

岩石单轴压缩 PFC^{2D} 模型细观参数标定研究*

陈鹏宇¹, 孔莹², 余宏明²

(1. 内江师范学院 地理与资源科学学院, 四川 内江 641100;

2. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 武汉 430074)

摘要: 为了研究单轴压缩 PFC^{2D} 模型宏细观参数之间的关系及对其细观参数进行标定, 以平直节理接触模型作为颗粒接触本构模型, 对 PFC^{2D} 模型细观参数进行正交设计, 以多因素方差分析、量纲分析研究宏细观参数之间的关系, 在此基础上, 提出了试错法标定细观参数的具体流程, 将其用于灰岩单轴压缩 PFC^{2D} 模型细观参数的标定中, 数值模拟所得宏观参数、应力-应变曲线和破坏特征与室内试验结果相近, 验证了本文方法的可行性。分析结果显示, 如果要建立双轴压缩 PFC^{2D} 模型, 还需进一步标定细观参数 $\tan\varphi_b$ 和 μ_b 。研究成果可为岩石力学试验的颗粒流模拟提供一定参考。

关键词: 颗粒流; 平直节理接触模型; 岩石; 细观参数; 标定; 试错法

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)05-1240-10

Research on the Calibration Method of Microparameters of a Uniaxial Compression PFC^{2D} Model for Rock

Chen Pengyu¹, Kong Ying², Yu Hongming²

(1. School of Geography & Resource Science, Neijiang Normal University, Neijiang, Sichuan 641100, P.R. China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, P.R. China)

Abstract: To analyze the relationship between microparameters and macroparameters of the uniaxial compression PFC2D model of rock, and to calibrate the microparameters, the orthogonal design and analysis of variance are adopted in this paper. Flat-jointed contact model is used as the contact constitutive model of particles. The orthogonal design is conducted to the microparameters of PFC2D model. Then analysis of variance and dimensional analysis is utilized to analyze the relationship between microparameters and macroparameters. On this basis, the process of trial-and-error method for calibration of microparameters for rock is proposed and is used to calibrate the microparameters of limestone. Simulation results of macroparameters, stress-strain curves and failure characteristics are closed to the laboratory test results, and this validated the significance of the suggestion for trial-and-error method. If a biaxial compression PFC^{2D} model need to build, the two microparameters ($\tan\varphi_b$, μ_b) need further calibration. The research results can provide references for the particle flow simulation of rock mechanics tests.

Keywords: PFC; flat-jointed contact model; rock; microparameters; calibration; trial-and-error method

* 收稿日期: 2018-06-24 (修改稿)

作者简介: 陈鹏宇 (1987-), 男, 四川富顺人, 博士, 副教授, 主要从事地质灾害及工程地质方面的研究工作。

E-mail: 79012983@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金 (41272377); 长江科学院开放研究基金 (CKWV2016391/KY); 四川省教育厅科研项目 (17ZB0222)

0 引言

颗粒流方法及 PFC 程序的不断发展,其已经成为研究岩石力学性质的重要手段之一^[1-4]。二维颗粒流(PFC^{2D})模型将岩石材料构造成颗粒集合体,通过颗粒之间的相互作用来模拟岩石的宏观力学性质。在 PFC^{2D}中,颗粒之间通过黏结产生相互作用,并以接触本构模型描述。接触黏结模型和平行黏结模型是最常用的两种接触本构模型^[5],但选用这两种接触本构模型建立的岩石 PFC^{2D}模型,不能同时满足岩石的抗拉强度和抗压强度,所得单轴抗压强度与抗拉强度比值(UCS/TS)一般为 3~4,低于许多岩石的 UCS/TS(一般超过 10)^[6-7]。目前多采用簇平行黏结模型^[8]解决上述问题,即通过抑制颗粒的旋转,来提高 UCS/TS 值。随后,Potyondy^[9]提出了平直节理接触模型,该模型将圆形颗粒构造成多边形颗粒,同样可以抑制颗粒破坏后的旋转,使得 UCS/TS 值显著增大。本文选用平直节理接触模型作为颗粒接触本构模型,建立岩石单轴压缩的 PFC^{2D}模型,并对其细观参数的标定进行研究。

1 PFC^{2D}基本理论

1.1 平直节理接触模型

典型的平直节理接触模型如图 1 所示。从图 1(a)中可以看出,通过平直节理接触模型的设置,原本的圆形颗粒被构造成了假设的多边形颗粒,以抑制黏结破坏后的旋转。平直节理接触模型有未黏结和黏结两种模式,两者的本构关系不同,具体原理可参见文献[9],本文不再赘述。

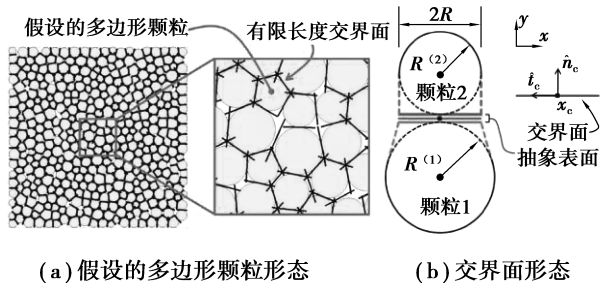


图 1 平直节理模型^[9]

Fig. 1 Flat-jointed contact model^[9]

以平直节理模型建立岩石的 PFC^{2D}模型,其细观参数包括平直节理细观参数和颗粒细观参数两个方面,具体如表 1 所示。

表 1 PFC^{2D}模型主要的宏细观参数

Table 1 Main macro-parameters and micro-parameters of PFC^{2D} model

平直节理细观参数		颗粒细观参数		宏观参数	
N	交界面段数	ρ_s	颗粒密度	σ_f	单轴抗压强度
E_c	平直节理模量	R_{min}	最小颗粒粒径	E	弹性模量
k_n/k_s	平直节理刚度比	R_{max}/R_{min}	颗粒粒径比	ν	泊松比
μ_b	平直节理摩擦系数	E_p	颗粒接触模量	σ_t	抗拉强度
λ	平直节理两端较小颗粒的半径比	$(k_n/k_s)_p$	颗粒接触刚度比		
σ_b	平直节理抗拉强度	μ_p	颗粒摩擦系数		
c_b	平直节理粘聚力				
$\tan\phi_b$	平直节理内摩擦系数				

1.2 岩石数值试验

为了建立与岩石力学性质相接近的 PFC^{2D}模型,细观参数的标定是最重要的基础工作。目前常用试错法标定细观参数,即通过对比数值试验和室内力学试验的结果,不断调整细观参数以达到两者基本匹配。本文主要研究岩石单轴压缩 PFC^{2D}模

型细观参数的标定,兼顾 UCS/TS 满足实际。因此,需要进行单轴压缩数值试验和直接拉伸数值试验以标定细观参数,所需宏观参数如表 1 所示。

单轴压缩数值试验如图 2(a)所示,根据数值试验的应力-应变曲线可得到 σ_f 、 E 和 ν 。直接拉伸数值试验如图 2(b)所示,根据数值试样破裂时的

峰值强度即可确定 σ_t 。通过数值试验结果与室内力学试验结果的对比,可实现细观参数的标定。

2 宏细观参数之间的关系分析

PFC^{2D}模型的细观参数较多,采用试错法标定细观参数时,如果不了解宏细观参数之间的关系,有可能导致大量的数值试验。为此,本文首先对PFC^{2D}模型宏细观参数之间的关系进行研究,为试错法标定细观参数提供依据,从而更快捷地标定细观参数。

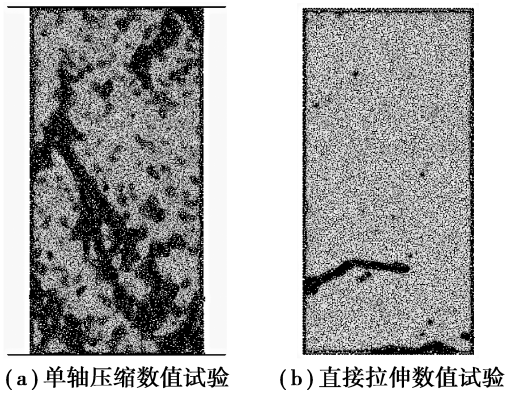


图2 岩石数值试验

Fig. 2 Numerical test of rock

2.1 正交试验设计

顾及 UCS/TS,建立岩石单轴压缩 PFC^{2D}模型,一般选用 σ_f 、 E 、 ν 和 σ_t 这4个宏观参数作为细观参数标定的依据。但是细观参数较多,为了降低标定的难度,有必要适当进行一些假设,以减少细观参数的数量。参考 Potyondy^[9] 和 Poulsen 等^[10] 的研究,做以下假设:

- (1) 平直节理抗拉强度小于抗剪强度,即 $\sigma_b < \tau_b = c_b + \sigma \tan \varphi_b$,可获得符合实际的 UCS/TS。
- (2) $\lambda = 1$ 。

(3) R_{\max}/R_{\min} 固定为 1.66。

(4) $N = 4$ 。

(5) ρ_s 取 2 700 kg/m³。

(6) $E_p, (k_n/k_s)_p, \mu_p$ 同 $E_c, k_n/k_s, \mu_b$ 一致。

在上述假设的基础上,对细观参数进行正交设计,正交试验设计和正交设计矩阵序列如表2、表3所示。以表3中的正交设计矩阵序列设定 PFC^{2D}模型细观参数,数值试样长 100 mm,宽 50 mm,分别进行单轴压缩、直接拉伸数值试验,由此得到宏观参数 σ_f 、 E 、 ν 和 σ_t ,具体结果如表3所示。从表3的结果可以看出,每项宏观参数的计算结果基本符合岩石宏观参数取值范围,但是综合各项宏观参数,可以看出存在一些不符合客观认识的结果,比如第12组数据, $E = 25.68$ MPa,而 $\nu = 0.050$,不符合一般弹性模量高而泊松比低的认识。这些结果属于比较极端的细观参数组合结果导致的,但是并不影响宏细观参数关系的分析结果。

表2 PFC^{2D}模型细观参数正交试验设计表

Table 2 Orthogonal test design table of micro-parameters of PFC^{2D} model

细观参数	因子水平				转换公式
	1	2	3	4	
R_{\min}/mm	0.4	0.8	1.2	1.6	$y = 0.4x$
E_c/GPa	20	40	60	80	$y = 20x$
k_n/k_s	1.2	1.6	2.0	2.4	$y = 0.4x + 0.8$
σ_b/MPa	3	6	9	12	$y = 3x$
c_b/σ_b	3	6	9	12	$y = 3x$
$\tan \varphi_b$	0.1	0.4	0.7	1.0	$y = 0.3x - 0.2$
μ_b	0.1	0.4	0.7	1.0	$y = 0.3x - 0.2$

表3 PFC^{2D}模型正交设计矩阵序列及宏观参数计算结果

Table 3 Orthogonal matrix sequence of micro-parameters and the corresponding results of macro-parameters of PFC^{2D} model

No.	细观参数(自变量)								宏观参数(因变量)			
	R_{\min}/mm	E_c/GPa	k_n/k_s	σ_b/MPa	c_b/σ_b	c_b/MPa	$\tan \varphi_b$	μ_b	E/GPa	ν	σ_f/MPa	σ_t/MPa
1	0.4	60	2	9	3	27	0.7	0.1	68.86	0.143	63.54	7.00
2	1.2	40	2	3	3	9	0.4	1	44.23	0.133	24.16	2.37
3	0.8	80	2	6	6	36	0.1	0.1	91.73	0.138	68.72	4.80
4	0.8	20	1.6	6	3	18	0.4	0.4	24.01	0.101	43.44	4.90
5	0.8	60	2.4	9	9	81	0.1	1	66.44	0.165	151.43	7.05

续表3

No.	细观参数(自变量)								宏观参数(因变量)			
	R_{\min}/mm	E_c/GPa	k_n/k_s	σ_b/MPa	c_b/σ_b	c_b/MPa	$\tan\varphi_b$	μ_b	E/GPa	ν	σ_t/MPa	σ_t/MPa
6	1.2	20	2.4	12	12	144	0.4	0.1	21.36	0.160	227.72	9.34
7	1.2	80	1.2	12	9	108	0.1	0.4	97.45	0.048	170.51	9.87
8	1.6	20	2	12	6	72	1	1	21.99	0.156	175.98	9.62
9	0.8	60	2.4	12	3	36	1	0.4	66.43	0.165	94.86	9.40
10	1.6	60	1.2	6	6	36	0.4	1	72.70	0.066	80.32	4.73
11	1.6	80	1.6	9	9	81	0.4	0.1	91.12	0.140	156.00	7.15
12	0.4	20	1.2	3	3	9	0.1	0.1	25.68	0.050	16.07	2.42
13	1.6	40	2.4	6	3	18	0.1	0.7	42.59	0.184	38.02	4.79
14	1.2	80	1.2	9	3	27	1	1	97.63	0.047	72.06	7.40
15	0.4	20	1.2	6	9	54	1	0.7	25.66	0.051	99.70	4.84
16	1.6	60	1.2	3	12	36	0.7	0.4	72.43	0.077	82.11	2.36
17	0.4	80	2.4	3	6	18	0.4	0.4	88.61	0.170	33.00	2.25
18	0.4	80	2.4	6	12	72	0.7	1	88.57	0.170	113.15	4.49
19	0.8	80	2	3	12	36	1	0.7	91.62	0.138	79.90	2.40
20	1.6	20	2	9	12	108	0.1	0.4	21.97	0.160	192.72	7.22
21	0.4	40	1.6	9	6	54	1	0.4	48.11	0.105	124.92	7.14
22	0.8	40	1.2	12	6	72	0.7	0.1	51.09	0.047	158.70	10.09
23	1.2	60	1.6	3	6	18	0.1	0.7	69.16	0.098	33.04	2.41
24	1.6	40	2.4	3	9	27	1	0.1	42.47	0.201	61.11	2.39
25	1.2	40	2	6	9	54	0.7	0.4	44.20	0.133	97.17	4.73
26	0.8	20	1.6	3	9	27	0.7	1	24.00	0.101	62.74	2.45
27	1.2	20	2.4	9	6	54	0.7	0.7	21.41	0.159	109.23	7.00
28	0.4	60	2	12	9	108	0.4	0.7	68.88	0.142	144.15	9.33
29	0.8	40	1.2	9	12	108	0.4	0.7	51.09	0.047	213.95	7.57
30	1.6	80	1.6	12	3	36	0.7	0.7	91.60	0.119	89.40	9.54
31	1.2	60	1.6	6	12	72	1	0.1	68.91	0.099	133.48	4.82
32	0.4	40	1.6	12	12	144	0.1	1	48.25	0.105	213.09	9.53

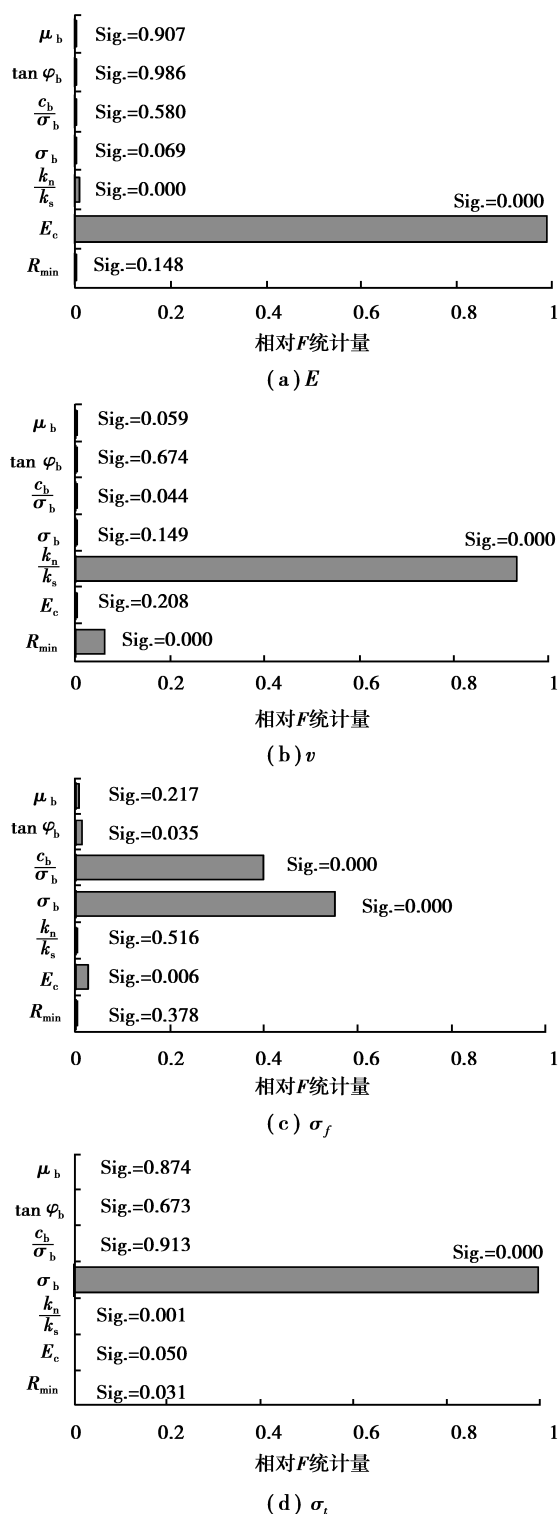
2.2 多因素方差分析

多因素方差分析可用于研究多个因素对因变量是否具有显著影响,考虑各因素的主效应,对表 3 中的数据进行方差分析,研究细观参数对宏观参数是否具有显著影响。多因素方差分析中,F 统计量可用于对比细观参数对宏观参数的影响程度。采用相对 F 统计量对比各细观参数的影响程度,其计算公式如下:

$$f_i = \frac{F_i}{\sum_1^n F_i} \tag{1}$$

式中: f_i 为相对 F 统计量; n 为细观参数个数。

Sig.值用于检验细观参数对宏观参数的影响是否显著,若 Sig. < 0.01,则影响非常显著,其中 Sig. < 0.05,则影响显著。多因素方差分析结果如图 3。

图3 多因素方差的相对 F 统计量Fig. 3 Relative F -statistics of multi-factor analysis of variance

根据图3的结果可以看出,细观参数对宏观参数的影响程度各不相同。具体描述如下:

(1) 图3(a)中, E_c 和 k_n/k_s 对应的 $\text{Sig.} < 0.01$, 它们对 E 具有非常显著影响,其余细观参数都未

达到显著影响的程度。对比 E_c 和 k_n/k_s 的相对 F 统计量可以看出, E_c 对 E 的影响程度占据绝对优势,明显大于 k_n/k_s 。

(2) 图3(b)中, R_{min} 和 k_n/k_s 对应的 $\text{Sig.} < 0.01$,它们对 v 具有非常显著影响,其余细观参数中仅 c_b/σ_b 达到了显著影响的程度,但从相对 F 统计量来看,几乎可以忽略。对比 R_{min} 和 k_n/k_s 的相对 F 统计量可以看出, k_n/k_s 对 v 的影响程度占据绝对优势,明显大于 R_{min} 。

(3) 图3(c)中, E_c 、 σ_b 和 c_b/σ_b 对应的 $\text{Sig.} < 0.01$,它们对 σ_f 具有非常显著影响,其余细观参数中仅 $\tan \varphi_b$ 达到了显著影响的程度,但从相对 F 统计量来看,远不及 σ_b 和 c_b/σ_b 。对比 E_c 、 σ_b 和 c_b/σ_b 的相对 F 统计量可以看出, σ_b 和 c_b/σ_b 对 σ_f 的影响程度占据主导地位,明显大于 E_c 。

(4) 图3(d)中, k_n/k_s 和 σ_b 对应的 $\text{Sig.} < 0.01$,它们对 σ_t 具有非常显著影响,其余细观参数中仅 R_{min} 达到了显著影响的程度,但从相对 F 统计量来看,几乎可以忽略。对比 k_n/k_s 和 σ_b 的相对 F 统计量可以看出, σ_b 对 σ_t 的影响程度占据绝对优势,明显大于 k_n/k_s 。

2.3 宏细观参数的量纲分析

通过上述方差分析发现,并不是所有细观参数对宏观参数都具有显著影响,即使有的细观参数达到了显著水平($\text{Sig.} < 0.05$),但是相对于非常显著影响因子,几乎可以忽略。所以,在进行量纲分析时,仅选用达到非常显著影响水平($\text{Sig.} < 0.01$)的细观参数。其中, R_{min} 主要是影响模型最小尺度上颗粒数 RES (resolution),周喻等^[11]的分析结果显示,当 $\text{RES} \geq 10$ 时,颗粒数量和大小对模型宏观力学参数的影响较小。对于本文选择的最大 $R_{min} = 1.6 \text{ mm}$,按文献^[12]定义的 RES 公式的 $\text{RES} = 11.7 > 10$,满足要求。所以在量纲分析时,将 R_{min} 考虑为 RES 。宏细观参数及其相应的量纲如表4。根据 π 定理^[13],宏细观参数关系可定性描述为如下公式:

$$E = E_{\text{f}_E}(k_n/k_s) \quad (2)$$

$$v = f_v(\text{RES}, k_n/k_s) \quad (3)$$

$$\sigma_f = \sigma_{\text{f}_f}(E_c/\sigma_b, c_b/\sigma_b) \quad (4)$$

$$\sigma_t = \sigma_{\text{f}_t}(k_n/k_s) \quad (5)$$

式中: f_E, f_v, f_f, f_t 分别为描述 E, v, σ_f 和 σ_t 的函数。

表 4 PFC^{2D}模型中宏观细观参数及其量纲

Table 4 Macro-parameters and micro-parameters and their dimensions in PFC^{2D} model

细观参数	量纲	宏观参数	量纲
RES	1	σ_f	FL ⁻²
E_c	FL ⁻²	E	FL ⁻²
k_n/k_s	1	ν	1
σ_b	FL ⁻²	σ_t	FL ⁻²
c_b/σ_b	1		
$\tan\varphi_b$	1		

下面对上述定性关系进行定量描述。

(1) E 与 E_c 和 k_n/k_s 的关系。图 4 中给出了同样 k_n/k_s 水平下, E_c 与 E 之间的关系。从图 4 中可以看出, 同样 k_n/k_s 水平下, E 与 E_c 之间具有线性函数关系, 拟合函数的 R^2 都在 0.999 以上。从图 4 中同样可以看出, 同样 E_c 水平下, E 随 k_n/k_s 减小而增大, 但变化幅度较小。如果忽略 k_n/k_s 的影响, 根据表 3 中的数据, 式(2)可定量表示为

$$E = 1.149E_c + 0.366, R^2 = 0.989 \quad (6)$$

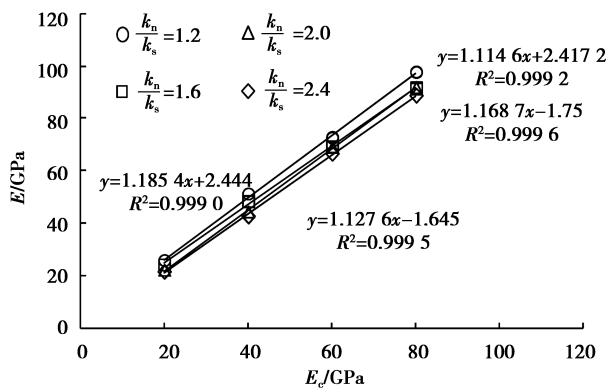


图 4 同样 k_n/k_s 水平下, E_c 与 E 之间的关系

Fig. 4 Relationship between E_c and E under the same level of k_n/k_s

(2) ν 与 RES 和 k_n/k_s 的关系。图 5 中给出了同样 R_{min} 水平下, k_n/k_s 与 ν 之间的关系。从图 5 中可以看出, 同样 R_{min} 水平下, k_n/k_s 与 ν 之间具有对数函数关系, 拟合函数的 R^2 都在 0.966 以上。从图 5 中同样可以看出, 同样 k_n/k_s 水平下, ν 随 R_{min} 增大而小幅度减小, 直至 $R_{min} = 1.6$ mm, 反而出现了较大增长。如果忽略 R_{min} 的影响, 根据表 3 中的数

据, 式(3)可定量表示为

$$\nu = 0.169\ln(k_n/k_s) + 0.025, R^2 = 0.930 \quad (7)$$

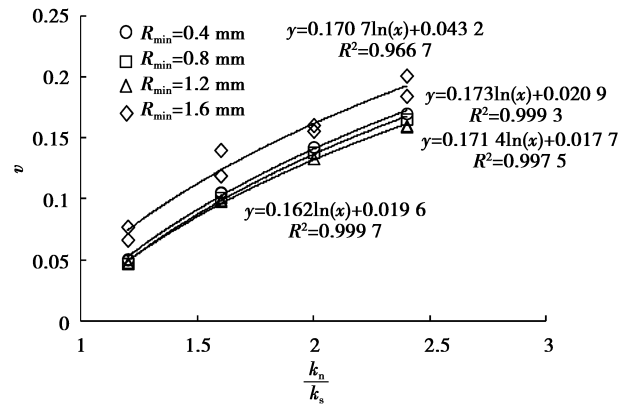


图 5 同样 R_{min} 水平下, k_n/k_s 与 ν 之间的关系

Fig. 5 Relationship between k_n/k_s and ν under the same level of R_{min}

(3) ν 与 E_c 、 σ_b 和 c_b/σ_b 的关系。图 6 中给出了同样 σ_b 水平下, c_b 与 σ_t 之间的关系。从图 6 中可以看出, 同样 σ_b 水平下, c_b 与 σ_t 之间具有线性函数关系, 除 $\sigma_b = 12$ MPa 水平, 其余拟合函数的 R^2 都在 0.955 以上。由于 E_c 对 σ_t 具有非常显著影响, 而图 6 中并未排除 E_c 的影响, 所以有可能导致线性关系不够明显。如果忽略 E_c 、 σ_b 的影响, 根据表 3 中的数据, 式(4)可定量表示为

$$\sigma_t = 1.637c_b + 14.935, R^2 = 0.914 \quad (8)$$

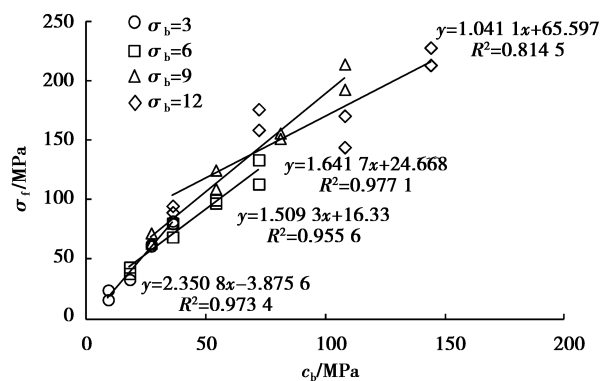


图 6 同样 σ_b 水平下, c_b 与 σ_t 之间的关系

Fig. 6 Relationship between c_b and σ_t under the same level of σ_b

(4) σ_t 与 k_n/k_s 和 σ_b 的关系。图 7 中给出同样 k_n/k_s 水平下, σ_b 与 σ_t 之间的关系。从图 7 中可以看出, 同样 k_n/k_s 水平下, σ_b 与 σ_t 之间具有线性函数关系, 拟合函数的 R^2 都在 0.998 以上。从图 7 中还可以看出, 同样 σ_b 水平下, σ_t 的变化幅度很小, 说明 k_n/k_s 对 σ_t 影响很小。如果忽略 k_n/k_s 的

影响,根据表3中的数据,式(5)可定量表示为

$$\sigma_t = 0.805\sigma_b - 0.056, R^2 = 0.996 \quad (9)$$

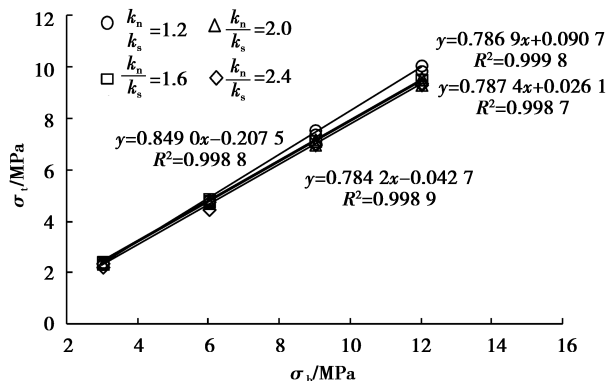


图7 同样 k_n/k_s 水平下, σ_b 与 σ_t 之间的关系

Fig. 7 Relationship between σ_b and σ_t under the same level of k_n/k_s

2.4 对试错法标定细观参数的建议

根据上述分析结果,本文对试错法提出以下建议:

(1) R_{\min} (RES) 对 v 和 σ_t 存在非常显著和显著影响,一般作为首要标定的细观参数,可根据模拟精度、计算效率或者岩石结构特征综合考虑。

(2) 细观强度参数中,仅 c_b/σ_b 对 v 存在显著影响,但是几乎可以忽略,而细观变形参数 E_c 和 k_n/k_s 分别对 σ_t 和 σ_b 具有非常显著影响。因此,在标定时,首先标定细观变形参数,再标定细观强度参数,这样在标定细观强度参数时,对 E 和 v 不会产生较大的影响。

(3) R_{\min} 确定后, k_n/k_s 对 v 和 E 都存在非常显著影响,可将其作为第2个标定的细观参数。根据 k_n/k_s 与 v 之间的对数函数关系即可标定。

(4) k_n/k_s 确定后,仅 E_c 对 E 存在非常显著影响,可将其作为第3个标定的细观参数。根据 E 与 E_c 之间的线性函数关系即可标定。

(5) 细观变形参数标定后,可标定细观强度参数。由于 k_n/k_s 确定后,仅 σ_b 对 σ_t 存在非常显著影响,可将其作为第4个标定的细观参数。根据 σ_b 与 σ_t 之间的线性函数关系即可进行标定。

(6) 至此,还剩 c_b/σ_b , $\tan\varphi_b$, μ_b 这3个细观参数未标定, $\tan\varphi_b$ 和 μ_b 对4个宏观参数都不具备非常显著影响,仅 $\tan\varphi_b$ 对 σ_t 存在显著影响,但远不及 c_b/σ_b 。因此,没有宏观参数可用于标定 $\tan\varphi_b$ 和 μ_b ,考虑两者对 σ_t 的影响较小,可取 $\tan\varphi_b = \mu_b = 0.5$ 。由于 σ_b 确定后,仅 c_b/σ_b 对 σ_t 存在非常显著

影响,可根据 c_b 与 σ_t 之间的线性函数关系进行标定。

3 细观参数标定方法及应用

3.1 试错法标定细观参数流程

本文根据宏细观参数之间的关系给出了对试错法标定细观参数的建议,但是在细观参数标定前,需要确定初始值。根据式(6)~(9)定量函数关系进行反算,可用于细观参数初始值估计,至于 $\tan\varphi_b$ 和 μ_b ,取0.5即可。具体如下:

$$k_n/k_s = \exp(5.504v - 0.101) \quad (10)$$

$$E_c = 0.861E + 0.238 \quad (11)$$

$$\sigma_b = 1.242\sigma_t + 0.070 \quad (12)$$

$$c_b = 0.611\sigma_t - 9.125 \quad (13)$$

$$\tan\varphi_b = 0.5 \quad (14)$$

$$\mu_b = 0.5 \quad (15)$$

根据上述分析结论,采用试错法标定细观参数,其具体流程如图8所示。

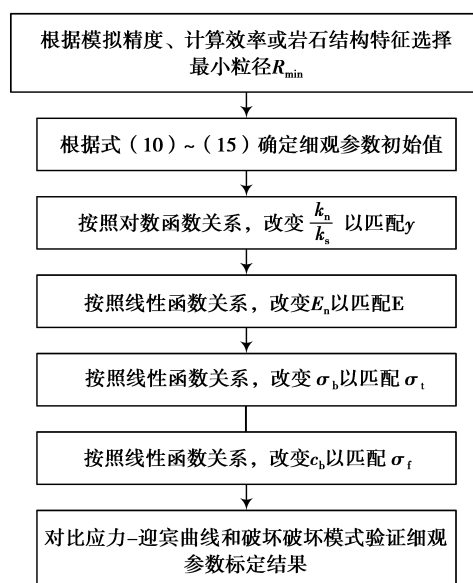


图8 试错法标定细观参数的流程图

Fig. 8 Flow chart of calibration of microparameters using trial-and-error method

3.2 实例应用

为了验证上述细观参数标定方法的可行性,以灰岩作为模拟对象,试样取自焦作市龙寺矿山岩质高边坡马家沟组(O_2s)地层。制样后在 INSTORN-1346 电液伺服岩石力学测试系统进行力学试验,测定岩石的 σ_t , E , v 和 σ_b 。试验时每组试样4个,取测试结果平均值,如表5所示。

表 5 灰岩宏观参数试验值和模拟值

Table 5 Tested and simulated macro-parameters of limestone

宏观参数	σ_t/MPa	σ_c/MPa	E/GPa	ν
试验值	121.91	5.26	61.28	0.208
模拟值	119.14	5.24	60.74	0.204

按照图 8 所示的细观参数标定流程,总共经历了 6 个步骤(具体过程如表 6 所示)。

第 1 步,选定 R_{\min} 。综合考虑模拟精度和计算效率,选择 $R_{\min} = 0.8 \text{ mm}$ 。根据式(10)~(15)计算各细观参数初始值。设置各项细观参数进行单轴压缩数值试验,得到 $E = 56.87 \text{ GPa}$, $\nu = 0.189$, $\sigma_t = 134.71 \text{ MPa}$ 。该结果已经比较接近于目标值,误差都在 11%以内。 ν 与目标值还存在一定差距,需要对 k_n/k_s 进行调整。

第 2 步,调整 k_n/k_s 以匹配 ν 。根据式(10)对数函数关系 $\Delta \ln(k_n/k_s) = 5.504 \Delta \nu$ 进行调整,调整后 $k_n/k_s = 3.22$,再次进行单轴压缩数值试验,得到 $E = 55.77 \text{ GPa}$, $\nu = 0.204$, $\sigma_t = 123.13 \text{ MPa}$ 。 ν 与目标值的误差仅为 1.92%,不再对 k_n/k_s 进行调整。 E 与目标值还存在一定差距,需要对 E_c 进行调整。

第 3 步,调整 E_c 以匹配 E 。根据公式(11)所

示线性函数关系 $\Delta E_c = 0.861 \Delta E$,进行调整,调整后 $E_c = 57.74$,再次单轴压缩数值试验,得到 $E = 60.74 \text{ GPa}$, $\nu = 0.204$, $\sigma_t = 124.18 \text{ MPa}$ 。 E 与目标值的误差仅为 0.88%,不再对 E_c 进行调整。继续进行直接拉伸数值试验,得到 $\sigma_t = 4.98 \text{ MPa}$,与目标值存在一定差距,需要对 σ_b 进行调整。

第 4 步,调整 σ_b 以匹配 σ_t ,根据式(12)线性函数关系 $\Delta \sigma_b = 1.242 \Delta \sigma_t$ 进行调整,调整后 $\sigma_b = 6.95 \text{ MPa}$ 。进行直接拉伸数值试验,得到 $\sigma_t = 5.24 \text{ MPa}$,与目标值误差仅为 0.38%,不再对 σ_b 进行调整。继续进行单轴压缩试验,此时 $\sigma_t = 119.14 \text{ MPa}$,与目标值误差仅为 2.27%,认为可以接受,细观参数标定结束。

上述细观参数标定过程中总共进行了 4 次单轴压缩数值试验和 2 次直接拉伸数值试验,细观参数标定后数值试样宏观参数如表 5 所示,与目标值的误差最大不超过 2.30%,说明标定效果良好。

值得注意的是,如果按照式(10)~(13)所示的函数关系调整细观参数仍然达不到满意的结果,可根据前两次数值试验结果,重新确定式(10)~式(13)的函数关系,然后进行细观参数调整。因为,此时所确定的函数关系只考虑了单个细观参数的影响,更为准确。

表 6 灰岩细观参数试验值和模拟值标定过程

Table 6 Calibration process of micro-parameters of limestone

步骤	宏观参数				细观参数					
	E/GPa	ν	σ_t/MPa	σ_c/MPa	E_c	k_n/k_s	σ_b/MPa	c_b/MPa	$\tan \varphi_b$	u_b
1	56.87	0.189	134.71		53.00	2.87	6.60	65.36	0.5	0.5
2	55.77	0.204	123.13		53.00	3.22	6.60	65.36	0.5	0.5
3	60.74	0.204	124.18	4.98	57.74	3.22	6.60	65.36	0.5	0.5
4	60.74	0.204	119.14	5.24	57.74	3.22	6.95	65.36	0.5	0.5

最后,对比数值模拟和室内试验的应力-应变曲线和破坏模式(如图 9 和图 10 所示),以验证上述细观参数标定结果的可靠性。从图 9 中可以看出,两者所得破坏模式比较一致,都表现为脆性劈裂破坏以及表层剥离。从图 10 中可以看出,两者所得应力-应变曲线比较接近,但也存在一些差异。首先,数值模拟所得应力-应变曲线没有孔隙裂隙压密阶段,初始阶段为弹性变形阶段,这是因为 PFC^{2D}模型中颗粒生成时即为紧密接触;其次,数值试样残余强度接近于零,而岩石试样破坏后存在

一定的残余强度,这与 PFC^{2D}模型的建模原理有关。由于数值模拟方法对实际复杂问题都进行了一定的简化,因此所得结果不可能与实际结果完全吻合。

3.3 讨论

一些研究人员试图通过岩石单轴压缩试验所标定的细观参数研究岩石双向加载下的力学性质^[14-15]。本文同样建立了灰岩的单轴压缩 PFC^{2D}模型,那么其是否可用于研究灰岩双向加载下的力学性质,下面将对这个问题进行探讨。对 $\tan \varphi_b$ 和

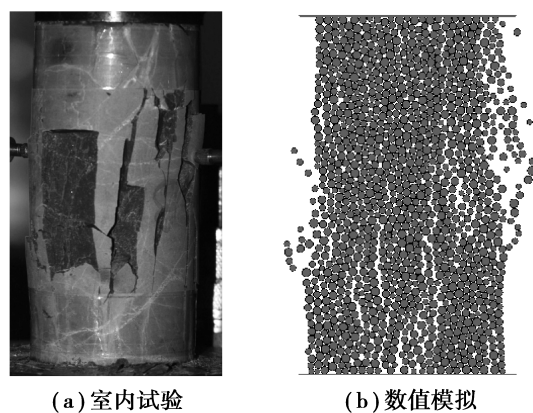


图9 单轴压缩下岩样破坏形态

Fig. 9 Rock failure pattern of uniaxial compression test

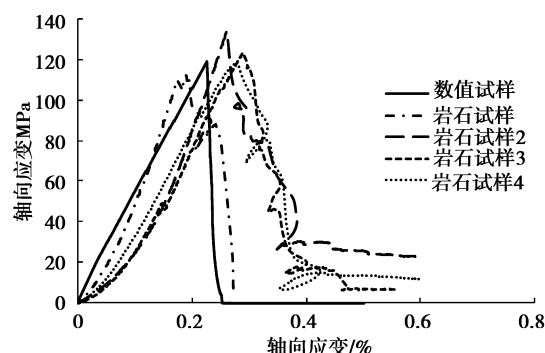


图10 应力-应变曲线对比

Fig. 10 Comparison of stress-strain curves

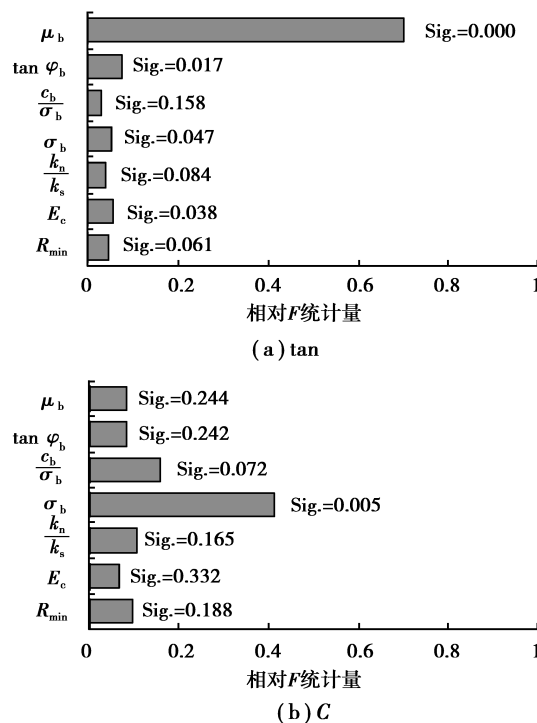
μ_b 两个参数直接取定为0.5,而这两个参数在平直节理接触受到正应力时会发挥作用,如果对岩石施加围压,显然平直节理接触受到正应力会增大, $\tan\varphi_b$ 和 μ_b 两个参数即对岩石强度发挥作用。为了验证此观点,以表2中正交设计矩阵序列设定PFC^{2D}模型细观参数,设置围压5 MPa、10 MPa、15 MPa和20 MPa进行双轴压缩数值试验,并计算强度参数 $\tan\varphi$ 、 C 。同样进行多因素方差分析,所得结果如图11所示。

根据图11的结果可以得出如下结论:

(1) 图11(a)中 μ_b 对应的 $\text{Sig.} \leq 0.01$,对 $\tan\varphi$ 具有非常显著影响, $\tan\varphi_b$ 对应的 $\text{Sig.} \leq 0.05$,对 $\tan\varphi$ 具有显著影响。其余参数中仅 E_c 和 σ_b 对 $\tan\varphi$ 具有显著影响,但影响程度都不及 μ_b 和 $\tan\varphi_b$ 。这说明 $\tan\varphi_b$ 和 μ_b 虽然对单轴抗压强度的影响较小,但是它们对强度参数 $\tan\varphi$ 的影响大。

(2) 图11(b)中 σ_b 对应的 $\text{Sig.} \leq 0.01$,对 c 具有非常显著影响。其余参数皆未达到显著影响程度。

上述结论说明,对于采用平直节理接触模型所

图11 多因素方差分析的相对 F 统计量Fig. 11 Relative F -statistics of multi-factor analysis of variance

建立的单轴压缩PFC^{2D}模型,不能直接用于研究岩石双轴压缩下的力学性质,平行黏结模型同样如此。如要建立双轴压缩PFC^{2D}模型,还需进一步进行力学试验获取强度参数 $\tan\varphi$ 、 c ,并对细观参数 $\tan\varphi_b$ 和 μ_b 进一步进行标定。

4 结论

以平直节理接触模型作为颗粒接触本构模型,对PFC^{2D}模型细观参数进行正交设计,以多因素方差分析和量纲分析研究宏细观参数之间的关系,并对试错法提出建议。所得结论如下:

(1) E_c 对 E 的影响程度占据绝对优势; k_n/k_s 对 v 的影响程度占据绝对优势; σ_b 和 c_b/σ_b 对 σ_1 的影响程度占据主导地位; σ_b 对 σ_1 的影响程度占据绝对优势。

(2) E 与 E_c 之间具有线性函数关系, v 与 k_n/k_s 之间具有对数函数关系, σ_1 与 c_b 之间具有线性函数关系, σ_1 与 σ_b 之间具有线性函数关系。

(3) 根据宏细观参数之间的关系,提出了试错法标定细观参数的具体流程,并将其用于灰岩单轴压缩PFC^{2D}模型细观参数的标定中。数值模拟所得宏观参数、应力-应变曲线和破坏特征与室内试验结果相近,验证了本文方法的可行性。

(4) $\tan\varphi_b$ 和 μ_b 对单轴抗压强度的影响较小,

但是它们对强度参数 $\tan\varphi$ 的影响大,不能以岩石单轴压缩试验所标定的细观参数去研究双向加载下岩石的力学性质。如果要建立双轴压缩 PFC^{2D}模型,还需进一步进行力学试验获取强度参数 $\tan\varphi$ 、 c ,并对细观参数 $\tan\varphi_b$ 和 μ_b 进一步进行标定。

参考文献(References)

- [1] 明华军,刘草原,王银秀. 岩石结构面尺寸效应的数值仿真研究[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(2): 387-391. (Ming Huajun, Liu Caoyuan, Wang Yinxiu. Numerical simulation of size effect of rock structural plane [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2016,12(2):387-391. (in Chinese))
- [2] 刘洪磊,王培涛,杨天鸿,等. 基于离散元方法的花岗岩单轴压缩破裂过程的声发射特性[J]. 煤炭学报,2015,40(8):1790-1795. (Liu Honglei, Wang Peitao, Yang Tianhong, et al. Mechanical characteristics of granite under uniaxial compressive and AE monitoring test using particle flow code [J]. Journal of China Coal Society,2015,40(8):1790-1795. (in Chinese))
- [3] 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. An equivalent crystal model for mesoscopic behaviour of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(3):511-519. (in Chinese))
- [4] 倪红梅,黄彦华,刘相如. 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))
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 蒋明镜,方威,司马军. 模拟岩石的平行粘结模型微观参数标定[J]. 山东大学学报(工学版),2015,45(4):50-56. (Jiang Mingjing, Fang Wei, Sima Jun. Calibration of micro-parameters of parallel bonded model for rocks [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science Edition), 2015, 45 (4): 50-56. (in Chinese))
- [8] 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))
- [9] 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.
- [10] Poulisenn B A, Adhikary D P. A numerical study of the scale effect in coal strength [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2013,63:62-71.
- [11] 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):3821-3826. (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): 3821-3826. (in Chinese))
- [12] Deisman N, Ivars D M, Pierce M. PFC2D smooth joint contact model numerical experiments [A]// Proceedings of GeoEdmonton '08 [C]. Edmonton, Canada: GeoEdmonton '08 Organizing Committee,2008:83-87.
- [13] Buckingham E. On physically similar systems: illustrations of the use of dimensional equations [J]. Physical Review,1914,4(4):345-376.
- [14] 王云飞,郑晓娟,赵洪波,等. 双向加载煤岩变形与声发射特性颗粒流研究[J]. 工程地质学报,2015,23(6):1059-1065. (Wang Yunfei, Zheng Xiaojuan, Zhao Hongbo, et al. Characteristics of coal's strength deformation and acoustic emission under biaxial loading with particle flow code [J]. Journal of Engineering Geology,2015,23(6):1059-1065. (in Chinese))
- [15] 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))