

文章编号: 1000-7598 (2011) 02-0564-08

考虑力学参数关联的非均质煤概率模型

张春会¹, 赵全胜¹, 于永江²

(1. 河北科技大学 建筑工程学院, 石家庄 050018; 2. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 如何考虑煤的力学参数之间的关联性是非均质煤储层模拟的关键。通过试验获得了阜新五龙矿某工作面 102 组煤样的弹性模量、单轴抗压和抗拉强度, 定义了弹性模量无量纲因数、单轴抗压强度无量纲因数和抗拉强度无量纲因数及拉弹因数比、压弹因数比 5 个物理参数, 并对试验数据进行统计分析, 结果表明, (1) 煤的弹性模量、单轴抗压强度和抗拉强度均具有统计分布特征, 可以用 Weibull 分布描述; (2) 弹性模量因数、单轴抗压强度因数和抗拉强度因数三者之间存在关联性; (3) 拉弹因数比和压弹因数比都符合 Weibull 分布。以弹性模量为基准, 建立了考虑参数关联的非均质煤随机概率模型, 开发了相应的虚拟煤体生成程序。研究了 2 个数值算例, 算例 1 分别按考虑力学参数关联和不考虑力学参数关联两种方法生成煤的力学参数, 并与试验数据进行对比, 结果表明, 前者获得的结果与试验数据更接近; 算例 2 对比了 2 种方法赋值的平面应变煤样单轴压缩下的宏观应力-应变曲线和煤样破坏过程, 结果表明, 考虑力学参数关联比不考虑力学参数关联得到的模拟结果更合理, 利用文中模型能更好地模拟煤的非均质力学特性。

关 键 词: 力学参数关联; 非均质煤; 随机概率模型

中图分类号: O 319.56

文献标识码: A

Probability model of heterogeneous coal considering correlation of mechanical parameters

ZHANG Chun-hui¹, ZHAO Quan-sheng¹, YU Yong-jiang²

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China;

2. School of Mechanics and Engineering Science, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: How to consider the relevance of mechanical parameters of heterogeneous coal is a key issue to simulate coal bed. The 102 sets of experimental data including elastic modulus, uniaxial compressive strength and tension strength are derived from Wulong Mine of Fuxin city. Five dimensionless physical parameters including index of elastic modulus, index of uniaxial compressive strength, index of tension strength, index ratio of tension vs. elastic modulus (IRTE) and index ratio uniaxial of compressive strength vs. elastic modulus (IRUCE) are defined. Statistical analysis of the data shows that (1) Elastic modulus, uniaxial compressive strength and tension strength all follow statistical distribution, and may be fitted by Weibull distribution. (2) Indices of elastic modulus, uniaxial compressive strength and tension strength are correlative. (3) IRTE and IRUCE follow Weibull distribution. Then the probability model of heterogeneous coal with the correlation of the mechanical parameters is presented. The corresponding virtual generating system is developed. Two numerical cases are studied. In case 1 the virtual coal samples and the mechanical parameters are generated with the correlation and without the correlation of mechanical parameters, respectively; and the verifications are performed. The results show that the data from the former method are nearer to the experimental data. In case 2, the macroscopical stress-strain curve and the failure process of the numerical coal sample from the both methods under the conditions of plane strain and uniaxial compression are studied. The simulating results from the former method are much better. Therefore the model proposed is a better way to simulate the mechanical heterogeneity of coal.

Key words: correlation of mechanical parameters; heterogeneous coal; probability model

1 前 言

煤是一种具有复杂力学性质的非均质材料。在

外力作用下, 细观单元体力学性质的不均匀导致煤内部不断萌生微破裂, 微破裂汇合、延展、成核, 直至破坏, 从而引起岩爆、崩塌等灾害。因此, 模

收稿日期: 2010-04-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 50434020); 河北省自然科学基金项目 (No. E2010000872); 住房和城乡建设部项目 (No. 2010-k2-15); 河北省教育厅项目 (No. Z2009315)。

第一作者简介: 张春会, 男, 1976 年生, 博士, 副教授, 主要从事非均质、裂隙岩体数值方法方面的研究工作。E-mail: zhangchunhui789@126.com

拟煤的非均质力学特性及非线性响应一直为众多学者所关注,并提出了若干模型^[1],其中基于统计的连续介质力学模型是重要的一种。该模型的基本思路是将工程岩体(煤)单元化(小单元),对每一个单元利用随机模拟方法赋予力学参数,从而建立工程岩体(煤)的数值模型。这种方法已为国内外许多学者采用^[2-9],取得了较好效果。但这种方法也存在缺陷,即在模拟过程中,假设每一单元的力学参数之间(如弹性模量和单轴抗压强度)彼此相互独立,互不关联,在单元力学参数赋值过程中,单元的各个参数都采用随机方法赋值,赋值的随意性太大,赋值结果有时不甚合理,如一个单元可能弹性模量很大,而单轴抗压强度很低,这通常与试验结果不符。文献[10]对此指出,岩石的宏观力学行为本质上是大量单元的集体效应,每个单元的个体行为对宏观性质的影响有限,如采用足够数量的单元,则这种赋值存在的随机性对岩石宏观力学行为的影响不大。但多少单元数量能满足“足够数量的单元”的要求,尚没有一个明确说法。另外,划分大量单元也极大增加了计算量和计算难度。因此,探讨单元力学参数间的关联特征和规律,减少随机模拟赋值的随意性是材料非均质力学特性模拟的重要课

题。冯增朝等^[11]在模拟中将单元弹性模量视作一个随机变量,用 Weibull 分布模拟,单轴抗压强度则线性依赖于弹性模量,以考虑单轴抗压强度和弹性模量之间的依赖关系。但试验表明,尽管单轴抗压强度对弹性模量有很大依赖性,但二者之间并非严格的线性比例关系,而是具有很大的随机特征。

本文从阜新五龙矿 323 工作面取样,并进行力学试验,获取了 102 组弹性模量、单轴抗压强度和抗拉强度数据,通过统计分析,建立了考虑力学参数关联的非均质煤随机概率模型,并开发了相应的数值模拟软件。

2 试验结果及分析

2.1 试验概况及结果

从阜新五龙矿 323 工作面不同位置取样 247 块煤,每一块煤制作 2 个标准煤试样,制作成了 134 组煤试样(每组 2 个标准煤试样),然后进行力学试验。每组煤试样中,一个试样测试弹性模量和单轴抗压强度。另一个试样测试抗拉强度(采用直接拉伸法测定),试验中一些试样抗拉强度试验失败,最后获得了 102 组弹性模量、单轴抗压强度和抗拉强度试验数据,数据列于表 1。

表 1 五龙矿 323 工作面煤样力学参数试验数据
Table 1 Mechanical experimental data of the coal samples from 323 working face, Wulong Mine

试样 编号	弹性模量 /MPa	抗拉 强度 /MPa	抗压 强度 /MPa	试样 编号	弹性 模量 /MPa	抗拉 强度 /MPa	抗压 强度 /MPa	试样 编号	弹性 模量 /MPa	抗拉 强度 /MPa	抗压 强度 /MPa	试样 编号	弹性 模量 /MPa	抗拉 强度 /MPa	抗压 强度 /MPa
1	976	0.44	2.68	27	1 108	0.48	3.12	53	730	0.59	3.03	79	787	0.35	1.53
2	887	0.46	2.84	28	1 118	0.51	3.12	54	807	0.56	2.73	80	1 436	0.78	2.22
3	928	0.60	2.68	29	1 262	0.53	3.06	55	985	0.54	2.82	81	790	0.38	2.14
4	866	0.43	3.07	30	999	0.41	2.88	56	1 114	0.53	3.33	82	1 072	0.54	3.66
5	915	0.64	3.13	31	1 229	0.41	3.23	57	811	0.47	2.66	83	1 097	0.73	3.32
6	895	0.45	2.90	32	1 117	0.50	2.94	58	964	0.38	2.94	84	732	0.15	2.16
7	1 205	0.60	3.81	33	844	0.49	2.93	59	1 061	0.42	3.06	85	947	0.49	3.34
8	1 324	0.58	4.13	34	1 393	0.50	2.94	60	1 061	0.49	3.03	86	1 083	0.46	2.94
9	1 197	0.40	3.66	35	1 285	0.65	3.63	61	1 010	0.49	2.97	87	959	0.57	2.92
10	744	0.45	1.72	36	1 135	0.49	2.78	62	1 162	0.48	2.49	88	873	0.51	2.96
11	1 525	0.50	3.33	37	1 044	0.50	3.99	63	924	0.50	3.15	89	1 139	0.55	3.18
12	993	0.59	3.46	38	1 013	0.60	3.84	64	1 238	0.43	3.12	90	1 160	0.49	2.92
13	851	0.31	3.31	39	745	0.44	1.68	65	1 003	0.45	3.36	91	717	0.50	2.93
14	804	0.22	2.58	40	1 372	0.71	3.91	66	1 113	0.49	3.19	92	1 109	0.46	2.85
15	907	0.47	3.09	41	948	0.41	2.62	67	1 001	0.48	2.87	93	1 046	0.48	2.98
16	1 134	0.28	3.29	42	1 061	0.63	2.73	68	1 013	0.60	3.84	94	1 001	0.50	3.02
17	900	0.46	2.72	43	776	0.32	2.56	69	1 209	0.53	2.82	95	893	0.42	3.15
18	1 032	0.48	3.89	44	950	0.48	3.48	70	1 389	0.35	5.43	96	969	0.58	2.81
19	892	0.30	3.23	45	1 540	0.74	5.09	71	721	0.26	2.75	97	906	0.58	3.24
20	1 056	0.57	1.66	46	1 129	0.61	3.94	72	977	0.29	3.17	98	833	0.50	3.22
21	930	0.51	3.32	47	1 084	0.46	3.72	73	754	0.34	1.88	99	1 134	0.28	3.29
22	978	0.36	2.33	48	884	0.44	2.73	74	763	0.49	2.52	100	895	0.45	2.90
23	724	0.41	2.11	49	1 273	0.72	3.58	75	895	0.43	1.56	101	745	0.44	1.68
24	779	0.42	2.84	50	708	0.36	2.15	76	813	0.37	2.66	102	895	0.44	1.50
25	1 057	0.56	2.89	51	1 030	0.38	3.12	77	1 186	0.55	2.33				
26	927	0.39	2.79	52	1 074	0.51	3.85	78	844	0.36	1.57				

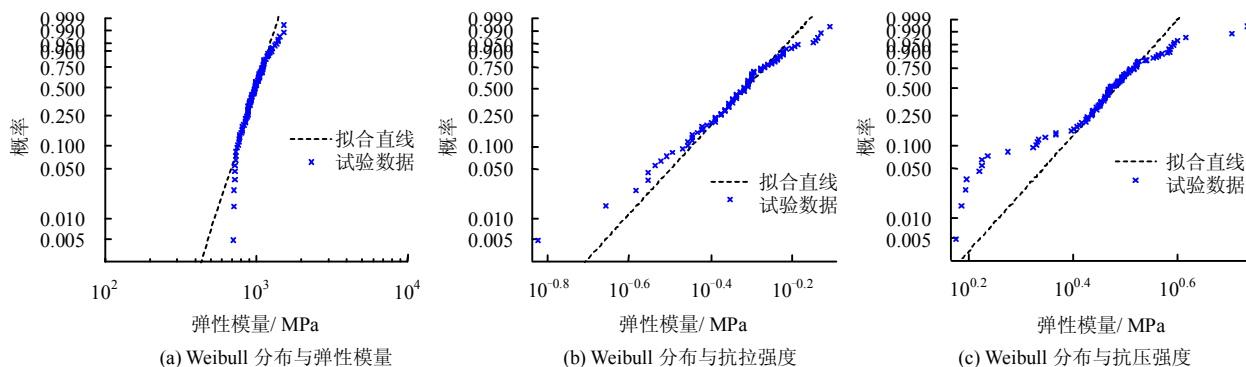


图 1 试验数据的概率图

Fig.1 Probability plot of experiment data

2.2 试验结果分析

(1) 力学参数的统计分布规律

在已有研究中^[4], 岩石力学参数一般假设服从 Weibull 分布, 密度函数为

$$f(x) = m\beta^{-m} \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^m\right] \quad (1)$$

式中: β 、 m 为统计参数, 由试验数据通过统计分析确定。

本文利用表 1 中的试验数据和概率纸法^[12]对这一假设的可靠性予以验证。

概率纸法的基本原理可参考文献[12], 按标准步骤构造了 Weibull 分布的概率纸, 并将表 1 中的弹性模量、单轴抗压强度和单轴抗拉强度试验数据绘于概率纸图上, 如图 1 所示。从图 1 可见, 弹性模量、抗拉强度、抗压强度的绝大部分试验数据在概率图中的拟合直线附近, 表明这 3 个参数近似服从 Weibull 分布。通过统计分析, 获得试验数据 Weibull 分布统计参数见表 2。

表 2 试验数据拟合的统计参数

Table 2 Statistical parameters of experimental data

分布参数	试验数据		
	弹性模量	抗拉强度	抗压强度
β / MPa	1 081	0.52	3.2
m	5.5	4.7	4.6

按照以往研究方法, 在得到力学参数 (表 2) 统计值后, 就把弹性模量、单轴抗压强度和抗拉强度分别视作相互独立的随机变量, 为煤的微元体赋值, 利用这种方法为煤的微元体力学参数赋值时存在较大的盲目性, 本文给出一种考虑力学参数间关联的赋值方法。在这之前, 需要研究力学参数之间的关联规律。

(2) 力学参数间的关联规律

为了观察力学参数之间的关联规律, 定义如下

无量纲因数:

$$\zeta_i = S_i / \bar{S} \quad (2)$$

式中: S_i 为第 i 个单元的力学参数值, 分别为弹性模量、单轴抗压强度和抗拉强度; $\bar{S}$ 为力学参数均值, 分别为弹性模量、单轴抗压强度和抗拉强度均值。

利用式 (2) 整理表 1 中数据, 得到弹性模量、单轴抗压强度和抗拉强度的无量纲因数, 如图 2 所示。

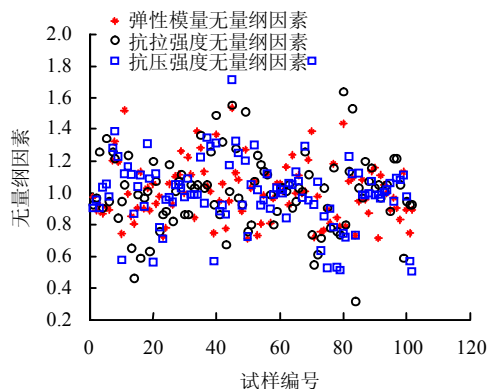


图 2 力学参数无量纲因数

Fig.2 Dimensionless indexes of mechanical parameters

从图 2 可见, 弹性模量因数、单轴抗压强度因数和抗拉强度因数之间具有如下特点: ① 3 个因数随机分布于 1 附近两侧; ② 在试验数据中, 弹性模量因数大于 1 共出现 46 次, 对应的单轴抗压强度因数大于 1 共出现了 32 次, 对应的抗拉强度因数大于 1 共出现了 35 次。由此可知, 3 因数之间具有关联性, 当弹性模量因数大于 1 时, 对应的单轴抗压强度因数和抗拉强度因数大于 1 的概率大, 但也存在小于 1 的概率; ③ 3 因数之间的关系不能用简单的关系式表达, 需要利用概率方法描述。为了描述这三者之间的关联规律, 以弹性模量为基准, 定义单轴抗压强度因数 (或抗拉强度因数) 与弹性模量因

数之比为压弹因数比(或拉弹因数比),其表达式分别为

$$R_{i\text{压弹}} = \frac{\zeta_{i\text{抗压}}}{\zeta_{i\text{弹模}}}; R_{i\text{拉弹}} = \frac{\zeta_{i\text{抗拉}}}{\zeta_{i\text{弹模}}} \quad (3)$$

利用式(3)计算压弹因数比和拉弹因数比,将其点绘于图3,并对其进行统计分析,表明压弹因数比和拉弹因数比近似符合 Weibull 分布,采用概率纸法进行检验,所得到的 Weibull 分布概率图如图4、5所示。

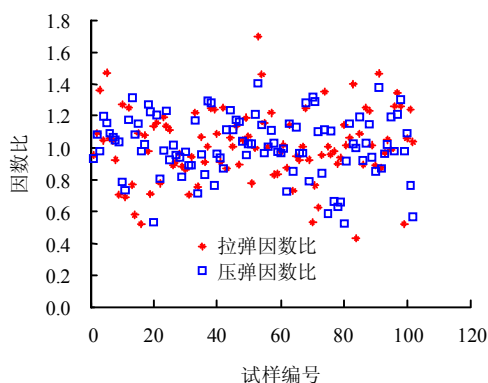


图3 拉弹因数比和压弹因数比
Fig.3 IRTE and IRUCE

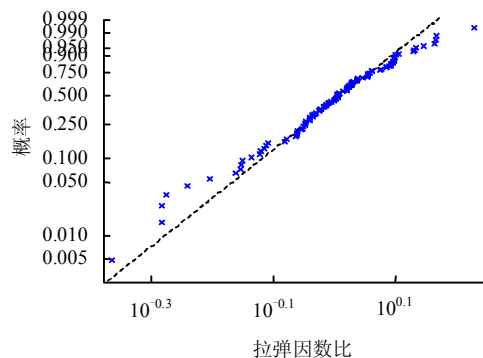


图4 拉弹因数比 Weibull 分布概率图
Fig.4 Probability plot of IRTE

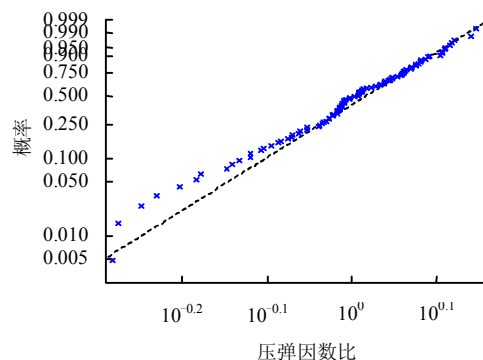


图5 压弹因数比 Weibull 概率图
Fig.5 Probability plot of IRUCE

从图4、5可见,拉弹因数比和压弹因数比数据基本上在概率图中的拟合直线附近,表明拉弹因数比和压弹因数比都近似服从 Weibull 分布,拟合统计参数如表3所列。

表3 拉弹因数比和压弹因数比拟合结果
Table 3 Fitting results of IRTE and IRUCE

分布参数	拟合结果	
	拉弹因数比	压弹因数比
β	1.01	1.09
m	4.95	6.30

下面给出考虑力学参数关联的非均质煤随机概率模型。

3 考虑力学参数关联的非均质煤随机概率模型

从以上分析可见,煤的力学参数弹性模量、单轴抗压强度和抗拉强度之间具有关联性,以弹性模量为基准,这种关联性可以用拉弹因数比和压弹因数比来描述。统计分析表明,压弹因数比和拉弹因数比近似符合 Weibull 分布,因此可以以弹性模量为基准,利用概率方法建立考虑力学参数关联的非均质煤单轴抗压强度和抗拉强度的随机概率赋值模型。

下面以单轴抗压强度为例介绍如何利用试验数据及统计分析结果,实现考虑力学参数关联的参数赋值模型:

①确定研究区域,通过试验测得研究域内多煤样的弹性模量和单轴抗压强度,计算弹性模量均值 $\bar{E}$ 和单轴抗压强度均值 $\bar{\sigma}$ 。

②对弹性模量进行统计分析,确定其分布规律及统计参数。

③计算弹性模量和单轴抗压强度的无量纲因数。

④计算压弹因数比,统计分析,确定压弹因数比 Weibull 分布参数 β 和 m 。

⑤将研究域划分单元,依据得到的弹性模量统计分布规律和统计参数,利用随机模拟技术为单元弹性模量赋值。

⑥对于某一 i 单元,按如下方法完成单轴抗压强度赋值:利用式(2)计算弹性模量无量纲因数 $\zeta_{i\text{弹模}}$;利用步骤④中确定的压弹因数比 Weibull 分布参数 β 、 m ,生成参数为 β 和 m 的 Weibull 随机数 R_i ,并将其作为该单元的压弹因数比;利用式

(3)计算该单元的单轴抗压强度无量纲因数 $\zeta_{i\text{抗压}}$;由式(2)可以得到该单元的单轴抗压强度为:

$\sigma_i = \bar{\sigma} \zeta_{i\text{抗压}}$, 从而完成了该单元的单轴抗压强度赋值。

⑦重复上述步骤, 完成对区域内所有单元的参数赋值。

⑧其他参数赋值也遵循同样的赋值过程完成赋值。

基于上述步骤在 Matlab 平台下开发了考虑参数关联的非均质煤储层模拟程序 SSHC (Simulation System of Heterogeneous Coal)。

4 数值算例

算例 1. 天然煤是一种非均质材料, 可以看做由大量微元体 (单元) 组成, 然而就目前研究水平而言, 通过试验方法研究细观单元体的变形和强度特性极为困难, 因此, 试图通过试验逐一测定煤细观单元体强度和变形参数, 再与本文数值模拟方法得到的细观单元体强度和变形参数对比, 以验证本文模型正确性是极为困难的。

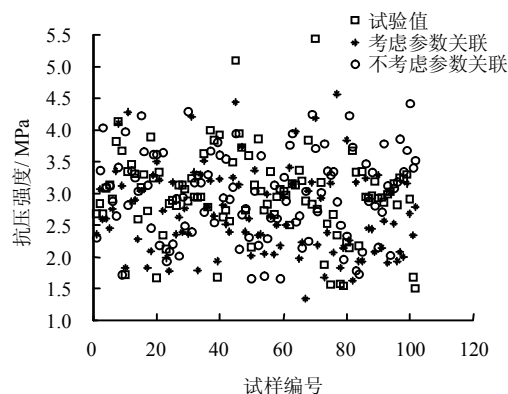
数值算例 1 利用煤样宏观力学试验数据 (表 1) 验证本文模型的合理性。具体步骤为: ①假设表 1 中的弹性模量试验数据为已知; ②按本文模型, 考虑力学参数关联, 利用表 2 中的拟合参数生成单轴抗压强度和抗拉强度; ③不考虑参数关联, 利用表 1 中的拟合参数随机生成单轴抗压强度和抗拉强度; ④对比两种模拟方法的结果与试验数据的拟合程度。

依据上述方案进行数值模拟得到的结果如图 6 所示。对试验数据与模拟数据之间的吻合程度采用相关系数来描述, 结果见表 4。表 4 中, 模拟次数指的是第几次模拟之意, 由于采用的是随机模拟, 每次模拟结果并不完全相同, 为了避免随机模拟的偶然性造成的总体规律改变, 而进行了多次模拟。从图 6 和表 4 可见, 总体上本文提出的考虑参数关联的参数方法所获得的参数值与试验值的吻合程度远大于不考虑参数关联的赋值方法, 表明本文方法能从一定程度上减少随机赋值的盲目性, 是一种有价值的参数赋值方法。

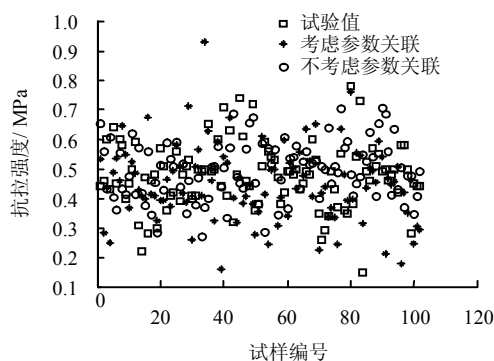
算例 2. 将 SSHC 与数值计算程序结合, 就可以建立考虑力学参数关联的非均质煤数值分析模型, 并进行计算分析。本文将 SSHC 与 ITASCA 公司开发的 FLAC 软件结合, 模拟非均质煤的破坏过程, 具体过程为: ①根据问题需要, 在 FLAC 中划分计算单元。②根据大量煤样的力学试验数据, 确定考虑力学参数关联的非均质煤随机概率模型赋值

所需的力学和统计参数。③利用 SSHC 为每一个计算单元生成对应的力学参数 (弹性模量、抗拉强度、内摩擦角), 并写于 “计算参数.dat” 文件内。④在 FLAC 中编写 Fish 函数, 读入 “计算参数.dat” 内的数据, 并为每一个计算单元赋值。⑤施加初边值条件, 进行计算分析。

基于上述步骤, 在 FLAC 中利用 Fish 函数方法予以实现, 并进行了数值算例分析。



(a) 抗压强度, 第 1 次模拟



(b) 抗拉强度, 第 1 次模拟

图 6 模拟数据和试验数据对比

Fig.6 Test and simulating data of strength

表 4 模拟结果的统计分析

Table 4 Statistical analysis of simulating data of strength

类型	模拟次数	模拟值与试验值相关系数	
		考虑参数关联	不考虑参数关联
抗压强度	1	0.390	-0.037
	2	0.437	-0.037
	3	0.360	0.151
	4	0.434	0.033
抗拉强度	1	0.297	0.007
	2	0.281	-0.093
	3	0.308	0.071
	4	0.243	0.152

数值算例研究的是平面应变条件下煤的单轴压缩过程。模拟煤样尺寸为 $0.4\text{ m} \times 0.2\text{ m}$, 试样两端面是光滑的, 在试样的上端面施加常速度 $v_0 = 3.0 \times 10^7$ 米/步, 计算在小应变模式下进行。将试样划分为若干正方形单元, 单元边长 0.004 m , 本构模型采用内嵌的摩尔模型, 计算总时间步为 $6\ 000$ 步, 数值算例煤样的边界条件如图 7 所示。

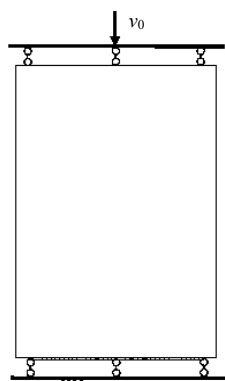


图 7 数值算例煤样的边界条件
Fig.7 Boundary condition of case

算例参数由本文试验成果分析获得。本文采用 2 个计算方案, 第 1 方案采用本文的考虑参数关联的赋值方法生成虚拟煤样, 第 2 方案是不考虑参数关联生成虚拟煤样。

方案 1 中计算使用的参数为: 弹性模量的统计参数 $\beta = 1\ 081\text{ MPa}$, $m = 5.5$; 抗拉强度的均值为 0.52 MPa , 拉弹因数比的统计参数 $\beta = 1.01$, $m = 4.95$; 黏聚力均值为 0.92 MPa , 黏聚力与弹性模量因数比的统计参数 $\beta = 1.09$, $m = 6.30$; 内摩擦角为 30° , 单轴抗压强度为 3.1 MPa , 剪胀角为 0 , 泊松比为 0.2 。方案 2 中使用的参数为: 弹性模量的统计参数 $\beta = 1\ 081\text{ MPa}$, $m = 5.5$; 抗拉强度的统计参数 $\beta = 0.52\text{ MPa}$, $m = 4.7$; 内摩擦角为 30° , 剪胀角为 0 , 单轴抗压强度为 3.1 MPa , 泊松比为 0.2 ; 黏聚力的统计参数 $\beta = 0.92\text{ MPa}$, $m = 4.6$ 。

按照上述方案, 生成数值煤样, 然后进行计算, 图 8 为 2 种方案得到的应力-应变曲线。从图中可以看出, 方案 1 中的极限抗压强度 (3.04 MPa) 比方案 2 中的极限抗压强度 (2.89 MPa) 略大, 但不超过 3% , 同时方案 1 更接近给定的单轴抗压强度 (3.1 MPa), 可见方案 1 的计算结果略好, 这表明本文方法具有一定的进步性。另外, 从图可以看出, 这两种方法得到的宏观应力-应变曲线近似一致。

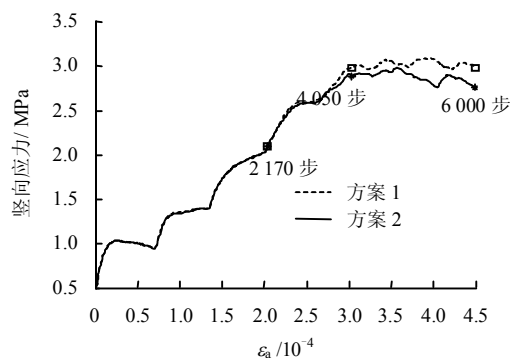


图 8 宏观应力-轴向(竖向)应变曲线
Fig.8 Stress-strain curves of case

图 9、10 分别为方案 1、2 的破坏过程和剪切应变增量等值线图。从图可以看出, 当时间步较小时, 煤样内部部分单元发生了破坏, 破坏单元分布较为随机。随着时间步的增加, 一些缺陷开始沿轴向长大, 随后, 沿轴向长大的缺陷越来越多, 几乎所有的缺陷都有机会发生沿轴向的长大。然而, 长大的缺陷并未在轴向无限制的增长。当缺陷长大到一定程度时, 相邻的平行缺陷(雁列)可能存在显著的相互影响和作用, 致使部分长大的缺陷在倾斜的方向上聚结, 初步形成了倾斜、断续、狭窄的剪切破裂带(剪切带, 见 4 050 步图形)。

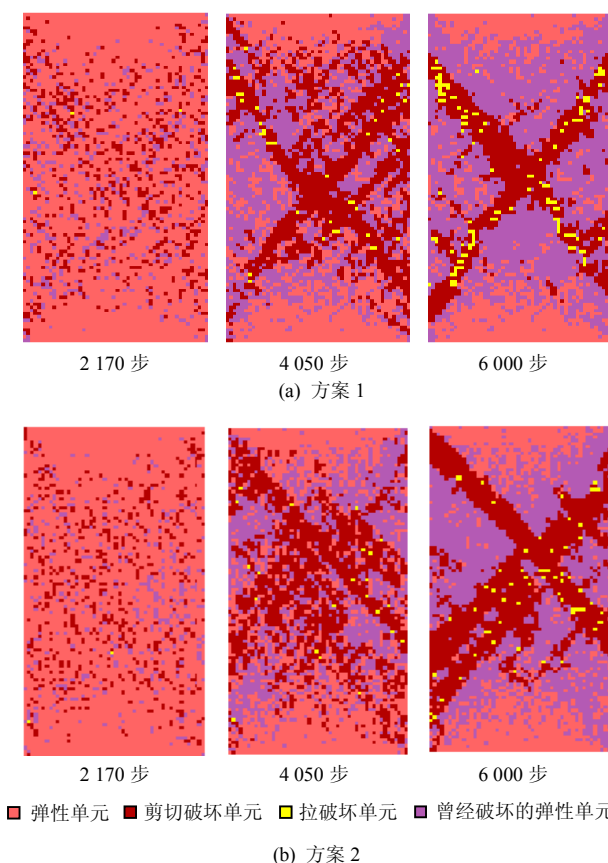


图 9 方案 1 和方案 2 的破坏过程
Fig.9 Failure patterns

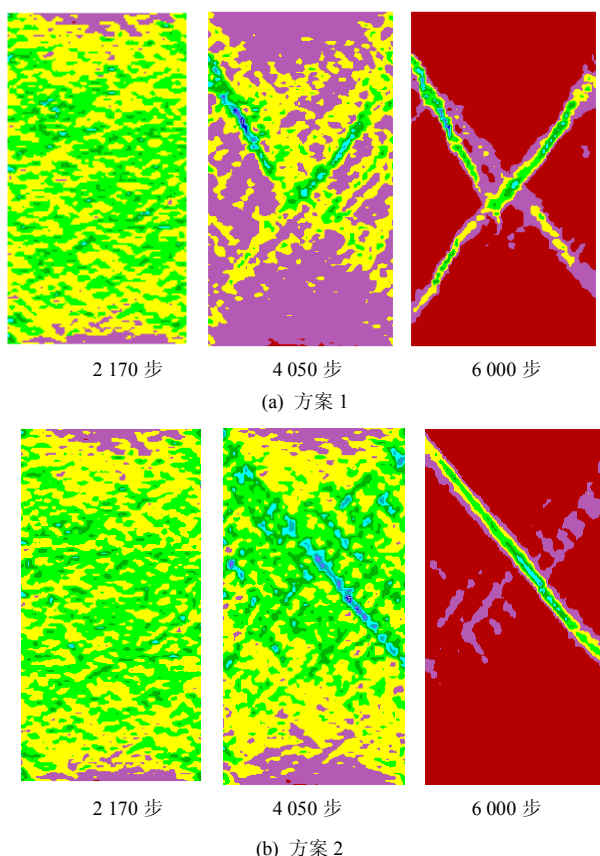


图 10 方案 1 和方案 2 的剪切应变增量等值线图

Fig.10 Shear strain increment contour

当倾斜的剪切带初步形成之后,煤样沿剪切带方向的错动越来越明显,致使剪切带方向上的其他未发生破坏的单元都发生了剪切破坏。因而,剪切带看起来更连续、平直、宽阔(见 6 000 步图形)。参考文献[13],两种模拟方案都获得了较为合理的结果,这表明本文模拟方法有效。

对比图中方案 1 和方案 2 的破坏过程和剪切应变增量等值线图发现,方案 1 获得的剪切带是较对称的 2 条 x 型共轭剪切带,相比较而言方案 2 的这种特征要模糊一些。从图也可以看出,方案 2 的破坏单元要多于方案 1,从这些特征结合以往试验经验,认为方案 1 的模拟效果更好一些。

5 结 论

(1) 利用本文模型(考虑力学参数关联的非均质煤随机概率模型)得到的力学参数模拟值更接近于试验数据,本文模型合理。

(2) 分别利用本文模型和不考虑力学参数关联的赋值模型得到了煤样宏观应力-轴向应变曲线,结果表明两者相差不多,但前者得到的单轴抗压强度与给定值更接近一些,表明本文模型更合理一些。

(3) 分别利用本文模型和不考虑力学参数关联

的赋值模型再现了非均质煤样内破裂萌生、发展、汇集及宏观裂纹形成的全过程,表明利用本文模型能更好地模拟非均质煤的非线性破坏过程。

(4) 由于煤的复杂性,利用本文模型也不能达到对真实煤的“精确”模拟,这可以从表 4 和表 5 的试验数据与模拟数据的相关系数(0.3 左右)可以看出。然而,相比于以往研究,本文方法考虑了力学参数的关联性,从而在模拟过程中减少了赋值的盲目性,使得模拟结果更好一些。

在下一步的研究中,将进一步加强对本文模型合理性的验证,如引入白光数字散斑方法(DSCM)观测煤样变形局部化行为,并与数值结果进行对比,进一步验证本文方法的合理性。

参 考 文 献

- [1] JING L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2003, 40(3): 283—353.
- [2] SCHOLZ C H. Micro-fracturing and the inelastic deformation of rock in compression[J]. *J. Geophys. Res.*, 1968, 73(4): 1417—1432.
- [3] HUDSON J A, FAIRHURST C. Tensile strength, Weibull's theory and a general statistical approach to rock failure[C]//The Proceedings of the Southampton 1969 Civil Engineering Materials Conference. [S. l.]: [s. n.], 1969: 901—914.
- [4] TANG C, LIU H, LEE PKK, et al. Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression——part I: Effect of heterogeneity[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2000, 37(4): 555—569.
- [5] 梁正召,唐春安,张永彬,等.准脆性材料的物理力学参数随机概率模型及破坏力学行为特征[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(4): 718—727.
LIANG Zheng-zhao, TANG Chun-an, ZHANG Yong-bin, et al. On probability model of physico-mechanical parameters of quasi-brittle materials and associated mechanical failure behaviors[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(4): 718—727.
- [6] FANG Z, HARRISON J P. Development of a local degradation approach to the modelling of brittle fracture in heterogeneous rocks[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2002, 39(4): 443—457.

- [7] FANG Z, HARRISON J P. A mechanical degradation index for rock[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, 2001, 38(8): 1193—1199.
- [8] 张春会, 于永江, 赵全胜. 非均匀煤岩渗流-应力弹塑性耦合数学模型及数值模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2837—2842.
ZHANG Chun-hui, YU Yong-jiang, ZHAO Quan-sheng. Seepage-stress elastoplastic coupling model of heterogeneous coal and numerical simulation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(9): 2837—2842.
- [9] 张春会. 非均匀、随机裂隙展布岩体渗流应力耦合模型[J]. 煤炭学报, 2009, 34(11): 1460—1464.
ZHANG Chun-hui. Seepage-stress coupled model of heterogeneous and random fractured rock mass[J]. **Journal of China Coal Society**, 2009, 34(11): 1460—1464.
- [10] 唐春安, 于广明, 刘红元, 等. 采动岩体破裂与岩层移动数值试验[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2003.
- [11] 冯增朝, 赵阳升, 段康廉. 岩石的细胞元特性及其非均质分布对岩石全曲线性态的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1819—1823.
FENG Zeng-chao, ZHAO Yang-sheng, DUAN Kang-lian. Influence of rock cell characteristics and rock inhomogeneity parameter on complete curve of stress-strain[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(11): 1819—1823.
- [12] 刘璋温, 戴树森, 方开泰. 概率论浅说[M]. 北京: 科学出版社, 1977.
- [13] CHAN K S, MUNSON D E, BONDERS S R, et al. Cleavage and creep of rock salt[J]. **Acta Materialia**, 1996, 44(9): 3553—3565.