

# 考虑节理裂隙尺寸与方位分布的岩石统计损伤本构模型研究

惠鑫<sup>1,2</sup>, 马凤山<sup>1,2</sup>, 徐嘉谟<sup>1,2</sup>, 郭捷<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 页岩气与地质工程重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为建立细观损伤与岩石宏观变形之间的定量关系, 基于岩石强度的 Weibull 概率分布特征, 结合损伤力学理论、统计强度理论与分形理论, 考虑节理裂隙尺寸为分形分布和方位为正态分布的情况, 建立岩石统计损伤本构模型和损伤演化方程, 分析了损伤演化途径。给出与裂隙尺寸、尺寸分形维数和产状相关的本构模型参数, 讨论了模型参数的物理意义和影响因素。结合前人试验测试结果加以验证, 分析了统计损伤本构模型的合理性与不足之处。

**关键词:** 岩石力学; 节理裂隙; 损伤; 分形; 统计强度; 本构模型; 损伤演化

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2017)增1-3233-06

## Study on statistical damage constitutive model for rocks considering length and occurrence distribution of joint fissures

HUI Xin<sup>1,2</sup>, MA Fengshan<sup>1,2</sup>, XU Jiamo<sup>1,2</sup>, GUO Jie<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Institute Shale Gas and Geoengineering, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** To establish the relationship between macroscopic deformation and mesoscopic structure defects, a statistical damage constitutive model for rocks is derived, using damage mechanics theory together with fractal theory and statistical mesoscopic strength theory based on the Weibull distribution. In statistical constitutive modeling, the fractal distribution of fissure size and normal distribution of occurrence are considered, the damage evolution equation and evolution mode are put forward. Model parameters related to fissure size, fractal dimension, and occurrence are derived, also the physical significance and influencing factors are analyzed. The constitutive model is verified by triaxial experiments on rock specimens which are made of similar simulation materials, its rationality and deficiency are also discussed.

**Key words:** rock mechanics; joint fissure; damage; fractal; statistical strength; constitutive model; damage evolution

## 1 引言

岩体中存在大量的节理、裂隙等不连续面, 其

结构具有复杂性和不规则性, 物理力学性质具有各向异性特征。研究表明, 作为组成岩体的基本单元, 岩石中因含有大量的裂隙, 其强度具有一定的统计特征; 岩石在受外力作用条件下还会产生新的裂

**收稿日期:** 2016-03-22; **修回日期:** 2016-05-17

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41372323, 41372325); 中国科学院战略性先导科技专项(B类)资助项目(XDB10030602)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 41372323 and 41372325) and Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences(Grant No. XDB10030602)

**作者简介:** 惠鑫(1992-), 男, 2014年毕业于长安大学岩土工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩石力学与地质灾害方面的研究工作。E-mail: iggcashx@sina.com

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0259

隙, 裂隙在产生、扩展的过程中也呈现出随机特征。因此, 分析岩石的损伤变形应采用统计损伤的方法<sup>[1-2]</sup>。

损伤力学理论与统计强度理论的结合是研究统计损伤本构模型的重要手段。前人在研究统计损伤本构模型时, 多认为岩石强度服从 Weibull 分布、标准正态分布、对数正态分布等<sup>[3-5]</sup>, 并取得了一定的认识。B. Basu 等<sup>[6]</sup>对 Weibull 分布提出了质疑, 认为 Weibull 分布可能并不是材料强度最合适的统计分布, 主张在应用该分布前, 应该细致分析材料强度试验数据。何浙浙等<sup>[7]</sup>在混凝土的统计强度试验研究中, 用正态分布和 Weibull 分布与试验结果比较, 出现了拟合不接受的结果。H. P. Xie 和 F. Gao<sup>[8]</sup>指出, 在不考虑裂隙分布方位时, 岩石强度近似符合 Weibull 分布<sup>[8]</sup>。随着分形几何的发展和对岩石、岩体细观和宏观物理力学特性间表现出的自相似性的研究, 分形理论在岩石统计强度研究中的运用日趋广泛<sup>[9]</sup>。

由于试验条件的限制, 考虑裂隙尺寸、尺寸分布和方位分布因素的 Weibull 分布研究很少, 在此基础上建立的统计损伤本构模型更不多见。为建立细观损伤与岩石宏观变形之间的定量关系, 进一步研究岩石统计损伤本构模型, 本文结合统计强度理论、分形几何方法, 断裂力学理论, 用考虑裂隙尺寸、尺寸分形分布和方位分布条件下 Weibull 强度分布的表达式, 初步建立了考虑节理裂隙尺寸和方位分布的统计损伤本构模型和损伤演化方程, 获得了与裂隙尺寸、尺寸分形维数以及产状密切相关的模型参数。讨论了损伤演化的可能途径、模型参数的物理意义和影响因素。结合前人试验结果加以验证, 认识到本构模型的合理性和有待改进之处。

## 2 岩石统计损伤本构模型与损伤演化

### 2.1 岩石强度 Weibull 分布与统计损伤本构模型建立

非均质性与各向异性是含损伤岩石的重要特征。一种或多种矿物组成的岩石内部含大量不同尺度的节理裂隙等缺陷。矿物力学性质的各向异性和不同矿物之间的差异性、节理裂隙力学性质大的差异性以及缺陷的随机演化, 使岩石物理力学性能具有复杂性。岩石块体与结构面复杂的组合关系使岩体强度具有明显的各向异性和随机分布特征。1951 年, W. Weibull<sup>[10]</sup>应用最弱环原理对强度的统计理论作了开创性的工作, 提出了 Weibull 统计分布。

三参数 Weibull 分布的一般形式<sup>[10]</sup>为

$$S(f) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{f - \sigma_u}{F} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中:  $\sigma_u$  为位置参数。

研究发现二参数的 Weibull 分布较三参数的 Weibull 分布拟合度高<sup>[11]</sup>。本文采用二参数的 Weibull 分布, 令式(1)中  $\sigma_u = 0$ , 其概率密度函数为

$$s(f) = \begin{cases} \frac{m}{F} \left( \frac{f}{F} \right)^{m-1} \exp \left[ - \left( \frac{f}{F} \right)^m \right] & (f > 0) \\ 0 & (f = 0) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $f$  为应力水平;  $m$  为 Weibull 模量, 代表材料的均匀性和可靠性;  $F$  为与材料物理力学性质有关的参数。

由最弱环原理, 含  $n$  个弱结构单元的岩石发生破坏的概率<sup>[10]</sup>为

$$Q(f) = 1 - \exp \left[ -n \left( \frac{f}{F} \right)^m \right] \quad (3)$$

损伤变量( $D$ )可以表征岩石损伤程度。对于含初始损伤的岩石, 损伤变量取值为 0 ~ 1。定义损伤变量为已破坏的微元数( $N_d$ )与总微元数( $N$ )的比值<sup>[3]</sup>:

$$D = \frac{N_d}{N} \quad (4)$$

岩石强度服从 Weibull 分布时, 含  $N$  个微元的岩石, 在应力区间( $x, x+dx$ )内发生破坏的微元数为

$$dN_d = Ns(f)dx \quad (5)$$

在某一应力水平  $f$  时, 已破坏的微元数为

$$N_d = \int_0^f dN_d = N[S(f) - S(0)] \quad (6)$$

不加载时损伤不发展,  $S(0) = 0$ , 损伤变量为

$$D = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{f}{F} \right)^m \right] \quad (7)$$

节理裂隙岩体损伤力学对于含非贯穿裂隙, 且呈随机分布的岩石材料具有较好的适用性<sup>[12]</sup>。当不考虑损伤影响下泊松比的变化时, 依据损伤力学理论中材料的本构关系, 三轴应力 ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) 下含损伤岩石的本构关系为

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1(1 - D) + \nu(\sigma_2 + \sigma_3) \quad (8)$$

岩石强度为 Weibull 分布时的统计损伤本构模型为

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1 \left\{ \exp \left[ - \left( \frac{f}{F} \right)^m \right] \right\} + \nu(\sigma_2 + \sigma_3) \quad (9)$$

式中:  $E$  为初始杨氏模量,  $\nu$  为初始泊松比,  $\varepsilon_1$  为

名义应变,  $\sigma_i (i = 1, 2, 3)$  为名义应力。

损伤演化方程为

$$D = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{f}{F} \right)^m \right] \quad (10)$$

分析得出, 统计损伤本构模型的构建, 除合理确定 Weibull 分布的参数之外, 仍需确定应力水平的合理表达式。

## 2.2 应力水平与考虑节理裂隙尺寸与方位分布时 Weibull 分布参数的确立

刘传孝等<sup>[13]</sup>发现, 岩石材料的微、细、宏观断裂分布的分形维数几乎相等, 得出岩石断裂机制存在无标度区域(0.002 ~ 4 000 mm)的结论, 因为岩石虽呈现非连续性特征, 但应用连续介质力学的本构关系来解决问题这一矛盾提供了一个有证据意义的解释。一个代表性单元中, 应力水平  $f$  可用岩石强度准则来表示<sup>[14]</sup>。采用可反映中间主应力影响的德鲁克-普拉格破坏准则, 并考虑等效应力原则及应变等效性假说,  $f$  为有效应力  $\sigma^*$  的函数, 其公式为

$$f = \alpha I_1^* + \sqrt{J_2^*} = K \quad (11)$$

其中,

$$\alpha = \frac{\sin \phi}{\sqrt{3(3 + \sin^2 \phi)}}, K = \frac{3c \cos \phi}{\sqrt{3(3 + \sin^2 \phi)}} \\ I_1^* = \sigma_1^* + \sigma_2^* + \sigma_3^*$$

$$J_2^* = \frac{1}{6} [(\sigma_1^* - \sigma_2^*)^2 + (\sigma_2^* - \sigma_3^*)^2 + (\sigma_3^* - \sigma_1^*)^2]$$

式中:  $c$  为黏聚力;  $\phi$  为内摩擦角;  $I_1^*$  为有效应力表示的应力张量第一不变量;  $J_2^*$  为应力偏量第二不变量;  $\alpha$  为材料参数;  $K$  为岩石自身强度参数, 与岩石材料参数有关;  $\sigma_i^* (i = 1, 2, 3)$  为有效应力。

在岩石力学试验中, 测不到有效应力, 要将应力水平用名义应力来表示, 需引入应变等效性假说。应变等效性是指名义应力下含损伤岩石产生的应变等价于有效应力下含损伤岩石产生的有效应变。

以应变等效性假说为前提, 结合虎克定律得出有效应力可以表示为

$$\sigma_i^* = \frac{\sigma_i E \varepsilon_i}{\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (12)$$

将式(12)代入式(11), 得到应力水平  $f$ <sup>[14]</sup> 为

$$f = \alpha \frac{E \varepsilon_1 (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)} + \frac{E \varepsilon_1}{\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)} \cdot \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{6}} \quad (13)$$

可见应力水平  $f$  与弹性模量、泊松比以及应力

状态等具有相关关系。

材料的损伤分布可看作分形网络, 即损伤材料是具有分形结构的材料。研究表明, 节理的空间分布方向、间距分布、长度分布以及表面粗糙度等都符合分形分布规律<sup>[15-18]</sup>。由分形的基本定义, 岩石中裂隙尺寸可<sup>[8-9, 19-20]</sup>表示为

$$n(l) = cl^{-d} \quad (14)$$

式中:  $n(l)$  为裂隙尺寸大于  $l$  的数目;  $l$  为 Griffith 半长;  $c$  为比例常数;  $d$  为尺寸分形维数, 当裂隙发生扩展演化时, 分形维数也相应发生变化。

尺寸分形分布的概率密度函数<sup>[19]</sup>为

$$f(l) = \frac{d}{l_0} \left( \frac{l}{l_0} \right)^{-(1+d)} \quad (15)$$

式中:  $l_0$  为最短裂隙尺寸。

统计研究表明, 多数情况下裂隙产状符合正态分布规律<sup>[21]</sup>。概率密度函数为

$$t(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} \left[ \exp - \frac{(\theta - \mu)^2}{2\delta^2} \right] \quad (16)$$

式中:  $\theta$  为裂隙方位角,  $\mu$  为平均值,  $\delta$  为标准差。

一条裂隙位于  $l \sim l + dl$  和  $\theta \sim \theta + d\theta$  间的概率为

$$P_1 = f(l)t(\theta)dl d\theta \quad (17)$$

裂隙扩展引发微元的破坏, 应力水平为  $f$  时, 一条裂隙的临界失稳尺寸为  $l_c$ , 微元破裂的概率为

$$P_2 = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} t(\theta) d\theta \int_{l_c}^{\infty} f(l) dl = \left( \frac{l_c}{l_0} \right)^{-d} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} t(\theta) d\theta \quad (18)$$

一条裂隙的扩展为损伤发展的局部性特征, 是由局部应力集中引起的, 是局部变形不协调的表现。在裂隙未贯穿岩石前, 并且其尺寸远小于所在岩块尺寸时, 可与断裂力学有机结合加以分析。裂隙尺寸远小于岩块尺寸且岩性较脆硬时, 裂隙扩展通常是由裂隙顶端局部高应力导致, 在细观尺度或局部可采用断裂力学方法处理。单元体的应力边界条件为一般压应力条件, 界面力为压挤性质时, 裂隙扩展方式可取 II 型裂纹形式<sup>[9]</sup>, 当应力水平达到  $f$  时临界尺寸<sup>[9]</sup>为

$$l_c = \frac{(2K_{\text{IIC}})^2}{\pi(1-\xi)^2(1+\nu)^4 f^2 \sin^2(2\theta)} = \frac{\sigma_1^2 l}{(1+\nu)^4 f^2} \quad (19)$$

其中,

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \xi < 1$$

$$K_{\text{IIC}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin(2\theta) \sqrt{\pi l}$$

式中:  $\theta$  为裂隙方位角。

令定积分  $\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} t(\theta) d\theta = A$ ,  $A$  为与方位角分布有关的常数。将式(19)代入式(18)得

$$P_2 = A \left[ \frac{\sigma_1^2 l}{l_0 (1+\nu)^4} \right]^{-d} f^{2d} \quad (20)$$

由最弱环原理, 含  $n_l$  条裂隙, 且裂隙尺寸为分形分布、方位角为正态分布时, 岩石破裂的概率为

$$P_3 = 1 - (1 - P_2)^{n_l} = 1 - \exp \left\{ -n_l A \left[ \frac{\sigma_1^2 l}{l_0 (1+\nu)^4} \right]^{-d} f^{2d} \right\} \quad (21)$$

将式(21)与 Weibull 分布形式下岩石破裂概率做比较得

$$A \left[ \frac{\sigma_1^2 l}{l_0 (1+\nu)^4} \right]^{-d} f^{2d} = \left( \frac{f}{F} \right)^m \quad (22)$$

式(22)两端对比得

$$m = 2d, F = A^{-\frac{1}{2d}} \frac{\sigma_1}{(1+\nu)^2} \sqrt{\frac{l}{l_0}} \quad (23)$$

式中:  $\sigma_1$  为每个微元的峰值强度点( $\varepsilon_c$ ,  $\sigma_c$ )对应的极限应力值, 取抗压强度值  $\sigma_c$ 。

杨圣奇等<sup>[22]</sup>认为, Weibull 分布中的参数  $m$ ,  $F$  为物理力学参数, 并得出了相应的表达式如下:

$$m = - \frac{\sigma_c}{[\sigma_c + (\delta - 1)E\varepsilon_c] \ln \left[ \frac{1}{\delta} \left( \frac{\sigma_c}{E\varepsilon_c} + \delta - 1 \right) \right]} \quad (24)$$

$$F = \varepsilon_c / \left[ \frac{1}{m} \frac{\sigma_c}{\sigma_c + (\delta - 1)E\varepsilon_c} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (25)$$

结合分形维数的几何意义可知考虑裂隙的尺寸因素时, Weibull 模量  $m$  反映了岩石内部结构特征, 与裂隙尺寸的分布分形维数密切相关, 可以通过微观结构的几何分析, 测定分布维数来得到 Weibull 模量。结构面产状服从正态分布时, 优势产状与平均产状一致<sup>[21]</sup>。参数  $F$  并非简单的物理力学参数, 而是物理力学参数与结构参数的综合, 且  $F$  和裂隙尺寸大小、尺寸分形维数、优势方位以及峰值强度有关。

### 2.3 考虑节理裂隙尺寸和方位分布的统计损伤本构模型与损伤演化方程

裂隙尺寸为分形分布, 方位为正态分布时, 岩石的统计损伤本构模型可表示为

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1 \left\{ \exp \left\{ - \left[ \frac{f}{A^{-\frac{1}{2d}} \frac{\sigma_c}{(1+\nu)^2} \sqrt{\frac{l}{l_0}}} \right]^{2d} \right\} \right\} + \nu(\sigma_2 + \sigma_3) \quad (26)$$

损伤演化方程为

$$D = 1 - \exp \left\{ - \left[ \frac{f}{A^{-\frac{1}{2d}} \frac{\sigma_c}{(1+\nu)^2} \sqrt{\frac{l}{l_0}}} \right]^{2d} \right\} \quad (27)$$

当应力状态、应变、裂隙的尺寸、尺寸分形维数和方位角发生变化时, 岩石的总损伤变化为

$$dD = \frac{\partial D}{\partial \varepsilon_1} d\varepsilon_1 + \frac{\partial D}{\partial \sigma_3} d\sigma_3 + \frac{\partial D}{\partial l} dl + \frac{\partial D}{\partial d} dd + \frac{\partial D}{\partial \theta} d\theta \quad (28)$$

损伤演化不仅与轴向变形、轴向应力、弹性模量、泊松比等有关, 而且与所处的应力状态、裂隙的尺寸、尺寸分形维数以及优势产状相关。损伤沿着轴向变形、围压、裂隙尺寸、尺寸分形维数和裂隙方位演化途径发展, 充分体现了岩石材料损伤变形的复杂性和非线性特征。

## 3 试验验证与分析

本文选用王谦源和李 晔<sup>[23]</sup>中相似模拟材料的试验数据, 试验围压为 0.2 MPa。模拟材料选用水泥、石膏为胶结材料, 砂为骨料, 配合比: 水泥 石膏 砂为 0.5 0.5 4, 用水量为试件质量的 1/6。试件为方柱体, 物理力学参数见表 1, 其中抗压强度、变形模量和泊松比为王谦源和李 晔<sup>[23]</sup>同一尺寸的三块试样的统计平均值。通过预置硫酸纸制作模拟裂隙(见图 1), 模拟原理见王谦源和胡京爽<sup>[20]</sup>, 裂隙聚集分形维数为 1.55, 长度分形维数为  $d = 1.6$ 。将参数代入本构模型得

表 1 试件物理力学参数表

Table 1 Physico-mechanical parameters of specimen

密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	抗压强 度/MPa	变形模 量/GPa	泊松比	高宽比	尺寸/ (cm×cm×cm)
2.4	2.8	3.297	0.279	2	12×12×24

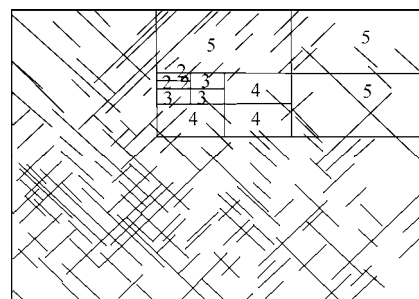


图 1 模拟节理分布示意图

Fig.1 Distribution of simulated joints

$$\sigma_1 = E\varepsilon_1 \left\{ \exp \left[ - \left( \frac{f}{0.548837\sqrt{l}} \right)^{3.2} \right] \right\} + 0.4\nu \quad (29)$$

节理详细参数见表 2，变形测量结果见表 3。

表 2 节理模拟参数取值与统计数据

Table 2 Simulated parameters of joints and statistical data

长度 维数	节理倾 角/(°)	节理 数/条	平均长 度/像素	最短/ 像素	最长/ 像素	最长节 理数/条
1.6	45	80	80	30	233	3
	135	80	80	30	233	3

表 3 变形测量结果

Table 3 Deformation test results

竖向荷载/kN	纵向应变/ $10^{-6}$	横向应变/ $10^{-6}$
4	72	15
8	150	35
12	233	56
16	312	78
20	391	101
24	471	124
28	553	148
32	634	172
36	723	196
40	809	221
44	900	246

图 2 为理论曲线与试验曲线比较图，图 3 为损伤演化曲线，鉴于王谦源和李 晔<sup>[23]</sup>试验数据较少，图 2 拟合曲线峰值后部分为通过损伤本构模型推算得出。由图 2 可知，理论曲线与试验曲线间有差异，但总体上有一定的吻合性，且峰值强度后的理论曲线与全应力应变曲线的趋势相同，反映本文考虑节理裂隙尺寸与方位因素来建立统计损伤本构模型的基本设想的合理性。

综合分析图 2、3 可以看出，应变未达到  $312 \times 10^{-6}$  时，损伤变量很小，基本未发生变化，此阶段对应的应力-应变曲线近线性，为弹性损伤变形阶

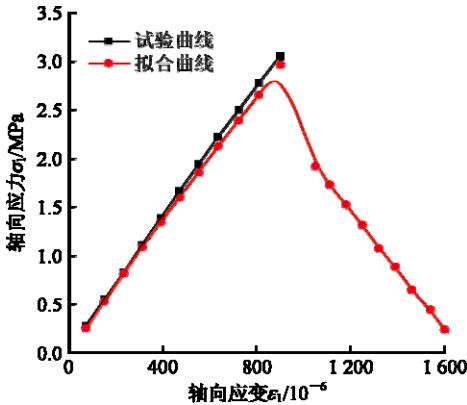


图 2 试验曲线与统计损伤本构模型理论曲线比较图

Fig.2 Comparison between experimental curve and theoretical curve for statistical damage constitutive model

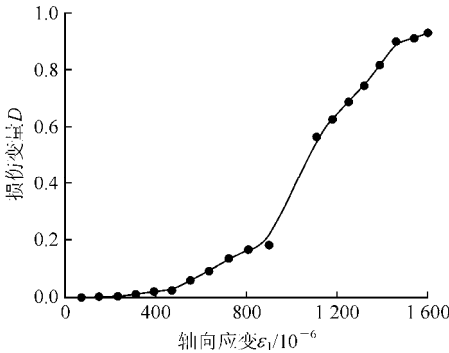


图 3 损伤演化曲线

Fig.3 Damage evolution curve

段。应变为  $312 \times 10^{-6}$  之后损伤变量近线性增加，岩石内部开始出现损伤的发展演化，进入了微破裂发展阶段，应力-应变曲线发生弯曲，该应变值为损伤开始演化的临界应变值。应变增加至  $900 \times 10^{-6}$  之后，有微小的变形，损伤变量急剧增加，表明材料内部裂隙快速发展、交叉形成断裂面，应变达到  $1600 \times 10^{-6}$  后，损伤程度接近最大，材料内部结构完全破坏。

随着轴向应力的增加，理论值相对于试验值出现偏差，原因分析如下：(1) 王谦源和李 晔<sup>[23]</sup>的抗压强度，变形模量以及泊松比均为统计平均值，与文中试样的单一试样的试验值存在一定的偏差。(2) 考虑参数  $F$  时，暂未考虑试样内部裂隙扩展、变化对于泊松比的影响。(3) 在王谦源和李 晔<sup>[23]</sup>原数据中，未进行裂隙扫描与统计，没有得到裂隙演化后的裂隙分布状态和分形维数，在验证计算时只能暂取初始分形维数，使理论值与试验值发生了偏差。

## 4 结论与讨论

(1) 基于岩石强度的概率分布假定，以及岩石中裂隙尺寸服从分形分布和方位角服从正态分布的特征，结合损伤力学理论、统计强度理论与分形理论，初步建立考虑裂隙尺寸和方位因素的岩石统计损伤本构模型，在内部结构缺陷和岩石的宏观变形之间建立相关关系，以反映结构缺陷对变形破坏的影响。

(2) 考虑裂隙尺寸和方位因素时，损伤变量为岩石物理力学性质、受载情况和结构特征的综合，与裂隙尺寸、尺寸分形维数、优势产状以及各阶段的应力水平、泊松比等有关；给出了与裂隙尺寸、尺寸分形维数和产状密切相关的本构模型参数，讨论了模型参数的物理意义与影响因素；岩石损伤沿着轴向变形、围压、裂隙尺寸、尺寸分形维数和方位角演化途径发展。

(3) 分析并找到了本构模型中存在的不足, 根据理论曲线和试验结果的对比, 探讨了理论值与试验值出现偏差的原因, 提出需进一步加以研究的地方, 完善理论模型。

此本构模型存在以下不足之处: (1) 泊松比与分形维数随变形发展的定量关系研究不足。随着岩石变形和内部裂隙演化发展, 泊松比和裂隙条数、尺寸、方位、分形维数都会发生变化, 分形维数和泊松比与变形之间的定量关系将在下一步的研究工作中加以研究; (2) 只考虑了裂隙尺寸和方位方面的因素, 未涉及裂隙数量的影响。需进一步研究裂隙数量、尺寸与试件尺寸间的关系, 分析试件尺寸的影响, 在考虑初始裂隙数量时, 还应考虑初始损伤变量的合理取值。

值得说明的是, 本文的研究只是初步的, 在实际中随着岩石的变形和内部裂隙演化发展, 泊松比和裂隙条数、尺寸、方位、分形维数都发生变化。在后续的工作中将进一步研究分形维数和泊松比随变形发展的定量关系, 以及裂隙数量、尺寸与试件尺寸之间的关系, 使研究更接近实际。研究节理裂隙的影响时, 由于试验的限制, 遇到了很大的困难。针对这一情况, 应加强岩石强度和变形的数值与物理模拟试验研究。

## 参考文献(References):

- [1] 杨友卿. 岩石强度的损伤力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(1): 23–27.(YANG Youqing. Continuum damage mechanics analysis on strength of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(1): 23–27.(in Chinese))
- [2] 光耀华. 岩石力学参数概率统计的几个问题[J]. 红水河, 1995, 14(1): 37–41.(GUANG Yaohua. Some problems on parameter statistics in rock mechanics[J]. Hongshui River, 1995, 14(1): 37–41.(in Chinese))
- [3] 徐卫亚, 韦立德. 岩石损伤统计本构模型的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 787–791.(XU Weiya, WEI Lide. Study on statistical damage constitutive model of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 787–791.(in Chinese))
- [4] 曹文贵, 赵明华, 刘成学. 岩石损伤统计强度理论研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 820–823.(CAO Wengui, ZHAO Minghua, LIU Chengxue. A study on damage statistical strength theory for rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 820–823.(in Chinese))
- [5] 蒋维, 邓建, 李隐. 基于对数正态分布的岩石损伤本构模型研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(6): 1190–1194.(JIANG Wei, DENG Jian, LI Yin. Study on constitutive model of rock damage based on lognormal distribution[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(6): 1190–1194.(in Chinese))
- [6] BASU B, TIWARI D, KUNDU D. Is Weibull distribution the most appropriate statistical strength distribution for brittle materials?[J]. Ceramics International, 2009, 35(1): 237–246.
- [7] 何浙浙, 郑学成, 林社勇. 粉煤灰混凝土强度统计特性的试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(增): 59–65.(HE Xixi, ZHENG Xuecheng, LIN Sheyong. The experimental studies on the statistical characteristics of fly ash concrete strength[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(Supp.): 59–65.(in Chinese))
- [8] XIE H P, GAO F. The mechanics of cracks and a statistical strength theory for rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(3): 477–488.
- [9] 高峰, 钟卫平, 黎立云, 等. 节理岩体强度的分形统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3608–3612.(GAO Feng, ZHONG Weiping, LI Liyun, et al. Fractal and statistical analysis of strength of jointed rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3608–3612.(in Chinese))
- [10] WEIBULL W. A statistical distribution function of wide applicability[J]. Journal of Applied Mechanics, 1951, 18(3): 293–297.
- [11] LU C, DANZER R, FISHCER D. Fracture statistics of brittle materials: Weibull or normal distribution[J]. Physical Review E, 2002, 65(6): 067102-1–067102-4.
- [12] 凌建明. 节理裂隙岩体损伤力学研究中的若干问题[J]. 力学进展, 1994, 25(2): 257–264.(LING Jianming. Some problems on damage mechanics of jointed rock mass[J]. Advances in Mechanics, 1994, 25(2): 257–264.(in Chinese))
- [13] 刘传孝, 蒋金泉, 刘福胜, 等. 岩石材料微、细、宏观断裂机理尺度效应的分形研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2619–2622.(LIU Chuanxiao, JIANG Jinquan, LIU Fusheng, et al. Fractal study of scale effect in microscopic, mesoscopic and macroscopic states for fracture mechanism of rock materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2619–2622.(in Chinese))
- [14] DENG J, GU D S. On a statistical damage constitutive model for rock materials[J]. Computers and Geosciences, 2011, 37(2): 122–128.
- [15] GHOSH A, DAEMEN J J K. Fractal characteristics of rock discontinuities[J]. Engineering Geology, 1993, 34: 1–9.
- [16] BOADU F K, LONG L T. The fractal character of fracture spacing and  $RQD$ [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1994, 31(2): 127–134.
- [17] KOJIMA K, TOSAKA H, OHNO H. An approach to wide-ranging correlation of fracture distributions using the concept of fractal[C]// Rock Mechanics as Guide for Efficient Utilization of Natural Resources. Rotterdam: Balkema, 1989: 211–218.
- [18] LEE Y H. The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1990, 27(6): 453–464.
- [19] 谢和平. 分形—岩石力学导论[M]. 北京: 中国科学出版社, 1996: 144–148.(XIE Heping. Fractal—an introduction to rock mechanics[M]. Beijing: China Science Press, 1996: 144–148.(in Chinese))
- [20] 王谦源, 胡京爽. 分形节理模拟原理[J]. 中国矿业, 1999, 8(2): 49–52.(WANG Qianyuan, HU Jingshuang. Modeling principles of fractal joints[J]. China Mining Magazine, 1999, 8(2): 49–52.(in Chinese))
- [21] 伍法权. 统计岩体力学原理[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993: 31–34.(WU Faquan. Principles of statistical mechanics of rock masses[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1993: 31–34.(in Chinese))
- [22] 杨圣奇, 徐卫亚, 苏承东. 考虑尺寸效应的岩石损伤统计本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4484–4490.(YANG Shengqi, XU Weiya, SU Chengdong. Study on statistical damage constitutive model of rock considering scale effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(24): 4484–4490.(in Chinese))
- [23] 王谦源, 李晔. 分形节理岩体强度与变形尺度效应的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1325–1328.(WANG Qianyuan, LI Ye. Experimental study of scale effects in strength and deformation of fractal-joint rock masses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1325–1328.(in Chinese))