k_n/k_s - 0.003\bar{\sigma} + 0.013\bar{\tau} \quad (4a)$$

$$\mu = 0.185 + 0.021E_p - 0.020\mu_p + 0.020k_{np}/k_{sp} - 0.015\bar{E}_c + 0.0318k_n/k_s \quad (4b)$$

$$\sigma = -13.020 + 0.354E_p + 1.080\mu_p + 21.227k_{np}/k_{sp} - 0.811\bar{E}_c + 0.643k_n/k_s + 0.781\bar{\sigma} + 0.678\bar{\tau} \quad (4c)$$

式(3a) ~ (3g) 的拟合优度 R^2 分别为 0.77, 0.08, 0.07, 0.29, 0.27, 0.39, 0.31，式(4a) ~ (4c) 的拟合优度 R^2 分别为 0.57, 0.59, 0.75。整体来说，这些多元线性回归方程还不令人满意，需要进一步研究。

3.3 宏细观单参数的相关分析

虽然根据正交数值模拟试验结果可以由宏观参数得到细观参数，进而进行颗粒流模拟，但模拟得到的宏观力学性质参数与室内试验结果总会出现一定误差。可以根据宏细观单参数相关性，通过调整细观参数来进一步降低这种误差。

表 1 花岗岩颗粒流模拟的试验方案
Table 1 Test results in particle flow simulation of granite

试验编号	颗粒力学性质参数			平行黏结力学性质参数				宏观力学性质参数		
	E_p/GPa	k_{nP}/k_{sP}	μ_p	\bar{E}_c/GPa	k_n/k_s	$\bar{\sigma}/\text{MPa}$	$\bar{\tau}/\text{MPa}$	E/GPa	μ	σ/MPa
1	3.72	2.40	0.36	3.42	3.00	27.61	27.42	3.889	0.259 0	40.556
2	3.72	2.00	0.30	2.85	2.50	23.01	22.85	3.632	0.257 0	32.089
3	3.72	1.60	0.24	2.28	2.00	18.41	18.28	3.493	0.259 0	23.609
4	3.72	1.20	0.18	1.71	1.50	13.81	13.71	3.148	0.269 0	14.702
5	3.10	2.40	0.36	2.85	2.50	18.41	18.28	3.491	0.237 0	23.791
6	3.10	2.00	0.30	3.42	3.00	13.81	13.71	3.663	0.244 0	15.379
7	3.10	1.60	0.24	1.71	1.50	27.61	27.42	2.999	0.242 0	38.833
8	3.10	1.20	0.18	2.28	2.00	23.01	22.85	3.106	0.260 0	28.010
9	2.48	2.40	0.30	2.28	1.50	27.61	22.85	3.249	0.195 0	32.530
10	2.48	2.00	0.36	1.71	2.00	23.01	27.42	2.568	0.239 0	32.881
11	2.48	1.60	0.18	3.42	2.50	18.41	13.71	3.583	0.231 0	16.824
12	2.48	1.20	0.24	2.85	3.00	13.81	18.28	2.972	0.254 0	17.267
13	1.86	2.40	0.30	1.71	2.00	18.41	13.71	2.193	0.224 0	19.624
14	1.86	2.00	0.36	2.28	1.50	13.81	18.28	2.933	0.168 0	18.411
15	1.86	1.60	0.18	2.85	3.00	27.61	22.85	2.730	0.249 0	32.761
16	1.86	1.20	0.24	3.42	2.50	23.01	27.42	3.419	0.219 0	31.601
17	3.72	2.40	0.18	3.42	1.50	23.01	18.28	4.606	0.203 0	23.216
18	3.72	2.00	0.24	2.85	2.00	27.61	13.71	3.767	0.240 0	20.989
19	3.72	1.60	0.30	2.28	2.50	13.81	27.42	3.323	0.273 0	21.533
20	3.72	1.20	0.36	1.71	3.00	18.41	22.85	2.760	0.309 0	27.566
21	3.10	2.40	0.18	2.85	2.00	13.81	27.42	3.527	0.236 0	19.147
22	3.10	2.00	0.24	3.42	1.50	18.41	22.85	4.455	0.185 0	24.830
23	3.10	1.60	0.30	1.71	3.00	23.01	18.28	2.440	0.298 0	29.668
24	3.10	1.20	0.36	2.28	2.50	27.61	13.71	3.109	0.253 0	23.369
25	2.48	2.40	0.24	2.28	3.00	23.01	13.71	2.558	0.267 0	21.296
26	2.48	2.00	0.18	1.71	2.50	27.61	18.28	2.224	0.281 0	27.201
27	2.48	1.60	0.36	3.42	2.00	13.81	22.85	2.224	0.281 1	27.201
28	2.48	1.20	0.30	2.85	1.50	18.41	27.42	4.045	0.188 0	20.691
29	1.86	2.40	0.24	1.71	2.50	13.81	22.85	3.766	0.174 0	28.978
30	1.86	2.00	0.18	2.28	3.00	18.41	27.42	2.017	0.251 0	18.877
31	1.86	1.60	0.36	2.85	1.50	23.01	13.71	2.253	0.257 8	24.068
32	1.86	1.20	0.30	3.42	2.00	27.61	18.28	3.733	0.185 0	26.465

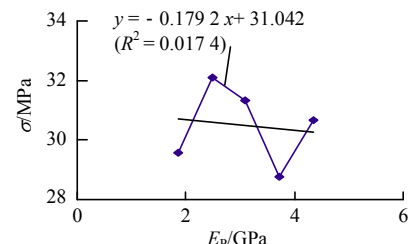
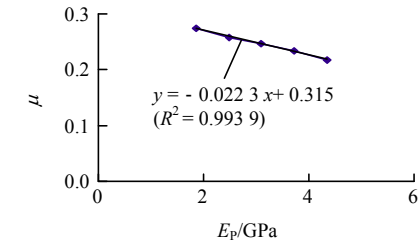
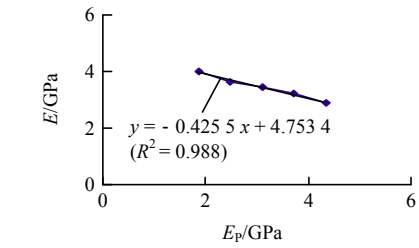
根据前述标定结果($E_p = 3.10 \text{ GPa}$, $k_{nP}/k_{sP} = 2.00$, $\mu_p = 0.30$, $\bar{E}_c = 2.85 \text{ GPa}$, $k_n/k_s = 2.50$, $\bar{\sigma} = 23.01 \text{ MPa}$, $\bar{\tau} = 22.85 \text{ MPa}$), 通过一个参数改变、其他参数不变的方法来分析宏细观单参数的相关性。模拟结果见表 2, 对应曲线见图 3。

由表 2 和图 3 可以看出, 用线性方程拟合时, E 和 E_p , \bar{E}_c 的相关性较大, 相关系数分别为 0.988 0

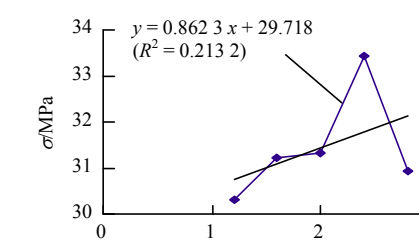
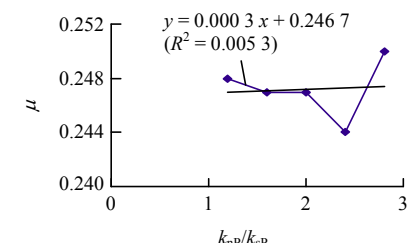
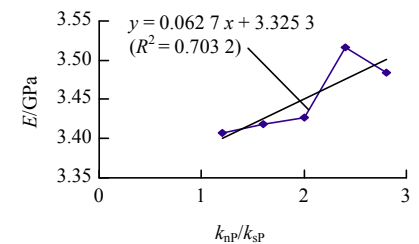
和 0.999 9; μ 和 μ_p , k_n/k_s 的相关性较大, 相关系数分别为 0.985 9 和 0.971 5; σ 和 $\bar{\sigma}$, $\bar{\tau}$ 相关性较大, 相关系数分别为 0.901 4 和 0.902 9。这说明, 宏观模量 - 细观模量、宏观泊松比 - 细观刚度比、峰值应力 - 细观强度之间具有较好的线性相关性。因此, 如果颗粒流模拟得到的宏观结果与实测结果存在一定差异, 可以根据这一对应关系来调整细观力学

表 2 花岗岩颗粒流模拟的单参数相关分析
Table 2 Results of correlation analysis in particle flow simulation of granite

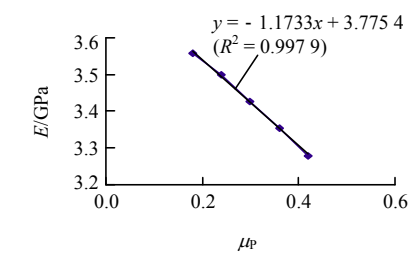
E_p /GPa	E /GPa	μ	σ /MPa
4.34	2.893	0.218	30.686
3.72	3.216	0.233	28.760
3.10	3.427	0.247	31.318
2.48	3.632	0.257	32.089
1.86	4.004	0.275	29.577
<hr/>			
k_{np}/k_{sp}	E /GPa	μ	σ /MPa
2.80	3.484	0.250	30.928
2.40	3.517	0.244	33.432
2.00	3.427	0.247	31.318
1.60	3.418	0.247	31.231
1.20	3.408	0.248	30.304
<hr/>			
μ_p	E /GPa	μ	σ /MPa
0.42	3.278	0.260	29.406
0.36	3.355	0.253	30.073
0.30	3.427	0.247	31.318
0.24	3.499	0.2389	30.956
0.18	3.558	0.234	31.228
<hr/>			
\bar{E}_c /GPa	E /GPa	μ	σ /MPa
3.99	2.527	0.285	30.556
3.42	2.990	0.262	31.976
2.85	3.427	0.247	31.318
2.28	3.852	0.234	29.557
1.71	4.269	0.225	28.919
<hr/>			
k_n/k_s	E /GPa	μ	σ /MPa
3.50	4.029	0.192	30.365
3.00	3.684	0.223	29.985
2.50	3.427	0.247	31.318
2.00	3.23	0.263	29.497
1.50	3.067	0.277	29.393
<hr/>			
$\bar{\sigma}$ /MPa	E /GPa	μ	σ /MPa
32.21	3.432	0.243	19.341
27.61	3.419	0.247	26.412
23.01	3.427	0.247	31.318
18.41	3.427	0.247	33.398
13.81	3.426	0.248	34.606
<hr/>			
$\bar{\tau}$ /MPa	E /GPa	μ	σ /MPa
31.99	3.428	0.243	19.228
27.42	3.418	0.247	26.16
22.85	3.427	0.247	31.318
18.28	3.427	0.247	33.417
13.71	3.426	0.248	34.574



(a)



(b)



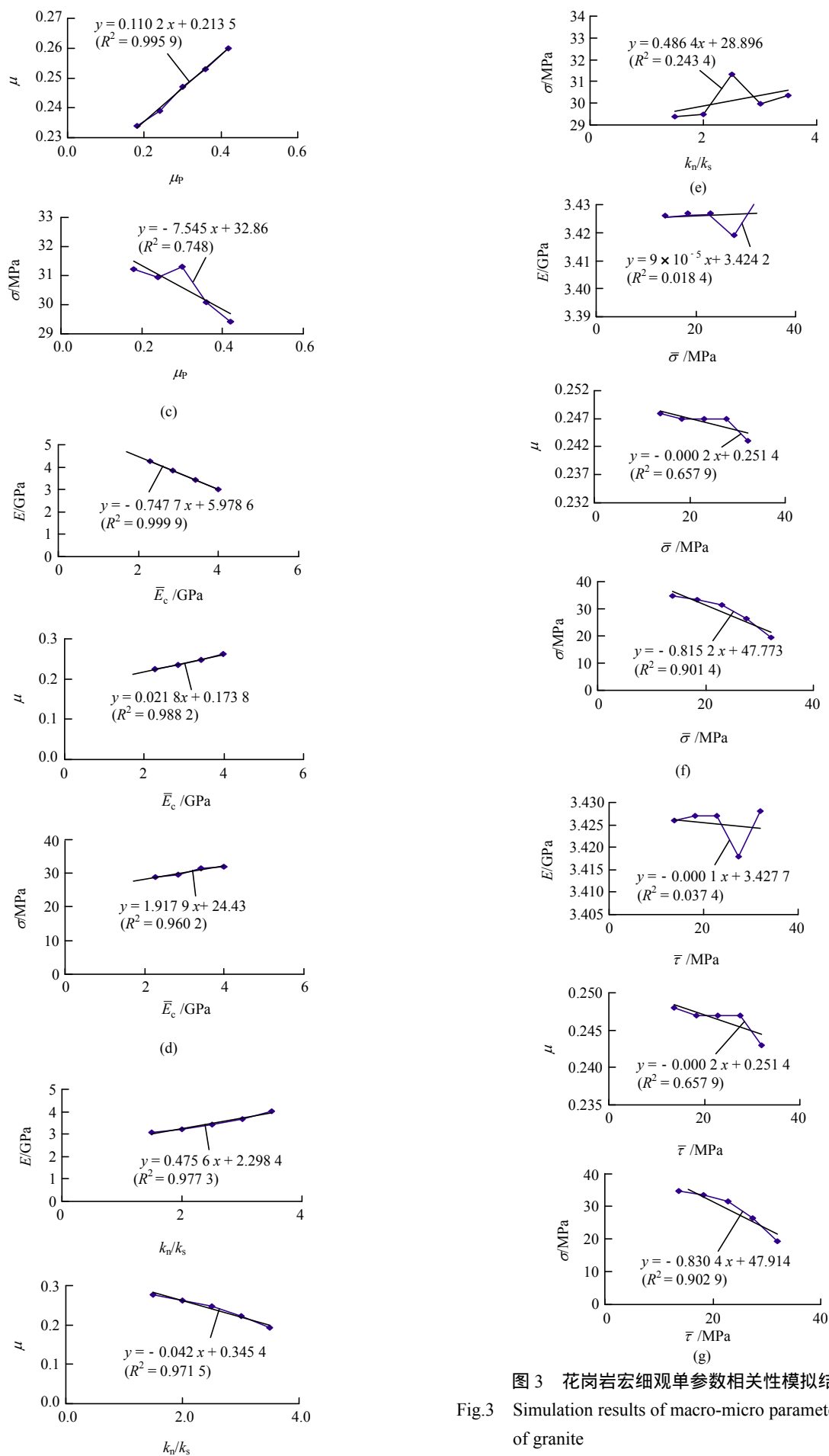


图 3 花岗岩宏观观单参数相关性模拟结果

Fig.3 Simulation results of macro-micro parameter relations of granite

性质参数。

由表 2 和图 3 还可以看出, E 和 $\mu_p, k_n/k_s$ 的相关性较大; μ 和 E_p, \bar{E}_c 的相关性也较大, 即弹性性质参数(模量和泊松比/刚度比)交叉相关性较大。因此, 调整细观力学性质参数时需注意交叉调整(即调整细观弹性模量时同时调整泊松比, 反之亦然)。

必须指出, 由图 3 可以明显看出, 在所有 7 个细观力学性质参数中, 只有平行黏结弹性模量 \bar{E}_c 和 3 个力学性质参数(弹性模量、泊松比、峰值应力)相关性都较大, 其他参数和宏观力学性质参数的关系都会出现非线性的情况。根据室内试验结果来标定细观力学性质参数时需要特别注意 \bar{E}_c 对宏观力学性质行为的影响。

4 讨论

(1) 使用灰度图像分割法确定细观组分的实际分布, 会受到分割阈值的影响。本文将传统矿物确定方法和点选方法结合起来确定这一阈值, 图像分割后各组分百分比之和是 100%(前述 3 种成分百分比之和 99.99%是四舍五入引起), 灰度分割结果与组分重构结果基本一致。这说明, 结合使用传统矿物确定方法和点选方法估计不同成分之间的灰度阈值, 可以将细观成分有效区分开来。

(2) 根据实际分布和类别建立颗粒流模拟几何模型时, 采用了先随机生成颗粒、再根据不同颜色来标识和调用相应组分的方法。此时, 细观组分可以达到 3 种以上, 细观组分可以是任意形状, 适合于多组分岩石(比如花岗岩)的细观特征研究。

(3) 根据实际分布和类别建立颗粒流模拟几何模型, 计算工作量很大。本文使用邻域平均与隔行抽取方法处理灰度图像, 既可以基本保持细观组分实际分布, 又可以大大降低计算工作量。

(4) 颗粒流模型中, 颗粒之间的相互作用主要取决于细观物理力学参数。细观物理参数中, 颗粒最小直径的影响很大(见表 3 和图 4): 研究时采用颗粒最小半径 0.5 mm, 一个正交试验耗时约 45 min(计算机为 Dell-E7300 型、双内核处理器、内存 2.00 GB、主频 2.66 GHz); 最小半径取为 0.5 mm, 可以兼顾考虑实际分布、计算时间与参数影响。细观力学性质参数设置时, 本文考虑了不同组分的实际分布, 但如何根据颗粒类型和颗粒间接触关系确定细观力学性质参数, 还需进一步研究。

(5) 本文研究宏观细观力学性质参数关系时所采

表 3 颗粒最小半径不同时的颗粒流模拟结果

Table 3 Simulation results in various minimum radius of disks in particle flow simulation

最小半径/mm	计算机耗时/min	颗粒数/个	弹性模量 E /GPa	泊松比 μ	峰值应力/MPa	峰值应力时裂纹总数/个	峰值应力时法向裂纹数/个	峰值应力时切向裂纹数/个
0.3	313	8 372	3.476	0.254	29.5	198	162	36
0.4	100	4 709	3.487	0.250	33.2	216	172	44
0.5	45	3 014	3.427	0.247	31.3	176	149	27
0.6	24	2 093	3.62	0.254	32.0	77	58	19
0.7	16	1 537	3.4	0.237	31.7	63	48	15

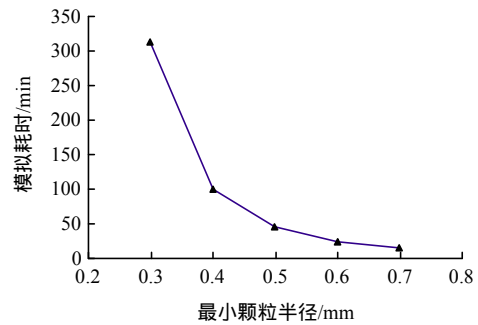


图 4 颗粒最小半径与模拟耗时关系曲线

Fig.4 Radius vs. consumed time in simulation

用的单参数关系分析, 虽然是一种传统做法, 但考虑了不同细观组分的实际分布, 可以为细观力学参数的初步确定提供基础资料, 对估计宏观力学性质参数也有较好的应用前景。

5 结论

(1) 本文使用室内岩石单轴压缩试验时拍摄的试验视频图像, 使用灰度阈值分割技术确定了花岗岩中不同细观组分的实际位置与类型。

(2) 将细观组分颗粒假设为圆盘, 将胶结物使用平行黏结来表征, 细观力学性质参数使用颗粒弹性模量、颗粒刚度比、颗粒摩擦因数、平行黏结弹性模量、平行黏结刚度比、平行黏结法向强度均值、平行黏结切向强度均值 7 个指标来表征, 宏观力学性质参数使用弹性模量、泊松比、峰值应力来表征, 使用二维颗粒流代码(PFC^{2D})、像素循环和颗粒循环方法建立了考虑不同组分实际类型和分布的细观分析模型。

(3) 根据细观力学性质参数标定结果进行了 7 因素、4 水平的 32 次正交模拟试验, 使用多元线性回归分析方法得到了由宏观参数标定细观参数的

宏-细观参数模型、由细观参数估计宏观参数的细-宏观参数模型。

(4) 正交模拟试验和宏细观参数相关分析表明, 宏观弹性模量-细观弹性模量、宏观泊松比-细观刚度比、峰值应力-细观强度具有很好的对应关系, 细观弹性模量、刚度比与宏观弹性模量、泊松比有较好的相关关系。

(5) 由于不同细观组分特点控制了岩石的变形破坏过程, 本文方法将为以细观组分实际分布为基础的岩石材料变形破坏过程研究提供一条新的研究途径, 对确定细观力学参数、预测宏观力学性状也有较好的应用前景。

参考文献(References) :

- [1] POTYONDY D. O. A bonded-disk model for rock : relating microproperties and macroproperties[C]// Proceedings of the Third International Conference. Virginia : [s. n.] , 2002 : 340 - 345.
- [2] 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 Jinming, XIE Zhilei, JIA Haitao. Simulation of mesomechanical properties of limestone using particle flow code[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Supp.2) : 390 - 395. (in Chinese))
- [3] HSIEH Y M, LI H H, HUANG T H, et al. Interpretations on how the macroscopic mechanical behavior of sandstone affected by microscopic properties-revealed by bonded-particle model[J]. Engineering Geology, 2008, 99 : 1 - 10.
- [4] 包春燕, 唐春安, 唐世斌, 等. 单轴拉伸作用下层状岩石表面裂纹的形成模式及其机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(3) : 474 - 482. (BAO Chunyan, TANG Chunan, TANG Shibin, et al. Research on formation mode and mechanism of layered rock surface fractures under uniaxial tension load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(3) : 474 - 482. (in Chinese))
- [5] 罗荣, 曾亚武, 杜欣. 非均质岩石材料宏观细观力学参数的关系研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12) : 2 331 - 2 336. (LUO Rong, ZENG Yawu, DU Xin. Relationship between macroscopic and mesoscopic mechanical parameters of in homogenous rock material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12) : 2 331 - 2 336. (in Chinese))
- [6] 尹成薇, 梁冰, 姜利国. 基于颗粒流方法的砂土宏-细观参数关系分析[J]. 煤炭学报, 2011, 36(增 2) : 264 - 267. (YIN Chengwei, LIANG Bing, JIANG Liguo. Analysis of relationship between macro-micro-parameters of sandy soil based on particle flow theory[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(Supp.2) : 264 - 267. (in Chinese))
- [7] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(8) : 1 329 - 1 364.
- [8] 陈建峰, 李辉利, 周健. 黏性土宏细观参数相关性研究[J]. 力学季刊, 2010, 31(2) : 304 - 309. (CHEN Jianfeng, LI Huili, ZHOU Jian. Study on the relevance of macro-micro parameters for clays[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2010, 31(2) : 304 - 309. (in Chinese))
- [9] 周喻, 吴顺川, 焦建津, 等. 基于 BP 神经网络的岩土体细观力学参数研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(12) : 3 821 - 3 826. (ZHOU Yu, WU Shunchuan, JIAO Jianjin, et al. Research on mesomechanical parameters of rock and soil mass based on BP neural network[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12) : 3 821 - 3 826. (in Chinese))
- [10] 史旦达, 周健, 刘文白, 等. 砂土直剪力学性状的非圆颗粒模拟与宏观机制研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10) : 1 557 - 1 565. (SHI Danda, ZHOU Jian, LIU Wenbai, et al. Exploring macro- and micro-scale responses of sand in direct shear tests by numerical simulations using non-circular particles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(10) : 1 557 - 1 565. (in Chinese))
- [11] 徐文杰, 胡瑞林, 王艳萍. 基于数字图像的非均质岩土材料细观结构 PFC2D 模型[J]. 煤炭学报, 2007, 32(4) : 358 - 362. (XU Wenjie, HU Ruilin, WANG Yanping. PFC2D model for mesostructure of inhomogeneous geomaterial based on digital image processing[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(4) : 358 - 362. (in Chinese))
- [12] 丁秀丽, 李耀旭, 王新. 基于数字图像的土石混合体力学性质的颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3) : 477 - 484. (DING Xiuli, LI Yaoxu, WANG Xin. Particle flow modeling mechanical properties of soil and rock mixtures based on digital image[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3) : 477 - 484. (in Chinese))
- [13] 周基, 田琼, 芮勇勤, 等. 基于数字图像的沥青混合料离散元几何建模方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(1) : 136 - 140. (ZHOU Ji, TIAN Qiong, RUI Yongqin, et al. A DEM Geometric method of HMA based on digital imaging processing[J]. Journal of Civil Architectural and environmental Engineering, 2012, 34(1) : 136 - 140. (in Chinese))
- [14] Itasca Consulting Group, Inc.. PFC^{2D} (partial flow code in 2 dimension) Version 3.1[R]. Minneapolis, Minnesota : Itasca Consulting Group, Inc., 2001.
- [15] 杨庆, 刘元俊. 岩石类材料裂纹扩展贯通的颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增 1) : 3 123 - 3 129. (YANG Qing, LIU Yuanjun. Simulations of crack propagation in rock-like materials using particle flow code[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Supp.1) : 3 123 - 3 129. (in Chinese))