

锦屏水电站绿砂岩三轴卸荷流变试验 及非线性损伤蠕变本构模型研究

朱杰兵, 汪 斌, 邬爱清

(长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 以锦屏二级水电站引水隧洞绿砂岩为研究对象, 采用恒轴压、逐级卸围压的应力路径开展室内流变试验, 研究卸荷条件下的轴向及侧向变形特征。结果表明: 侧向塑性变形的发展速率明显比轴向快, 岩样破坏前在侧向反应要比轴向更为明显。在对流变试验数据进行深入分析基础上, 从材料损伤的角度出发, 认为岩石流变力学参数随着黏性应变的负指数形式逐步弱化, 从而建立起岩石损伤演化方程及变参数非线性 Burgers 模型。基于 Levenberg-Marquardt(LM) 算法, 以残差平方和为目标函数, 对试验数据开展相应拟合, 所获得的参数可较好反映蠕变曲线的非线性特征。经比较, 计算曲线与试验点曲线比较接近, 说明该流变本构模型能较好的反映出锦屏绿砂岩在卸荷条件下的衰减蠕变阶段和稳定流变特性。

关键词: 岩石力学; 卸荷三轴流变试验; 锦屏二级水电站; 非线性损伤 Burgers 模型; 损伤变量

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)03 - 0528 - 07

STUDY OF UNLOADING TRIAXIAL RHEOLOGICAL TESTS AND ITS NONLINEAR DAMAGE CONSTITUTIVE MODEL OF JINPING STATION GREEN SANDSTONE

ZHU Jiebing, WANG Bin, WU Aiqing

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: Taking green sandstone samples from the diversion tunnel of Jinping II hydropower station as research objective, the unloading triaxial rheological tests by keeping axial stress and unloading lateral stress by steps are performed in laboratory. According to experimental results, the creep laws of axial and lateral deformations under unloading stress path are studied. Development of lateral plastic deformation is more rapid than that of the axial direction; and the response to failure in lateral direction is more obvious than that in axial direction. After detailed research and analysis of the test results, and considering damage effects of rock parameters, the damage evolution equation and nonlinear rheological Burgers model with various parameters are proposed. In the model, the creep parameters of sandstone are weakened with viscous strain gradually, so the deterioration process of the material can be reflected by unsteady creep parameters directly. By taking the sum square of survival difference as optimization objective, the least square embedded in Levenberg-Marquardt(LM) algorithm is adopted to optimize the fitting parameters of models. And then, nonlinear damage rheological constitutive model is established. By

收稿日期: 2009 - 08 - 05; **修回日期:** 2009 - 11 - 01

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(40872192); 国际自然科学基金重点项目(50639090)

作者简介: 朱杰兵(1970 -), 男, 博士, 1992年毕业于山东科技大学岩土工程专业, 现任高级工程师, 主要从事岩石力学试验与分析方面的研究工作。
E-mail: zhujiebing@yahoo.cn

comparing with the test data, the fitting curves are well fitted with test data curves; it is shown that the rheological model can preferably present attenuating creep and steady rheological characteristics of Jinping green sandstone.

Key words: rock mechanics; unloading triaxial rheological tests; Jinping II hydropower station; nonlinear damage Burgers model; damage variable

1 引言

岩石流变特性作为岩石重要的力学特性之一, 与岩石工程长期稳定性紧密相关。工程实践表明, 岩体开挖卸荷后其变形具有时间效应, 岩体失稳破坏与时间有着密切的关系, 尤其是深埋于地下的洞室或巷道, 其失稳和破坏不是在开挖完成后立即发生, 而是经过一段时间后才发生。因此, 围岩具有随时间增长而缓慢变形的明显特征, 这就是卸荷条件下岩石流变现象^[1, 2]。

目前, 大部分的岩石流变特性研究中, 一般假定模型中的参数是定常的, 即力学参数随着时间并不变化。但试验已证实, 在应力场、渗流场等长期作用下, 蠕变流动导致由于其内部新裂纹的产生和已有裂纹的不断扩展而不断损伤, 岩石弹性模量、强度和黏性参数等通常都随时间的增长而降低。一般可以表达为^[2]

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{\eta(\sigma, \Omega, t)} \sigma \quad (1)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为蠕应变率; η 为模型力学系数, 是应力水平 σ 、应力 - 应变状态 Ω 和流变时间 t 的非线性函数。

为了描述流变过程中岩石力学性状的劣化, 近十几年来很多学者采用损伤力学等手段, 通过引入损伤因子来表征岩体的损伤演化过程, 从而反映某些力学参数随时间的非线性弱化行为。显然, 若将岩石流变力学参数看作是非定常的, 这将会更直接客观地反映材料特性的劣变过程, 从而可较好地描述岩石流变的长时特征。

基于加荷或卸荷流变试验曲线或者现场实测数据, 开展的流变本构模型研究, 有以下的典型成果: 丁志坤等^[3, 4]在页岩蠕变试验数据基础上, 将 H-K 体的弹性模量 E_k 视为非定常参数, 通过反分析方法建立一维情况下非定常黏弹性蠕变方程, 并以具体的巷道围岩模型辨识为例, 在已知现场量测位移的条件下, 判定非定常黏弹塑性模型更能准确地反映围岩的变形性能; 张强勇等^[5]基于压缩蠕变实验结果, 在假定岩体蠕变参数随时间逐步弱化的基础上,

建立了加载条件下的蠕变损伤本构模型; 许宏发^[6]通过软岩的单轴压缩蠕变试验, 认为软岩的强度和弹性模量均为时间的函数, 它们的变化规律具有相似性, 都随时间的延长而降低, 提出了长期弹性模量和长期损伤变量的概念; 闫子舰等^[7]对锦屏一级水电站左岸砂板岩开展了单级和多级加载流变试验, 提出非线性黏滞系数的牛顿体, 建立了一个新的岩石非线性黏弹塑性蠕变模型; 在卸荷流变研究方面, 朱杰兵等^[8]对页岩进行恒轴压、逐级卸围压下的卸荷流变试验, 并初步建立了卸荷条件下的定参数流变模型。

分析认为, 尽管已有学者开展了卸荷条件下的岩石定参数流变模型研究, 但基于卸荷流变试验成果, 开展非定常流变本构模型的研究还鲜见报道, 而卸荷条件下的岩石非定常蠕变本构模型与工程实际更为接近, 需要进一步研究。

基于此, 本文以雅砻江锦屏二级水电站引水隧洞绿砂岩为研究对象, 采用恒轴压、逐级卸围压的方式开展三轴卸荷流变试验, 并深入研究了相应的岩石蠕变阶段的黏弹性变形特征。随后, 从材料损伤的角度出发, 认为岩石流变力学参数随着黏性应变的负指数形式逐步弱化, 建立起岩石损伤演化方程及变参数非线性 Burgers 模型。基于 Levenberg-Marquardt(LM)算法, 对试验数据开展相应拟合, 得到模型参数, 所获得的参数可较好反映卸荷蠕变的非线性特征。

2 试件基本力学特性

常规试验和卸荷流变试验所用试样均采用锦屏二级水电站交通辅助洞西端的三迭系上统绿砂岩 (T_3)。试验前加工成直径 $\phi 50$ mm, 高度为 100 mm 的标准圆柱体试样, 自然风干。在进行卸荷流变蠕变试验前, 首先进行室内单轴、三轴压缩试验。不同围压 σ_3 下绿砂岩常规三轴试验全过程应力 - 应变曲线如图 1 所示。

试验表明, 该岩样的单轴抗压强度为 59.8 MPa, 平均变形模量为 13.0 GPa, 弹性模量 14.1 GPa; 岩样三轴压缩抗剪强度参数为: 内摩擦角为 42° , 黏聚力为 10 MPa。

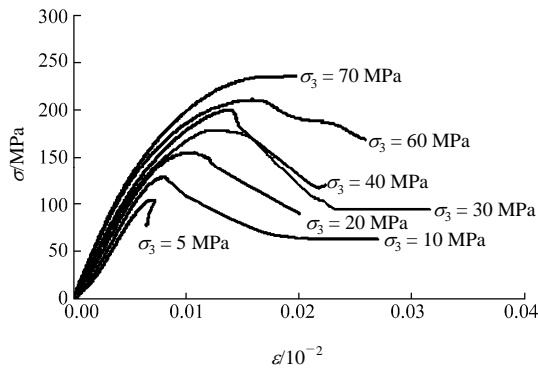


图1 绿砂岩三轴试验全过程 σ - ϵ 关系曲线

Fig.1 Complete σ - ϵ curves by triaxial compressive test of green sandstone



图2 TLW-2000型岩石三轴蠕变试验机

Fig.2 Rock triaxial creep tester TLW-2000

3 三轴卸荷流变试验及试验成果

3.1 试验方法

本次卸荷流变试验采用 TLW-2000 型岩石三轴蠕变试验机(见图 2)。设备配置了德国 DOLI 公司原装进口的全数字伺服控制器、日本松下交流伺服电机、采用美国泰瑞泰克公司技术生产的高精度岩石变形传感器。设备最大加载围压为 70 MPa, 最大轴向载荷为 2 000 kN。稳压系统创新性地采用先进的伺服控制、滚珠丝杠和液压等技术组合, 达到了良好的稳压效果^[9]。

根据现场地应力实测资料并参照以上岩石三轴试验成果, 对编号 A-4-2 岩样在轴压 $\sigma_1 = 60$ MPa, 围压 $\sigma_3 = 40$ MPa 条件下开始卸荷, 采用分级卸围压的方式以达到逐级增加偏应力 $\sigma_1 - \sigma_3$ 。

具体试验过程为: 首先按 500 N/s 的加载速率加静水压力至 40 MPa, 然后再以同样速率加载轴压 σ_1 至 60 MPa, 待轴向应力和横向应力曲线稳定后, 均重新清零。借鉴分级加载的陈氏加载法^[10], 保持轴压 σ_1 恒定, 逐级卸围压 σ_3 。在每卸一级围压后, 保持一段时间, 待稳态蠕变出现后, 再卸下一级围压, 直至卸到岩样破坏时试验结束。本次试验采用的应力分级方案见表 1。

表1 卸荷流变试验偏应力加载方案

Table 1 Deviator stress loading scheme of unloading rheological test

分级	σ_1 /MPa	σ_3 /MPa	$(\sigma_1 - \sigma_3)$ /MPa
第一级	60	40	20
第二级	60	30	30
第三级	60	20	40
第四级	60	15	45
第五级	60	10	50

3.2 试验成果

恒轴压(60 MPa)逐级卸围压应力路径下绿砂岩的蠕变曲线如图 3 所示, 对三轴卸荷流变实验数据进行统计, 结果见表 2。

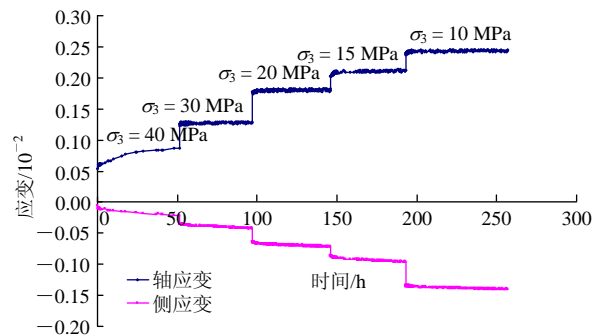


图3 轴向应力 $\sigma_1 = 60$ MPa 逐级卸围压蠕变曲线 (岩样 A-4-2)

Fig.3 Creep curves when confining pressure gradually unloading at $\sigma_1 = 60$ MPa(A-4-2)

表2 三轴流变试验数据统计

Table 2 Statistical data of unloading triaxial rheological tests

围压 σ_3 /MPa	偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ /MPa	蠕变值 / 10^{-6}		稳定蠕变速率 / $(10^{-6} \cdot h^{-1})$		弹性模量 /GPa	
		轴向	侧向	轴向	侧向	轴向	侧向
40	20	286.3	112.8	4.69	1.74	37.4	400.0
30	30	48.4	76.0	0.37	1.36	28.2	72.2
20	40	28.8	89.9	0.35	1.45	22.1	48.6
15	45	104.8	109.3	0.21	1.45	20.1	37.1
10	50	52.8	70.0	0.11	2.04	19.9	13.3

分析表明, 岩样的卸荷流变也表现出与常规三轴流变试验所不同的变形规律, 尤其是侧向蠕变特性较轴向更明显, 呈现明显的侧向扩容效应。而常规三轴流变试验中, 一般侧向的蠕变轴向要小很多^[11]。卸荷不仅引起侧向出现较大的瞬时应变而且伴随有较大的黏性应变。如图 2 所示, 岩样 A-4-

2 在围压卸荷至 20 MPa 时, 从 97.01 h 开始, 经过 60 h 后, 岩样的侧向黏性应变增加了 2.03×10^{-3} , 而轴向黏性应变增加了 1.21×10^{-3} , 比侧向变形增加还要小。在卸围压至 20, 10 MPa 时均有相同规律。

表 2 表明, 在第一级应力水平下岩样的侧向蠕变量及稳定蠕变速率均较轴向小很多, 主要原因是岩样自静水加载开始轴向及侧向始终处于三向受压状态, 岩石材料内部原有裂隙被压密及孔洞受压闭合, 而岩石材料本身又未达到受压屈服, 因此, 其侧向在高围压的约束及较低的应力水平下没有出现较大变形。当围压逐级卸去后, 产生了平行于轴向的张裂纹, 张裂纹的扩展不仅导致在卸围压瞬时试样侧向产生较大的变形而且微裂纹的扩展随着卸荷偏应力增加而逐步加快。

为了进一步研究岩样 A-4-2 整个卸荷流变过程中的变形特点, 绘制卸围压作用下典型的偏应力-应变关系曲线如图 4 所示。

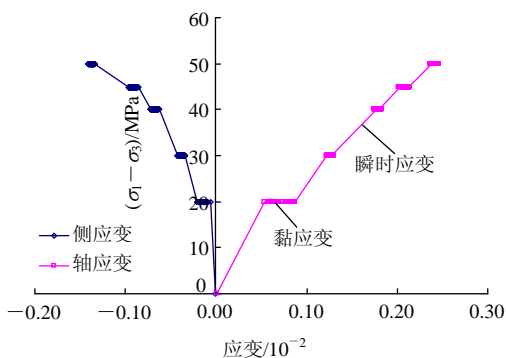


图 4 流变试验中典型的偏应力-应变关系曲线

Fig.4 Typical curves of deviator stress-strain in rheological test

由图 4 中的流变试验全过程应力-应变曲线可知, 在卸围压的瞬时, 试样的变形发生了明显变化: 侧向变形曲线斜率变小, 表明侧向扩容加速; 而轴向压缩变形基本上保持原来的曲线斜率变化, 直到试样破坏。由表 2 可知, 试样 A-4-2 的侧向应变曲线斜率由加载时的 400.1 GPa 减小到最后一级卸荷时的 13.3 GPa。同样, 虽然轴向应变曲线斜率(即变形模量)由于瞬时应变及黏性应变对岩石的逐步损伤也有所下降, 但轴向应变曲线斜率的变化幅度与侧向相比要小很多, 仅从 37.4 GPa 减小到 20.0 GPa。这说明在卸除围压的过程中由于试样侧向部分失去约束, 在偏应力作用下, 试样表面产生平行于轴向的张裂纹使试样表面的应力有所释放并向试样内部调整转移, 与此同时, 裂纹也随之向内部发

展, 在宏观上表现为试样侧向出现明显的扩容现象, 这与岩石瞬时卸荷试验中得到的变形规律一致^[12]。

4 变参数 Burgers 流变模型及参数辨识

4.1 变参数 Burgers 模型

由蠕变试验曲线特征可以看出, 在偏应力荷载作用下, 存在瞬时变形, 因此模型应有弹性元件; 瞬时变形后, 应变随时间逐步增加, 因此应有黏性元件; 随着时间增加, 应变速率逐步减小, 并缓慢趋于恒定, 因此具备第一阶段减速蠕变及第二阶段稳定蠕变特征; 基于这些特点, 可以采用四元件 Burgers 模型描述该流变行为。

鉴于 Burgers 模型只能描述线性流变特征, 而实际的岩石流变过程中, 蠕变流动导致其内部新裂纹的产生和裂纹的不断扩展而出现的损伤, 应变值随着应力水平、应力应变状态和时间呈现非线性变化。基于此, 以 Burgers 模型为基础, 并结合岩石蠕变的损伤机制, 将岩石的蠕变损伤的演化假定为负指数函数形式^[13~15], 采用损伤 Burgers 模型来描述岩石的蠕变特性, 则该模型如图 5 所示。

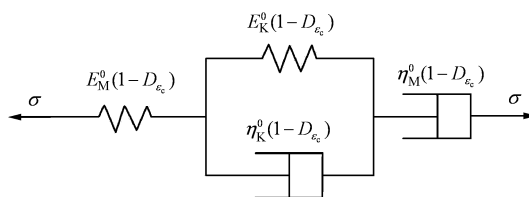


图 5 考虑损伤的 Burgers 流变模型

Fig.5 Burgers rheological model considering damage effects

在本模型中, 元件系数 $A(\epsilon_c)$ 在蠕变过程中随着黏性应变的增加不断衰减, 即模型的元件系数为黏性应变 ϵ_c 的函数:

$$A(\epsilon_c) = Af(\epsilon_c) = A_0 e^{-m\epsilon_c} \quad (2)$$

式中: A_0 为参数 A 的初值, $f(\epsilon_c)$ 为损伤函数, m 为与岩石本身性质相关的系数。则岩石蠕变损伤量 $D(\epsilon_c)$ 可表示为

$$D(\epsilon_c) = 1 - e^{-m\epsilon_c} \quad (3)$$

定参数不考虑损伤时, 根据李世平^[16]的研究, 可得到 Burgers 模型的蠕变方程为

$$\epsilon = \sigma \left[\frac{1}{E_M^0} + \frac{1}{\eta_M^0} t + \frac{1}{E_K^0} \left(1 - e^{-\frac{E_K^0}{\eta_K^0} t} \right) \right] \quad (4)$$

式中： E_M^0 ， η_M^0 ， E_K^0 ， η_K^0 为定参数 Burgers 模型黏弹性系数。在式(4)基础上，假设材料为各向同性损伤，各蠕变参数的损伤规律相同，则建立变参数 Burgers 模型的蠕变方程如下：

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{e^{-m\varepsilon_c}} \left[\frac{1}{E_M^0} + \frac{1}{\eta_M^0} t + \frac{1}{E_K^0} \left(1 - e^{-\frac{E_K^0}{\eta_K^0} t} \right) \right] \quad (5)$$

由式(5)可以看出，考虑损伤后的 Burgers 模型多了 $(1/e^{-m\varepsilon_c})$ 非线性项。

式(5)中的 m 值反映了岩石蠕变损伤的程度， m 值越高，相同黏性应变下材料的损伤程度越高。基于朱杰兵^[12]的研究成果，本次试验曲线拟合选择 $m = 40$ ，可以得到满意的拟合结果。损伤变量 D 随蠕变量变化关系如图 6 所示。

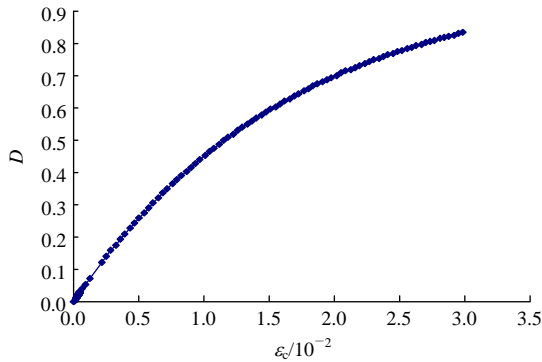


图 6 损伤变量随蠕变量变化关系

Fig.6 Relationship of damage variable vs. creep strain

从图 6 中曲线可以看出，在较小黏性应变水平阶段，本模型中损伤随黏性应变的增大基本上呈线性稳定发展，此阶段损伤变量的非线性表现并不明显，但随着黏性蠕变增大，损伤呈非线性特性增加。该曲线合理地反映了稳定蠕变过程中损伤对蠕变的影响。

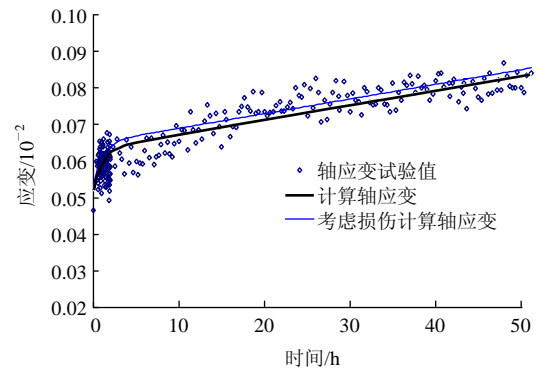
4.2 模型的辨识与验证

基于蠕变试验结果，采用合适的方法对蠕变模型中的参数进行识别，得到合理的模型参数。目前，确定岩石流变模型参数的方法主要有：回归反演法、最小二乘法以及流变曲线分解法等。其中，用最小二乘法来拟合曲线，从而确定相关参数的方法较为普遍，但最小二乘法对于非线性问题，其解决的效果并不理想，若迭代的初始值选取不合理则会导致最终结果不收敛，或者收敛于局部极小点，且收敛速度比较慢。本文将 Levenberg-Marquardt(LM)算法引入到求解非线性的最小二乘法里，使其迭代收敛速度加快，不易收敛到局部极小点，并且对迭代初

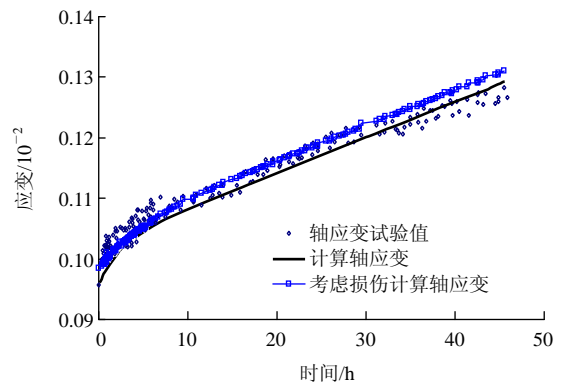
始值的依赖性不强；该方法能够快速准确地识别出蠕变模型中的参数，拟合效果好，解决了参数识别中初始参数值选取的问题。

图 7 分别为原始蠕变测试数据以及采用定参数 Burgers 模型、变参数 Burgers 模型分别拟合曲线的对比图。

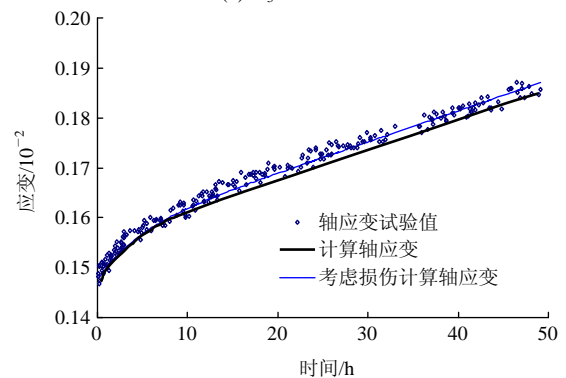
由图 7 可以看出，采用非线性损伤 Burgers 模型回归后的蠕变曲线更接近于试验曲线，而且相对于线性模型，回归后的蠕变量稍大，这主要是因为考虑了元件在蠕变过程中的损伤。相对于不考虑损伤的 Burgers 流变模型，本文提出的模型能更好地反映卸荷条件下绿砂岩的蠕变特性。辨识的 Burgers 模型参数见表 3。



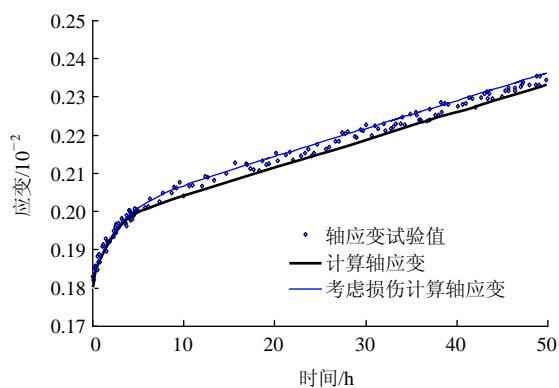
(a) $\sigma_3 = 40$ MPa



(b) $\sigma_3 = 30$ MPa



(c) $\sigma_3 = 20$ MPa



(d) $\sigma_3 = 10 \text{ MPa}$

图 7 不同围压下轴向蠕变曲线

Fig.7 Axial creep curves under different confining pressures

表 3 Burgers 模型参数

Table 3 Parameters of Burgers model

轴压 /MPa	围压 /MPa	轴向蠕变模型参数				t_d /h	$\dot{\epsilon}_{11}$ /(10^{-6} h^{-1})
		E_M^0 /MPa	η_M^0 /($\text{MPa} \cdot \text{h}$)	E_K^0 /MPa	η_K^0 /($\text{MPa} \cdot \text{h}$)		
60	40	3.03×10^4	7.48×10^6	7.04×10^5	2.94×10^7	41.8	2.67
60	30	2.73×10^4	7.15×10^6	5.54×10^5	2.69×10^7	48.6	4.20
60	20	2.50×10^4	6.90×10^6	3.70×10^5	2.15×10^7	58.1	5.80
60	10	2.42×10^4	6.10×10^6	2.51×10^5	9.45×10^6	37.6	8.20
平均		2.67×10^4	6.91×10^6	4.70×10^5	2.18×10^7		

轴压 /MPa	围压 /MPa	侧向蠕变模型参数				t_d /h	$\dot{\epsilon}_{11}$ /(10^{-6} h^{-1})
		E_M^0 /MPa	η_M^0 /($\text{MPa} \cdot \text{h}$)	E_K^0 /MPa	η_K^0 /($\text{MPa} \cdot \text{h}$)		
60	40	2.21×10^5	9.87×10^6	5.25×10^5	2.75×10^7	52.4	2.03
60	30	1.08×10^5	8.17×10^6	7.00×10^5	4.38×10^7	62.6	3.67
60	20	9.58×10^4	6.12×10^6	4.94×10^5	3.14×10^7	63.6	6.54
60	10	4.79×10^4	7.11×10^6	4.78×10^5	3.74×10^7	78.2	7.03
平均		1.18×10^5	7.82×10^6	5.49×10^5	3.50×10^7		

注: $t_d = \eta_K^0 / E_K^0$, $\dot{\epsilon}_{11} = \sigma / \eta_M^0$ 。

4.3 拟合成果分析

通过对岩样蠕变曲线进行非线性拟合, 并比较轴向和侧向模型参数的变化规律, 可以看出:

(1) E_M^0 反映了岩样的卸荷瞬时变形量。如果把一点的应力应变的比值定义为割线模量。由表 3 可知, 岩石轴向及侧向割线模量均随着偏应力的增加而减小, 这体现了岩石所具有的非线性特征; 且从轴向和侧向的弹性变形模量比较来看, 两者并不一致, 这也说明锦屏砂岩在流变过程中各向异性的特点不可忽视。

(2) $t_d = \eta_K^0 / E_K^0$ 反映了岩样达到稳定蠕变所经

历的时间。在每一级应力水平下, 分析轴向和侧向流变自加载瞬时至进入稳定蠕变的时长, 表明侧向进入稳定蠕变阶段所耗时间一般较轴向要长, 说明加载结束后围压卸荷在岩样中产生的竖向裂纹在轴向很快达到稳定, 而侧向由于裂纹的扩展, 变形稳定需要更长时间, 并且达到稳定的时间随着应力水平的提高而相应增加。

(3) $\dot{\epsilon}_{11} = \sigma / \eta_M^0$ 反映该级荷载下稳定蠕变速率。由表 3 可知, 轴向和侧向的稳定蠕变速率均随着偏应力水平的提高而增大。

(4) 由于绿砂岩具有各向异性以及非线性的特点, 在同一级荷载下轴向和侧向的蠕变参数各自独立, 建立三维本构方程时必须考虑岩石的各向异性以及非线性特征。

5 结 论

基于锦屏二级水电站引水隧洞绿砂岩的室内三轴卸荷流变试验及流变模型研究, 可以得出以下结论:

(1) 绿砂岩在卸围压产生的偏应力增加作用下, 其轴向及侧向均表现出一定的蠕变行为。其蠕变在低偏应力作用下主要表现为衰减蠕变阶段和稳定蠕变阶段, 轴向蠕变曲线随偏应力的逐级增加表现出与加载三轴流变曲线相似的规律, 而侧向蠕变特性较轴向更明显, 呈现扩容效应。

(2) 在卸围压的瞬时, 试样的变形发生了明显变化: 侧向变形曲线斜率变小, 表明侧向扩容加速; 而轴向压缩变形基本上保持原来的曲线斜率变化, 直到试样破坏。

(3) 从材料损伤的角度出发, 认为岩石流变力学参数随着黏性应变的负指数形式逐步弱化, 从而建立起岩石损伤演化方程及变参数非线性 Burgers 模型。基于 Levenberg-Marquardt(LM) 算法, 对试验数据开展相应拟合。经比较, 计算曲线与试验点曲线比较接近, 说明该流变本构模型能较好的反映出锦屏绿砂岩在卸荷条件下的衰减蠕变阶段和稳定流变特性。

参考文献(References):

[1] 孙 钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1 081 - 1 106.(SUN Jun. Rock rheological

- mechanics and its advance in engineering applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1 081 - 1 106.(in Chinese)
- [2] 李建林. 卸荷岩体力学理论与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.(LI Jianlin. Theory and application of unloading rock masses[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.(in Chinese))
- [3] 丁志坤, 吕爱钟. 岩石黏弹性非定常蠕变方程的参数辨识[J]. 岩石力学, 2004, 25(增): 37 - 40.(DING Zhikun, LU Aizhong. Parameter identification of non-stationary creep equation of rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(Supp.): 37 - 40.(in Chinese))
- [4] 吕爱钟, 丁志坤, 焦春茂, 等. 岩石非定常蠕变模型辨识[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 16 - 21.(LU Aizhong, DING Zhikun, JIAO Chunmao, et al. Identification of non-stationary creep constitutive models of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 16 - 21.(in Chinese))
- [5] 张强勇, 杨文东, 张建国, 等. 变参数蠕变损伤本构模型及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 732 - 739.(ZHANG Qiangyong, YANG Wendong, ZHANG Jianguo, et al. Variable parameters-based creep damage constitutive model and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 732 - 739.(in Chinese))
- [6] 许宏发. 软岩强度和弹性模量的时间效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(3): 246 - 251.(XU Hongfa. Time-dependent behaviors of strength and elasticity modulus of weak rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(3): 246 - 251.(in Chinese))
- [7] 闫子舰, 夏才初, 李宏哲, 等. 分级卸荷条件下锦屏大岩流变规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(10): 2 153 - 2 159.(YAN Zijian, XIA Caichu, LI Hongzhe, et al. Experimental study of rheological properties of marble in Jinping hydraulic power station under unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(10): 2 153 - 2 159.(in Chinese))
- [8] 朱杰兵, 汪 斌, 杨火平, 等. 页岩卸荷流变力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 2): 4 552 - 4 556.(ZHU Jiebing, WANG Bin, YANG Huoping, et al. Experimental study of rheological mechanical properties of shale under unloading condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.2): 4 552 - 4 556.(in Chinese))
- [9] 邬爱清, 周火明, 胡建敏, 等. 高围压岩石三轴流变试验仪研制[J]. 长江科学院院报, 2006, 23(4): 28 - 31.(WU Aiqing, ZHOU Huoming, HU Jianmin, et al. Development of a triaxial rheological testing machine with high pressure confinement in rock mechanics[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2006, 23(4): 28 - 31.(in Chinese))
- [10] 范广勤. 岩土工程流变力学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.(FAN Guangqin. Rheology mechanics of geotechnical engineering[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1993.(in Chinese))
- [11] 徐卫亚, 杨圣奇, 杨松林, 等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究(I): 试验结果[J]. 岩石力学, 2005, 26(4): 531 - 537.(XU Weiya, YANG Shengqi, YANG Songlin, et al. Investigation on triaxial rheological mechanical properties of green schist specimen(I): experimental results[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 531 - 537.(in Chinese))
- [12] 朱杰兵. 高应力下岩石卸荷及其流变特性研究[博士学位论文][D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009.(ZHU Jiebing. Study of unloading mechanics and its rheological properties of rock under high stress[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2009.(in Chinese))
- [13] 陈卫忠, 王者超, 伍国军, 等. 盐岩非线性蠕变损伤本构模型及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 467 - 472.(CHEN Weizhong, WANG Zhechao, WU Guojun, et al. Nonlinear creep damage constitutive model of rock salt and its application to engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 467 - 472.(in Chinese))
- [14] 杨春和, 白世伟, 吴益明. 应力水平及加载路径对盐岩时效的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 270 - 275.(YANG Chunhe, BAI Shiwei, WU Yiming. Stress level and loading path effect on time dependent properties of salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 270 - 275.(in Chinese))
- [15] 袁海平, 曹 平, 许万忠, 等. 岩体黏弹塑性本构关系及改进 Burgers 蠕变模型[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 796 - 799.(YUAN Haiping, CAO Ping, XU Wanzhong, et al. Visco-elastoplastic constitutive relationship of rock and modified Burgers creep model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6): 796 - 799.(in Chinese))
- [16] 李世平. 岩石力学简明教程[M]. 徐州: 中国矿业学院出版社, 1986.(LI Shiping. Short course of rock mechanics[M]. Xuzhou: Chinese Mining Institute Press, 1986.(in Chinese))