

文章编号:1673-9469(2020)01-0030-05

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2020.01.006

考虑渗压的二长花岗岩流变损伤本构模型研究

李尧^{1,2}, 王伟^{1,2*}, 王如宾^{1,2}, 朱其志^{1,2}, 王辉^{1,2}, 刘志航^{1,2}

(1.河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏南京 210024;

2.河海大学土木与交通学院岩土所,江苏南京 210024)

摘要: 基于二长花岗岩的流变试验结果,采用 Cross-plotting 方法确定了有效应力系数,在广义 Bingham 模型的基础上建立了考虑渗透压力损伤的流变损伤本构模型,对新的流变损伤模型进行参数辨识,得到了流变损伤模型的参数。推导了模型的流变本构方程,并用该模型拟合了岩石流变试验的数据,拟合结果表明:该模型不仅可以很好地描述衰减流变和稳态流变过程,亦可描述岩石的加速流变阶段,从而证明该模型的可行性和合理性。

关键词: 岩石流变;本构关系;广义 Bingham 模型;非线性;渗压

中图分类号: TU45

文献标识码: A

Study on Rheological Damage Model of Monzogranites with Permeation Pressure Considered

LI Yao^{1,2}, WANG Wei^{1,2*}, WANG Rubin^{1,2}, ZHU Qizhi^{1,2}, WANG Hui^{1,2}, LIU Zhihang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing,

Jiangsu 210024, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Jiangsu, Nanjing 210024, China)

Abstract: Based on the results of the rheological test of monzogranites, the Biot coefficient was determined by cross-plotting method, the creep model based on permeation pressure damage was established on the basis of the generalized Bingham model, the creep parameters were determined by fitting the rock creep test data, and the parameters of the creep damage model were obtained. The creep constitutive equation of the model was deduced, and the data of the rock creep test were fitted with this model. The fitting results show that the model can not only describe the the decay creep and steady-state creep stage, but also describe the accelerated creep stage of the rock, thus proving the feasibility and rationality of the model.

Key words: rock creep; constitutive relation; generalized Bingham model; nonlinearity; permeation pressure

岩石流变模型是岩石力学研究的一大重点,也是进行流变数值计算的基础。元件模型是岩石流变本构关系研究中不可或缺的一部分,通过对元件进行串并联组合,模拟岩石的流变力学特征。由于元件模型概念直观、物理意义明确,并可以模拟岩石的多种力学效应,且易编程实现、应用方便,近年来对岩石元件模型的研究取得了大量成果,获得的改进元件模型可以很好地反映岩石流变非线性

特性^[1-9]。考虑渗压作用的流变损伤本构模型研究成果较少,本文通过对二长花岗岩流变试验数据的研究,在广义 Bingham 模型的基础上建立了基于渗透压力损伤的流变损伤本构模型,并进行了参数辨识,对所得结果和试验结果相比较,本文建立的考虑渗压损伤的非线性流变本构模型与试验曲线拟合效果较好,验证了所建立的非线性流变本构模型的合理性。

收稿日期: 2019-12-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1501100); 国家自然科学基金资助项目(11672343, 51679068, 51679069)

作者简介: 李尧(1996-), 男, 重庆黔江人, 硕士研究生, 研究方向为岩石力学与工程。

* 通讯作者: 王伟(1978-), 男, 安徽合肥人, 博士, 教授, 主要从事岩石力学与工程的教学与研究工作。

1 岩石流变损伤本构模型及参数辨识

1.1 Biot 系数的确定

在多孔介质弹性理论框架内,一般采用有效应力原理分析流固耦合问题,有效应力可表示为:

$$\sigma_{ij}^{eff} = \sigma_{ij} - \beta_{ij}p_w \quad (1)$$

式中: σ_{ij}^{eff} 为有效应力, σ_{ij} 为总应力, β_{ij} 为二阶 Biot 系数张量,即有效应力系数张量,它与材料的孔隙和裂隙结构有关, p_w 为孔隙水压力。

Terzahi^[10] 在土力学中提出有效应力原理,其后 Biot^[11-12] 在饱和多孔介质的本构机制方面进行了开创性的研究。考虑到有效应力系数对有效应力确定的重要性,国内外众多学者已开展了不同围压和渗压下岩石的渗透性试验研究,获得了基于渗透系数的岩石有效应力系数。

综合国内外有关渗透系数与有效应力关系的试验成果,借鉴文献[13],渗透系数 k 可以表示为有效应力的单值函数:

$$k = k(\sigma_{ij}^{eff}) = k(\sigma_{ij} - \beta_{ij}p_w) \quad (2)$$

Cross-plotting^[14] 法是由 J.B.Walsh 提出的,根据达西公式计算得到岩样在不同压力状态下渗透率的一种方法,基于式(2)并根据 Cross-plotting 法确定岩石的有效应力系数,当渗透系数相同时,有效应力亦相同,基于岩石渗透系数的试验结果,可获得恒定围压下,渗透系数随孔隙压力变化的演化规律。再取一系列渗透系数作为参考值,针对同一渗透系数,可以获得一系列围压和孔隙压力的组合,通过恒定围压和孔隙压力拟合线性关系的斜率最终得到 Biot 系数。不同压力组合下的平均渗透系数见表 1。图 1 和图 2 为根据 Cross-plotting 方法测得的有效应力系数。

表 1 不同压力组合下二长花岗岩的渗透系数表

Tab.1 Permeability coefficient of monzogranites under different pressure combinations

围压/MPa	渗透压力/MPa	平均渗透系数/ $\times 10^{-6}$ Darcy
4	1	2.596
	2	3.072
	3	3.351
6	1	2.643
	2	4.663
	3	5.559

根据对大量的试验结果的分析,取均值渗透系数 3×10^{-6} Darcy 时 Biot 系数,如图 1 中所拟合的

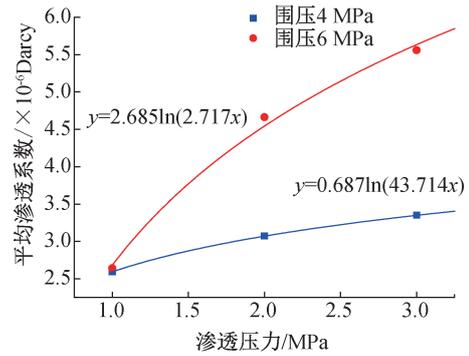


图 1 渗透压力-平均渗透系数关系曲线

Fig.1 Permeability pressure-average permeability coefficient relation curve

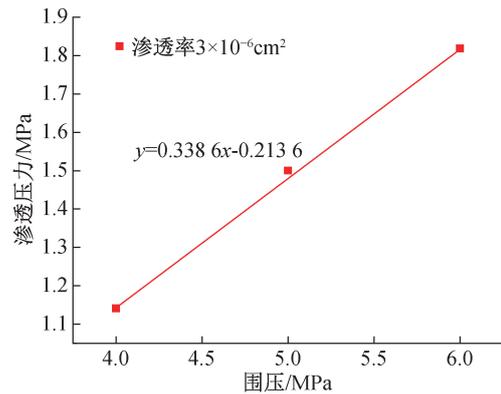


图 2 孔隙压力-围压的关系曲线

Fig.2 Pore pressure-confining pressure relation curve

渗透系数与恒定围压的关系中,差值得到相同渗透系数下不同控制压力作用下的渗透压力,由 Cross-plotting 方法,得到孔隙压力与围压的关系曲线,其斜率即为 Biot 系数,由图 2 的拟合结果可知,弹性阶段的 Biot 系数为 0.338 6。

对各向同性材料而言,Biot 系数是各向同性的。然而在脆性岩石破坏过程中,其中裂纹萌生、扩展直至贯通是各向异性的过程,裂纹主要沿主应力方向发展,导致 Biot 系数变为各向异性,因此对塑性变形后期由于试样中裂纹已经完全贯通,形成宏观裂纹,所研究的岩石为裂隙孔隙材料时,可以采用裂隙内的孔隙水压力代替岩块内部的孔隙水压力,仍可认为此时的 Biot 系数为 1。

1.2 考虑渗压的损伤分析

在不同渗透压力作用下岩石粘聚力和内摩擦角等力学特性会发生不同程度的变化,渗透压力会促进裂纹的产生和发展,因此在岩石流变过程中围压、偏应力和温度相同的情况下,渗透压力的变化对岩石损伤的影响不容忽视。

损伤变量通常用 D 来表示,材料的损伤使其内部承受的净应力 σ_D 大于实际应力 σ ,净应力可表示为:

$$\sigma_D = \frac{\sigma}{1 - D} \quad (3)$$

损伤变量 D 可以定义为应变的函数:

$$D = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^m\right] \quad (4)$$

由广义胡克定律,可以得到:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - (1 - 2\mu)\sigma_3/E \quad (5)$$

式中: μ 为泊松比, E 为弹性模量。

将式(5)代入式(4)中,可以得到:

$$D = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon_1 E - (1 - 2\mu)\sigma_3}{\varepsilon_0 E}\right)^m\right] \quad (6)$$

根据有效应力原理,在稳定渗压作用下岩石应力可用式(1)表示,因此将式(1)代入式(6)中可得有效应力作用下的损伤变量 D :

$$D = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon_1 E - (1 - 2\mu)(\sigma_3 - \beta p_w)}{\varepsilon_0 E}\right)^m\right] \quad (7)$$

损伤不仅与围压和偏应力有关,在不同渗压作用下亦与渗压大小有关,是各个应力共同作用的结果,因此,需在式(7)中引进一个渗透压力的函数。根据不同渗透压力条件下,内摩擦角和粘聚力的变化规律可知,随着渗压的增加,均成线性变化,因此假设损伤参数 m 与渗压有如下的关系:

$$m = ap_w + b \quad (8)$$

式中: a, b 为试验参数。

将式(8)代入式(7)中可以得到考虑渗透压力的损伤变量 D :

$$D = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\varepsilon_1 E - (1 - 2\mu)(\sigma_3 - \beta p_w)}{\varepsilon_0 E}\right)^{ap_w + b}\right] \quad (9)$$

考虑到有效应力系数在岩石流变过程中不是恒量,做如下假定,在衰减流变阶段和稳态流变阶段,由于裂纹发展缓慢,有效应力系数取为 0.338 6;而在加速流变阶段,有效应力系数取为 1,可由应变阈值 ε_0 进行控制。

1.3 改进的广义 Bingham 模型的流变损伤模型

线性粘弹性模型可很好地模拟岩石流变的衰减流变阶段和稳态流变阶段,但当岩石偏应力到达某一等级时,岩石会发生加速流变破坏,因此存在一个应力阈值,当偏应力等级小于该值时,将发生前两个

阶段的流变;当外荷载水平达到应力阈值时,将发生三个阶段的流变。本文将裂隙体积应变的转折点作为裂隙开裂的起始应力阈值,岩石从此时开始发生损伤。综合试验结果,考虑使用广义 Bingham 模型对岩石的流变进行描述(图 3)。

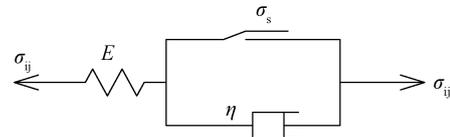


图 3 广义 Bingham 模型

Fig.3 Generalized Bingham model

典型的广义 Bingham 模型的计算公式如下(本文取轴向应变为主要的研究对象):

$$\varepsilon = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{E} + \frac{\sigma - \sigma_s}{\eta} \quad (10)$$

根据文献[15]的研究成果,对于广义 Bingham 模型,定义一个描述流变衰减阶段和稳态阶段的非线性函数:

$$f(t) = 1 - e^{-nt} \quad (11)$$

当 n 为某一合适参数时,当 t 达到某一时刻时, $f(t) = 1$,可以很好地描述衰减流变和稳定流变阶段。当偏应力等级大于阈值 σ_s 时,岩石发生加速流变破坏,通过引入损伤,在粘塑性元件中采用净应力代替 Cauchy 应力,可以很好地描述岩样的加速流变过程。因此改进的广义 Bingham 模型建立的过程如下:

(1) 在偏应力等级小于岩石的应力阈值时,损伤没有发生,因此 $D = 0$,岩石的流变方程为广义 Bingham 模型。

$$\varepsilon = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{E} + \gamma(1 - e^{-nt}) \quad (12)$$

(2) 当偏应力等级大于岩石的应力阈值时,但未发生加速流变破坏时,应该考虑损伤对岩石流变的作用,此时裂纹并未出现,因此有效应力系数取为 0.338 6,则流变损伤方程为:

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{E} + \gamma(1 - e^{-nt}) + \frac{\sigma_D - \sigma_s}{\eta} t \quad (13)$$

净应力可根据式(1)和式(9)得到:

$$\sigma_D = (\sigma_1 - \sigma_3) \times \exp\left[\left(\frac{\varepsilon_1 E - (1 - 2\mu)(\sigma_3 - 0.3386 p_w)}{\varepsilon_0 E}\right)^{ap_w + b}\right] \quad (14)$$

(3) 当偏应力等级大于岩石的应力阈值,且发生加速流变破坏时,此时由于宏观裂纹逐渐出

现,因此有效应力系数取为 1,流变方程与式(13)相似,净应力可以表示为:

$$\sigma_D = (\sigma_1 - \sigma_3) \times \exp\left[\left(\frac{\varepsilon_1 E - (1 - 2\mu)(\sigma_3 - p_w)}{\varepsilon_0 E}\right)^{ap_w + b}\right] \quad (15)$$

根据式(11)—(13)可以看出,考虑渗压损伤的流变本构模型主要参数包括弹性模型 E 、泊松比 μ ,有效应力系数 β 和表征渗压影响的系数 a 和 b 。弹性模量和泊松比可通过加载过程中的瞬时应力和应变确定,有效应力系数按照 1.1 节假设确定, a 和 b 可通过拟合最后一级偏应力试验曲线获得,应力阈值可以通过相同试验条件下瞬时试验体积应变规律确定,加速流变起始点应变可通过最后一级流变速率曲线获得,至此所有的流变参数均已确定。采用以上本构关系得到的材料参数如表 2—表 4 所示。

表 2 围压 4 MPa、渗压 1 MPa 状态下模型力学参数表
Tab.2 Parameters of models ($\sigma_3 = 4 \text{ MPa}$, $p_w = 1 \text{ MPa}$)

主要力 学参数	偏应力等级/MPa			
	113	133	143	153
s_s/MPa	129.95			
$e_0/10^{-3}$	5.8			
b	$e_0 < eb = 0.3386$; $e_0 > eb = 1$			
E/GPa	23.45	24.84	23.94	26.20
g	0.23	0.38	0.12	0.02
n	0.03	0.09	0.05	0.21
$h/(\text{GPa}\cdot\text{s})$	17.68		18.52	16.55
m	0.21		0.21	0.21
a	1.43		0.69	2.36
b	0.58		0.75	0.10

表 3 围压 4 MPa、渗压 2 MPa 状态下模型力学参数表
Tab.3 Parameters of models ($\sigma_3 = 4 \text{ MPa}$, $p_w = 2 \text{ MPa}$)

主要力 学参数	偏应力等级/MPa				
	113	123	133	143	153
s_s/MPa	150.03				
$e_0/10^{-3}$	7.00				
b	$e_0 < eb = 0.3386$; $e_0 > eb = 1$				
E/GPa	11.61	9.01	9.00	8.89	8.94
g	0.24	0.18	0.13	0.16	28.36
n	0.06	0.27	0.20	0.06	0.09
$h/(\text{GPa}\cdot\text{s})$	—				16.53
m	—				0.18
a	—				0.06
b	—				0.07

表 4 围压 4 MPa、渗压 3 MPa 状态下模型力学参数表
Tab.4 Parameters of models ($\sigma_3 = 4 \text{ MPa}$, $p_w = 3 \text{ MPa}$)

主要力 学参数	偏应力等级/MPa				
	113	123	133	143	153
s_s/MPa	140.02				
$e_0/10^{-3}$	6.02				
b	$e_0 < eb = 0.3386$; $e_0 > eb = 1$				
E/GPa	8.69	8.39	8.60	9.44	8.84
g	0.36	0.09	0.07	0.23	11.23
n	0.19	0.04	0.05	0.03	0.08
$h/(\text{GPa}\cdot\text{s})$	—		12.61	19.66	
m	—				0.13
a	—				2.75
b	—				0.45

2 考虑渗压的流变损伤本构关系验证

根据试验结果分别作出了围压为 4 MPa 时不同渗压条件下试验曲线与拟合曲线的对比图,其中,渗压为 1 MPa 条件下作出了全过程流变拟合曲线图,为了更加清晰地对比加速流变阶段的拟合效果,在渗压为 2 MPa 和渗压为 3 MPa 条件下给出了最后一级荷载作用下(即加速流变阶段)的拟合曲线,如图 4 所示。

由图 4 可见,本文建立的考虑渗压损伤的非线性流变本构模型与试验曲线拟合效果较好,由图 4 可以看出模型可以较好地反映岩石流变变形破坏的三阶段,试验曲线与模型拟合曲线的变化趋势一致,从图 4(b)、(c)可以看出,在加速流变阶段,试验曲线与模型拟合曲线的总体变化趋势和转折点的数值大小均相吻合,都表现为应变的急剧增大直至岩样破坏,很好地表现了岩石加速流变阶段的非线性,这表明本文所建立的考虑渗压损伤的流变本构模型的合理性和正确性。

3 结论

1) 由考虑渗压的二长花岗岩三轴流变试验所得结果,基于广义 Bingham 模型建立了考虑渗透压力损伤的流变损伤模型,引入损伤变量,考虑了流变过程的非线性建立了损伤演化方程。

2) 基于所建立的损伤演化方程建立了改进的广义 Bingham 模型的流变损伤模型,并对流变损伤模型的力学参数进行了辨识。模型预测结果与试验结果相吻合,显示了该模型的合理性和正确性,该模型可以很好地模拟岩石流变三阶段,且具有参数少,物理意义明确,确定方法简单等优点,具有一定的工程实用价值。

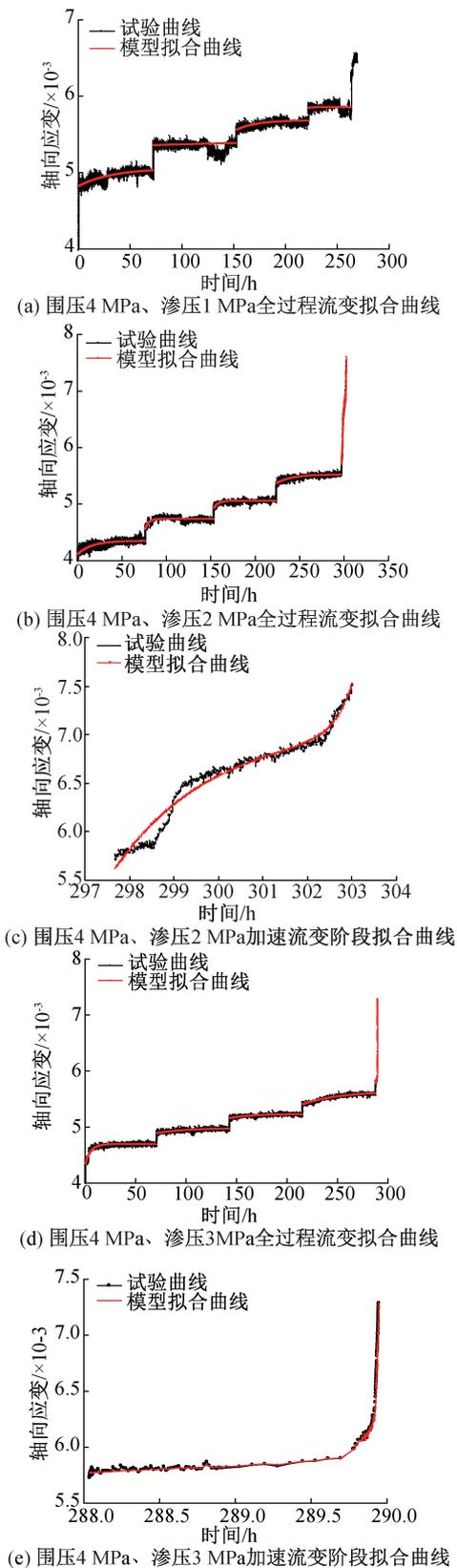


图4 各试验条件下模型拟合曲线与试验曲线对比图
 Fig.4 model fitting curve and test curve
 indifferent test condition

参考文献:

[1] 赵延林, 曹平, 文有道, 等. 岩石弹粘塑性流变试验和非线性流变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3):477-486.

[2] 赵延林, 唐劲舟, 付成成, 等. 岩石黏弹塑性应变分离的流变试验与流变损伤模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7):1297-1308.

[3] 张治亮, 徐卫亚, 王伟. 向家坝水电站坝基挤压带岩石三轴流变试验及非线性黏弹塑性流变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1):132-140.

[4] 潘晓明, 杨钊, 许建聪. 非定常西原黏弹塑性流变模型的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011(S1):2640-2646.

[5] 王其虎, 叶义成, 刘艳章, 等. 考虑初始损伤和流变损伤的岩石流变全过程本构模型[J]. 岩土力学, 2016(S1):57-62.

[6] 高赛红, 曹平, 汪胜莲, 等. 改进的岩石非线性黏弹塑性流变模型及其硬化黏滞系数的修正[J]. 煤炭学报, 2012, 37(6):936-943.

[7] 徐鹏, 杨圣奇, 陈国飞. 改进的岩石 Burgers 流变模型及其试验验证[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10):1993-2000.

[8] WANG WEI, LV Jun, WANG Haicheng. A Creep-Damage Constitutive Model for Sandstone [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 170-173: 289-294.

[9] 刘开云, 薛永涛, 周辉. 基于改进 Bingham 模型的软岩参数非定常三维非线性黏弹塑性流变本构研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(11):249-256.

[10] TERZAGHI K V. Die Berechnung der durchlässigkeit des Tones aus dem Verlauf der hydrodynamischen Spannungserscheinungen [J]. Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien Math Naturwiss, 1923, 132(2A): 105-126.

[11] BIOT M A. General Theory of Three-Dimensional Consolidation [J]. Journal of Application Physics, 1941, 12: 155-160.

[12] BIOT M A. Theory of Elasticity and Consolidation for Aporous Anisotropic Solid [J]. Journal of Application Physics, 1955, 26: 182-185.

[13] 乔丽萍, 王者超, 李术才. 基于 Tight gas 致密砂岩储层渗透系数的有效应力特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7):1421-1426.

[14] WALSH J B. Effect of Pore Pressure and Confining Pressure on Fracture Permeability [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1981, 18(5):429-435.

[15] 胡其志, 冯夏庭, 周辉. 考虑温度损伤的盐岩流变本构关系研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2245-2248.

(责任编辑 周雪梅)