

文章编号: 1673-3363-(2015)01-0132-06

考虑围压影响的岩石弹脆塑力学模型

张春会, 徐晓攀, 王锡朝, 赵全胜

(河北科技大学建筑工程学院, 河北 石家庄 050018)

摘要 为模拟围压对岩石峰后强度、模量退化和剪胀的影响, 将岩石的变形过程简化为线弹性变形、脆性跌落和理想塑性 3 个阶段, 利用退化指数和扩容指数描述围压对岩石峰后强度、模量退化和剪胀的影响, 建立了考虑围压影响的岩石弹脆塑力学模型。通过 Hoek-Brown 和 Mohr-Column 准则之间参数的转换关系, 给出了模型峰后力学参数的确定方法。在 FLAC 软件下, 利用 Fish 函数方法实现了建立的弹脆塑性力学模型。在数值算例中, 利用本文模型分析了不同围压下岩石的峰后力学特性劣化和剪胀扩容特征, 结果表明本文模型不仅能较好地模拟岩石峰前、峰后全程变形发展过程, 而且能较好地考虑围压对岩石峰后力学特性的影响。

关键词 围压; 弹脆塑力学模型; Hoek-Brown 屈服准则; Mohr-Column 屈服准则

中图分类号 TD 315 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.01.021

Elastic-brittle-plastic mechanical model for rock with confining pressure

ZHANG Chunhui, XU Xiaopan, WANG Xizhao, ZHAO Quansheng

(School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract To model effects of confining pressure on the post-peak mechanical properties for rock such as the degradation of strength and modulus, and dilatancy, the deformation process is simplified into three phases including linear-elastic, brittle degradation and perfect plasticity. Degradation index and dilatancy index are employed to reflect the effects of confining pressure on the peak-post mechanical properties for rock in this paper, and an elastic-brittle-plastic model with confining pressure is presented. Based on the transformation relationship between Hoek-Brown failure criterion and Mohr-Column failure criterion, how to obtain the calculation parameters of the peak-post mechanical model in this paper is presented. The Fish function method within FLAC is adopted to realize the elastic-brittle-plastic mechanical model model in this paper. In numerical case study the peak-post mechanical properties of rock under varied confining pressure including the degradation of strength and modulus, and dilatancy are modelled. The results show that the model can perfectly describe the deformation process and the effects of confining pressure on peak-post mechanical properties of rock.

Key words confining stress; elastic-brittle-plastic mechanical model; Hoek-Brown failure criterion; Mohr-Column failure criterion

收稿日期: 2013-06-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51274079); 河北省自然科学基金项目(E2013208148); 河北科技大学理工学院项目(2012Z035)

作者简介: 张春会(1976—), 男, 辽宁省沈阳市人, 博士, 教授, 从事破坏岩石力学方面的研究。

E-mail: zhangchunhui789@126.com

Tel: 0311-81668904

岩石是一种具有复杂力学性质的地质材料，在峰值强度后通常表现为明显的强度和刚度退化、体积扩容现象^[1-2]。作为地质材料，岩石通常在一定的围压下工作，围压对岩石峰后强度和刚度退化及体积扩容都有很大影响，因此研究围压条件下岩石峰后力学特性是岩石工程稳定性预测的关键^[3-4]。

W. F. Brace 等^[5]较早地开展了岩石全程应力应变过程研究，分析了微裂隙扩展对岩石强度和模量劣化的影响。随后国内外^[6-10]对花岗岩、砂岩、大理岩、片麻岩、绿泥岩、软弱泥岩等开展了大量三轴试验研究，从宏观角度分析了岩石峰后强度、模量退化和剪胀特征，并提出了若干描述岩石峰后力学行为的力学模型。这些模型主要包括弹塑性力学模型和损伤力学模型。弹塑性力学模型假设在应变空间屈服面外凸和塑性应变与屈服面正交法则成立，进而建立了应变空间中应变软化材料与弹塑性硬化材料通用的本构方程^[2-3,11-12]。损伤力学模型大致可分为连续损伤力学模型^[13]和细观损伤力学模型^[14-16]两大类。前者采用不同阶数的张量内变量表征裂纹的密度分布，进而在不可逆热力学框架下建立损伤演化方程。而后者则试图通过采用各种近似方法(如稀疏方法、自洽方法、Mori-Tanaka 方法等)将岩石细观结构演化与实验室条件下的宏观力学响应联系起来，以模拟岩石损伤积累对岩石力学行为的影响。这些研究极大地丰富了岩石峰后力学特性的模拟方法，但鲜有能较好地模拟围压对岩石峰后力学特性的影响。Fang 等^[4]、Yuan 等^[17]和张春会等^[3,18]研究了围压对岩石峰后模量、强度及剪胀的影响，提出了强度退化指数、扩容指数的概念，获得了围压与强度退化指数和扩容指数的经验关系。

本文基于强度退化指数和扩容指数的概念，将岩石全程应力应变曲线简化为线弹性、直线跌落(脆性跌落)、峰后理想塑性 3 个阶段，进而建立了考虑围压对岩石峰后模量、强度和剪胀影响的力学模型，并在 FLAC 内利用 Fish 函数方法予以实现。

1 弹脆塑力学模型

1.1 岩石单元变形特征

简化的岩石全过程应力应变曲线如图 1 所示。在荷载作用下岩石应力应变曲线包括如下阶段：加载初期为线弹性变形阶段(OA 段)，随着荷载增加，逐渐达到峰值应力(A 点)，而后再加载岩石就立即发生脆性破坏，岩石强度直接跌落至残余强度(AB 段)，然后在加载条件下岩石变形呈理想塑性状态

(BC 段)。

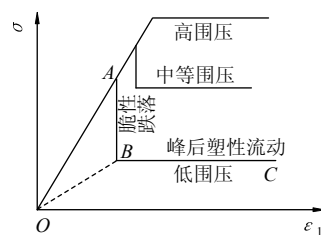


图 1 岩石应力应变曲线

Fig.1 Stress-strain curve for rock

根据图 1 所示的岩石应力应变全过程曲线，可简化岩石单元变形过程如下：

1) 线弹性变形阶段(OA 段)，变形符合线弹性的胡克定律。

2) 脆性破坏阶段。当岩石单元的应力水平满足摩尔-库仑屈服准则，再加载就发生脆性破坏，强度和模量降低(AB 段)。其中判别是否发生脆性破坏的摩尔-库仑准则可写为

$$F = \sigma_1 - k\sigma_3 - \sigma_{c0} = 0 \quad (1)$$

式中： σ_{c0} 为单轴抗压强度； σ_1 、 σ_3 分别为大、小主应力； $k = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$ ； φ 为内摩擦角。

3) 残余塑性流动阶段(BC)。岩石单元发生脆性跌落后，强度保持不变，这时岩石就如 OBC 所示的理想弹塑性材料，内摩擦角为峰后残余内摩擦角，黏聚力为峰后残余黏聚力，模量为峰后模量。

1.2 围压对岩石峰后力学特性的影响

岩石峰后力学特性变化主要包括强度、刚度退化和体积扩容，其中围压对强度和刚度退化的影响可以用峰后强度退化指数来描述^[3-4]。已有研究表明，退化指数与围压的关系^[3-4]可以表示为

$$\chi_\sigma = e^{-\alpha\sigma_3} \quad (2)$$

式中 α 为拟合常数，大于零。

从式(2)可见：单轴条件下 $\chi_\sigma = 1$ ，随着围压增大， χ_σ 呈负指数减小。当围压达到“脆延转化”围压^[19-20]，岩样变形呈现理想塑性，这时 $\chi_\sigma = 0$ 。对于不同类别岩石，“脆延转化”围压不同，如对于锦屏大理岩“脆延转化”围压约为 40 MPa^[19]，对于重庆鱼嘴砂岩“脆延转化”围压约为 130 MPa^[20]，“脆延转化”围压可通过试验确定。

于是，在围压 σ_3 下岩石的峰后模量和峰后残余强度可以分别表示为^[3-4]：

$$E_d = E_0 - \chi_\sigma \delta E_0 \quad (3)$$

$$\sigma_{cr} = \sigma_c - \chi_\sigma \delta \sigma_0 \quad (4)$$

式中： E_d 和 σ_{cr} 分别为围压 σ_3 条件下岩石的峰后模

量和峰后残余强度； δE_0 为单轴条件下模量的下降差值； $\delta \sigma_0$ 为单轴条件下的强度降。

岩石的剪切扩容是围岩峰后力学特性的另一个重要方面。岩石之所以出现剪切扩容是由于微裂纹的张开已经超过了闭合，或是滑动块体在凹凸面上的抬升所致。试验研究表明，围压对岩石的剪胀角有很大影响^[17]。围压的存在使得破裂围岩的裂隙空间发展受到限制，从而使得岩石剪胀扩容体积减小，即随着围压增加，岩石的剪胀角减小。S. C. YUAN 等^[17-18]提出用扩容指数描述围压对岩石剪胀扩容的影响。扩容指数定义为

$$I_d = \frac{\theta_p}{\theta_0} = \frac{\arctan(\Delta \varepsilon_{vp} / \Delta \varepsilon_{lp})_p}{\arctan(\Delta \varepsilon_{vp} / \Delta \varepsilon_{lp})_0} \quad (5)$$

式中： $\Delta \varepsilon_{vp}$ 和 $\Delta \varepsilon_{lp}$ 分别为塑性体积应变增量和塑性轴向应变增量； I_d 为岩石扩容指数。根据试验资料，对于单轴条件 $I_d=1$ ；当围压较高时，由于围压的约束，基本没有扩容，这时 $I_d=0$ 。

扩容指数与围压间的经验关系^[17-18]可表示为

$$I_d = \left(1 - \frac{\sigma_3}{\sigma_h}\right)^{m_d} \quad (6)$$

式中： σ_h 为无剪胀时的围压值； m_d 为试验参数。

结合剪胀角的定义，利用扩容指数表示的剪胀角模型为

$$\psi_p = \arcsin \frac{\tan(I_d \theta_0)}{2 + \tan(I_d \theta_0)} \quad (7)$$

式(6)，(7)就是考虑围压影响的剪胀角计算公式。

1.3 峰后塑性流动阶段力学参数的确定

发生脆性跌落后的岩石单元视作理想弹塑性材料，描述这一阶段岩石力学特征的主要力学参数包括峰后模量、峰后残余内摩擦角、残余黏聚力和剪胀角。

本文考虑围压的影响，峰后模量和剪胀角由式(3)，(6)和(7)确定。

岩石峰后强度退化可以通过强度指标内摩擦角和黏聚力的变化来反映。下面利用 Hoek-Brown 准则将岩石强度的脆性跌落转换为强度指标内摩擦角和黏聚力的变化。

岩石力学中的 Hoek-Brown 屈服准则为

$$f(\sigma_1, \sigma_3) = (\sigma_1 - \sigma_3) - \sqrt{m\sigma_{c0}\sigma_3 + s\sigma_{c0}^2} = 0 \quad (8)$$

式中 s 和 m 为岩体质量参数。

岩体的抗拉强度可以表示为

$$T_0 = \frac{\sigma_{c0}}{2} \left(\sqrt{m^2 + 4s} - m \right) \quad (9)$$

岩体质量参数 s 和 m 可以通过地质强度指标 GSI 来表示^[21]：

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9}\right) \quad (10)$$

$$m = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28}\right) \quad (11)$$

式中： m_i 为完整岩石的 Hoek-Brown 参数； GSI 为地质强度指标，值在 10~100 之间，扰动越强烈，其值越低。

利用式(8)，令 $\sigma_3 = 0$ ，可以得到

$$s = \left(\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_c}\right)^2 \quad (12)$$

由式(9)~(12)可以得到

$$m = m_i \left(\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_c}\right)^{9/14} \quad (13)$$

对于完整岩石， $s=1$ ，由式(9)可得

$$m_i = \frac{\sigma_{c0}}{T_0} - \frac{T_0}{\sigma_{c0}} \quad (14)$$

Mohr-Coulomb 准则可以用式(1)表示，从式(1)可得 Mohr-Coulomb 强度破坏线斜率 k 为

$$k = \frac{d\sigma_1}{d\sigma_3} \quad (15)$$

对于 Hoek-Brown 准则，由式(8)可得

$$k_h = \frac{d\sigma_1}{d\sigma_3} = 1 + \frac{m}{2\sqrt{m\sigma_3/\sigma_{c0} + s}} \quad (16)$$

式中，下标 h 表示由 Hoek-Brown 屈服准则得到。

进而可以得到用 Hoek-Brown 参数表示的等效内摩擦角^[21]为

$$\phi_h = 2\arctan\sqrt{k_h} - \pi/2 \quad (17)$$

将式(16)代入式(1)，可得到用 Hoek-Brown 参数表示的单轴抗压强度为

$$\sigma_{ch} = \frac{m\sigma_3 + 2s\sigma_{c0}}{2\sqrt{m\sigma_3/\sigma_{c0} + s}} \quad (18)$$

于是用 Hoek-Brown 参数表示的等效黏聚力为

$$c_h = \frac{\sigma_{ch}}{2\sqrt{k_h}} \quad (19)$$

利用式(12)，(13)反映围压对岩石峰后 Hoek-Brown 参数的影响，进而利用式(17)，(19)可计算考虑围压影响的峰后内摩擦角和峰后黏聚力。

2 数值实现

线弹性变形阶段的本构方程可以表示为

$$\sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + \lambda\delta_{ij}\varepsilon_{kk} \quad (20)$$

式中： G 为剪切模量； λ 为拉梅常数； δ 为 Kronecker 符号； ε_{ij} 为应变张量。

脆性跌落由 Mohr-Column 准则用式(1)判断。

发生脆性跌落后，岩石是以峰后模量、峰后内摩擦角和黏聚力为力学参数的理想弹塑性材料，其应力增量和应变增量之间的关系可以表示为

$$\{d\sigma\} = ([C_e] - [C_p])\{d\varepsilon\} \quad (21)$$

其中， $[C_p]$ 为塑性矩阵，可以表示为

$$[C_p] = \frac{[C_e]\left\{\frac{\partial G}{\partial \sigma}\right\}\left\{\frac{\partial F}{\partial \sigma}\right\}^T [C_e]}{\left\{\frac{\partial F}{\partial \sigma}\right\}^T [C_e]\left\{\frac{\partial G}{\partial \sigma}\right\}} \quad (22)$$

式中： F 为屈服函数，取式(1)形式； G 为塑性势函数，取式(1)形式，但用剪胀角代替内摩擦角。

利用 FLAC 软件中的 Fish 函数方法实现本文提出的弹脆塑性力学模型。具体计算过程为：

- 1) 建立计算分析模型，进行网格剖分。
- 2) 将岩石视作 Mohr-Column 材料，输入相应力学参数，包括岩石的弹性模量、单轴抗压强度 σ_{c0} 、泊松比、抗拉强度 T_0 ，岩体质量参数 s ，强度和刚度退化指数参数 χ_a ，扩容指数参数 m_d 和 σ_h ，单轴下强度和刚度的最大退化值，单轴下的岩石剪胀角。
- 3) 施加初边值条件，计算初始应力状态。
- 4) 对每一个单元根据其围压计算峰前力学参数，并为其赋值。
- 5) 施加第一步荷载，先按弹性进行单元应力及应变计算分析，然后对每一个单元利用 Mohr-Column 准则判断其是否发生破坏。
- 6) 若单元未发生破坏，仍保持峰前力学参数不变，如单元发生破坏，发生脆性跌落，计算峰后力学参数，模型改为弹塑性模型，赋值该单元，而后材料参数仅随应力水平做调整。
- 7) 施加下一步荷载，反复重复上述过程，直至计算结束。

基于上述步骤，在 FLAC 中利用 Fish 函数方法实现了本文模型。

3 数值验证

数值算例研究圆柱试样在不同围压下的三轴破坏过程。模拟中岩石的物理力学参数取值取自文献[22]，具体如表 1 所示。

模拟岩样尺寸为 0.05 m(直径)×0.1 m(高度)，共划分 16 000 个单元。边界条件为轴向加载，加载速度为 2.5×10^{-7} m/step，侧向施加不同围压，分别为 0，5，10，15，20，25，30 MPa。

表 1 岩样的物理力学参数
Table 1 Parameters for rock sample

密度	2 100 kg/m ³
弹性模量	40 GPa
峰后弹性模量	4 GPa
泊松比	0.25
单轴抗压强度	200 MPa
单轴峰后残余抗压强度	20 MPa
围压	0，5，10，15，20，25，30 MPa
单轴抗拉强度	20 MPa
退化指数拟合参数	0.05
扩容指数拟合参数	$m_d=1.5$ ， $\sigma_h=100$ MPa
单轴条件下剪胀角	20°

利用编制的 Fish 函数在 FLAC^{3D} 下对不同围压下轴向加载岩样的应力及变形过程进行模拟，结果如图 2，3 所示。

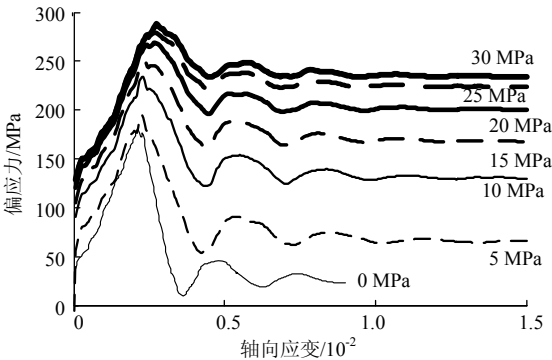


图 2 不同围压下试样轴向应变-偏应力曲线
Fig.2 Differential stress and axial strain curve under varied confining stress

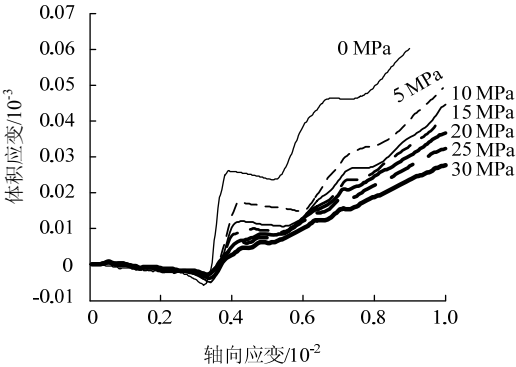


图 3 不同围压下试样体积应变-轴向应变曲线
Fig.3 Volumetric strain and axial strain curve under varied confining stress

图 2 是不同围压下岩样的轴向应变和偏应力关系曲线。从图 2 可看出：在加载初期，岩样的应力与应变呈线弹性关系，随着应变增加，试样应力线性增加。当应力增加到峰值强度，岩样强度发生脆性跌落，并快速降至残余强度，而后变形呈理想弹性。

从图 2 可看出：随之围压增加，岩样的强度降(峰前强度和峰后强度的差值)逐渐减小。

利用式(5)~(13)和式(16)~(25)计算在不同围压 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 MPa 下的峰前和峰后岩石力学参数及强度如表 2 所示。

表 2 不同围压下岩石峰后力学参数
Table 2 Post-peak mechanical parameters for rock under varied confining stress

围压/ MPa	剪胀角/ (°)	θ_p / (°)	峰前力学参数值			峰后力学参数值			
			内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	强度/MPa	弹性模量/MPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	强度/MPa
0	20.0	46.1	45.4	40.9	200.0	4 000	58.1	2.9	20.0
5	18.4	42.7	43.6	43.2	227.5	11 963	45.8	13.2	95.2
10	16.9	39.3	42.0	45.4	250.1	18 165	42.6	21.9	152.0
15	15.5	36.1	40.7	47.7	271.2	22 995	40.8	29.3	199.5
20	14.2	33.0	39.6	49.9	290.2	26 756	39.4	35.6	240.1
25	12.9	29.9	38.6	52.1	307.7	29 686	38.3	41.0	275.8
30	11.7	26.9	37.7	54.3	324.2	31 967	37.4	45.7	307.4

将图 2 中的模拟结果与表 2 中计算的岩样峰前强度、峰后强度进行对比，结果表明模拟结果与表 2 中的计算结果基本一致，表明本文弹脆塑性力学模型和在 FLAC 下开发的 Fish 函数正确，计算结果可靠。

对比，结果表明本文模型不仅能较好地模拟岩石峰前、峰后全程变形发展过程，而且能较好地考虑围压对岩石峰后强度退化和剪胀扩容特性的影响。

岩石的破坏和剪胀扩容对水力学特性有很大影响，利用本文模型也可以模拟围压条件下岩石峰后渗透性演化规律，这方面工作将另文介绍。

图 3 是不同围压下岩样的轴向应变和体积应变关系曲线。从图 3 可以看出：在加载初期，岩样发生弹性压缩，体积应变为压缩，岩样的体积减小。当应力达到岩石的峰值强度时，岩样发生剪切破裂，剪切面上颗粒之间发生相对滑动，岩样的空隙或裂隙空间增加，出现剪胀扩容现象。

参考文献：

从图 3 还可以看出，围压对岩样的剪胀扩容有很大影响。随着围压增加，岩样的剪胀扩容速率变缓，对比模拟得到的 θ_p 和手算得到的 θ_p ，发现两者结果基本一致，这表明本文模型可以较好地模拟围压对岩石剪胀扩容的影响。

综上，本文建立的弹脆塑性力学模型及编制的 Fish 函数程序不仅能模拟岩石峰后力学特征，而且能较好地考虑围压对岩石峰后力学特性的影响。

4 结 论

[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: 283-353.

[2] 陆银龙, 王连国, 杨峰, 等. 软弱岩石峰后应变软化力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 640-648.

LU Yinlong, WANG Lianguo, YANG Feng, et al. Post-peak strain softening mechanical properties of weak rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 640-648.

[3] 张春会, 赵全胜, 黄鹂, 等. 考虑围压影响的岩石峰后应变软化力学模型[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 2): 193-197.

ZHANG Chunhui, ZHAO Quansheng, HUANG Li, et al. Post-peak strain softening mechanical model of rock considering confining pressure effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Sup 2): 193-197.

[4] FANG Z, HARRISON J P. A mechanical degradation index for rock[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2001, 38: 1193-1199.

本文将岩石的变形过程简化为线弹性、脆性跌落和理想塑性 3 个阶段，建立了考虑围压影响的岩石弹脆塑性力学模型，给出了相应的参数确定方法，并在 FLAC 软件下予以实现。数值算例研究了一圆柱体试件在不同围压下的变形特征，并与试验数据

- [5] BRACE W F, BOMBOLAKIS E G. A note on brittle crack growth in compression[J]. *J Geophys Res*, 1963, 68: 3709-3713.
- [6] BIESUELLE P, DESRUES J, RAYNAUD S. Experimental characterization of the localization phenomenon inside a Vosges sandstone in a triaxial cell[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2000, 37: 1223-1237.
- [7] RAKESH K, SHARMA K G, VARADARAJAN A. Post-peak response of some metamorphic rocks of India under high confining pressures[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2010, 47: 1357-1362.
- [8] LEE H, HAIMSON B C. True triaxial strength, deformability, and brittle failure of granodiorite from the San Andreas fault observatory at depth[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2011, 48: 1199-1207.
- [9] 靖洪文. 峰后岩石剪胀性能试验研究[J]. *岩土力学*, 2003, 24(1): 93-97.
JING Hongwen. Experimental study on dilatancy nature of the rock post-peak behavior[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(1): 93-97.
- [10] 张黎明, 王在泉, 李华峰, 等. 粉砂岩峰后破坏区应力脆性跌落的试验和本构方程研究[J]. *实验力学*, 2008, 23(3): 234-240.
ZHANG Liming, WANG Zaiquan, LI Huaifeng, et al. Theoretical and experimental study on siltstone brittle stress drop in post-failure region[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2008, 23(3): 234-240.
- [11] 张帆, 盛谦, 朱泽奇, 等. 三峡花岗岩峰后力学特性及应变软化模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(增刊 1): 2651-2655.
ZHANG Fan, SHENG Qian, ZHU Zeqi, et al. Study of post-peak mechanical behavior and strain-softening model of Three Gorges granite[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(Sup 1): 2651-2655.
- [12] WANG Shuilin, ZHENG Hong, LI Chunguang, et al. A finite element implementation of strain softening rock mass[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2011, 48: 67-76.
- [13] ZHOU C Y, ZHU F X. An elasto-plastic damage constitutive model with double yield surfaces for saturated soft rock[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2010, 47: 385-395.
- [14] TANG C A, THAM L G, LEE P K K, et al. Coupled analysis of flow, stress and damage (FSD) in rock failure[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2002, 39: 477-489.
- [15] ZHANG Ping, LI Ning, LI Xibing, et al. Compressive failure model for brittle rocks by shear faulting and its evolution of strength components[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2009, 46: 830-841.
- [16] ZHOU J W, XU W Y, YANG X G. A microcrack damage model for brittle rocks under uniaxial compression[J]. *Mechanics Research Communications*, 2010, 37: 399-405.
- [17] YUAN S C, HARRISON J P. An empirical dilatancy index for the dilatant deformation of rock[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2004, 41: 679-686.
- [18] 张春会, 赵全胜, 于永江. 考虑围压影响的非均质岩石剪胀扩容模型[J]. *采矿与安全工程学报*, 2011, 28(3): 436-440.
ZHANG Chunhui, ZHAO Quansheng, YU Yongjiang. Dilation model of heterogeneous rock affected by confining pressure[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2011, 28(3): 436-440.
- [19] 汪斌, 朱杰兵, 邬爱清, 等. 锦屏大理岩加、卸载应力路径下力学性质试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(10): 2138-2145.
WANG Bin, ZHU Jiebing, WU Aiqing, et al. Experimental study on mechanical properties of Jinping marble under loading and unloading stress paths[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(10): 2138-2145.
- [20] 刘建, 李建朋. 砂岩高应力峰前卸围压试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(3): 473-479.
LIU Jian, LI Jianpeng. Experimental research on sandstone pre-peak unloading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(3): 473-479.
- [21] 刘波, 韩彦辉. *FLAC 原理、实例与应用指南*[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 604-607.
- [22] YUAN S C, HARRISON J P. Development of a hydro-mechanical local degradation approach and its application to modeling fluid flow during progressive fracturing of heterogeneous rocks[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2005, 42: 961-984.