

锦屏绿片岩分级加载流变试验研究

石振明^{1,2}, 张 力^{1,3}

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 3. 上海广联建设发展有限公司, 上海 200438)

摘要: 对锦屏二级水电站引水隧洞围岩进行了分级加载流变试验, 分析了试验过程中出现的现象、试样轴向、侧向应力-应变关系, 以及利用伯格斯模型求得的流变模型参数. 分析结果表明, 各试样总应变量轴向大于侧向, 而各式样总流变量侧向大于轴向, 流变和应变表现出不一致性; 各级流变的流变量随各级应力的增加在逐级增加, 各级流变的轴向流变量和侧向流变量占轴向总流变量和侧向总流变量的百分比是相似的; 各试样的各级瞬时变形的弹模不断增大, 符合岩石流变试验的一般性规律; 在轴向和侧向两个方向上存在明显的各向异性, 侧向能更快速和灵敏的反映应力变化引起的流变特性的改变; 各流变参数均能正常反映绿片岩流变规律, 伯格斯模型能较好的模拟锦屏绿片岩单轴流变特性.

关键词: 绿片岩; 流变试验; 伯格斯模型; 流变参数; 各向异性

中图分类号: TU 41

文献标识码: A

rheology and strain show an inconsistency. The rheological behaviours of all levels increase with the increasing of every stress levels. The axial rheology and lateral rheology of each level take the similar percentage of the total strain value on axial and lateral. Instantaneous deformation elastic model at all levels of each specimen is increasing, which complies with the general laws of rock rheology tests. Obvious anisotropy exists both in axial and lateral direction, and the phenomenon on the lateral can be more rapid and sensitive to reflect the rheological properties caused by the stress changes. The rheological parameter can reflect the greenschist rheological law, and the Burgers Model can be a better simulation of the uniaxially rheological properties of Jinping greenschist.

Key words: green schist; rheological test; Burgers Model; rheological parameters; anisotropy

Study on Rheological Test of Jinping Greenschist Under Step Load

SHI Zhenming^{1,2}, ZHANG Li^{1,3}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Guanglian Construction Development Co. Ltd., Shanghai 200438, China)

Abstract: Rock rheology tests were carried out on greenschist specimens from auxiliary tunnel of Jinping II Hydropower Station by step loading method. Phenomenon of the tests and the specimen axial and lateral stress-strain relationship as well as the flow obtained using the Burgers model varying parameters were analyzed. The results show that all samples' strain on axial is greater than the lateral, while the rheology on lateral is larger than the axial, then the

单轴流变试验是岩石流变特性研究中最基本的试验手段之一, 国内、外学者选择软岩和硬岩针对不同影响条件做了大量的试验研究^[1-10]. 李永盛等^[2]对大理岩、红砂岩、粉砂岩和泥岩四种不同岩性的软岩进行了单轴压缩蠕变和松弛试验. 彭苏萍^[3]以显德汪矿主输送带大巷为研究对象, 针对“三软”煤层巷道围岩大变形、难支护的具体情况, 进行了泥岩的三轴压缩流变试验. 杨春和^[4-5], 通过对单轴、三轴盐岩变应力路径的应力松弛与蠕变试验进行研究. 朱合华等^[6], 对任胡岭隧道凝灰岩进行了干燥和饱水状态下的单轴压缩蠕变试验. 李化敏等^[7], 利用自行研制的 UCT-1 型蠕变试验装置, 采用单调连续加载和分级加载方式, 对河南南阳南召大理岩进行了单轴压缩蠕变试验. 范庆忠等^[8], 以山东东部的红砂岩为例, 采用重力加载式流变仪, 在分级加载条件下

收稿日期: 2009-12-08

基金项目: 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限公司雅砻江水电开发联合研究基金项目(50579088, 50639090)

第一作者: 石振明(1968—), 男, 副教授, 工学博士. 主要研究方向为岩石力学与地质灾害防治. E-mail: shi_tongji@tongji.edu.cn

对岩石的蠕变特性进行了单轴压缩蠕变试验研究. 崔希海等^[9],利用重力驱动偏心轮式杠杆扩力加载式流变仪,对红砂岩进行了单轴压缩蠕变试验研究.

以往的研究总结了各种应力路径、不同含水量等条件下的软、硬岩单轴流变规律,但是绿片岩兼具硬岩和软岩的部分特性,其抗压强度对于盐岩和其他软岩较高,对大理岩、花岗岩又较低,对流变特性的某些方面与软岩和硬岩都有较大不同,所以选用绿片岩做流变试验,一方面也是为了研究其本身流变特性,并与其他软岩、硬岩的流变特性进行比较,积累相关经验;另一方面,诸多试验中大多从单一方向(轴向或者侧向)着手研究岩石的流变特性,但是很少有学者从轴向和侧向两个方向对岩石的单轴流变特性进行研究.为了得到绿泥石片岩的单轴流变特性,在垂直层理(轴向)和平行层理(侧向)两个方向上进行研究才能得到更为客观的岩石流变特性.

本文采用对试样进行逐级加荷载流变试验,并在轴向和侧向分别采集流变试验数据,得到各级流变参数,比较分析岩石单轴流变在各方向上的流变特性.

1 试验设备及试验方法

1.1 试验装置

绿片岩单轴压缩蠕变试验在同济大学 CSS—1950 型双轴压缩流变试验机上完成.该试验机采用机电伺服机构提供垂直方向加载.加载能力:垂直方向为 500 kN(压),负荷精度为 1%示值.试验机所配的引伸计采用 4 个差动变压器作传感器,可以同时测量试样两侧垂直轴和水平轴标距内的变形,变形量测范围为 ± 3 mm,精度为 0.5%示值.

1.2 试样特征

试验所采用的 T₁ 绿片岩取自锦屏二级水电站辅助交通洞 B 洞西端 6 号横通道,取样里程约为 BK3+065,该位置的埋深约为 1 600 m,其自重应力约为 42 MPa.绿片岩具片状构造,常有灰白色大理岩条带及透镜体,层理比较发育,层理的产状为倾向 296°,倾角 88°.绿片岩一般情况下属于硬质岩,自然状态下平均单轴抗压强度约为 70 MPa,但是本文所用绿片岩属于超高地应力状态下的软岩,夹杂大理岩条带不均,单轴抗压强度约为 60 MPa.

1.3 试验方案

将绿片岩制作成尺寸均为 $100 \times 100 \times 100$ mm³ 的方形试件,放入单轴流变试验机的试验平台,并调

整好中心位置,使岩样的轴线与试验机加载中心线相重合.按 $0.01 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的加载速率,通过伺服系统给岩样施加至预定的轴压值,当轴压加载至设定的第一级应力水平时,测试岩样轴向应变和侧向应变与时间的关系.试验中当观测到的位移增量小于 $0.01 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,即认为因加载该级轴压所产生的蠕变已基本趋于稳定,进入下一级加荷.重复上述操作步骤,直到最高级水平应力时或者使岩样发生流变破坏时,此时取出岩样,描述岩样状态或者破裂形式.根据试验所测得的不同应力水平下轴向应变和侧向应变与时间以及应力的试验数据,进行整理分析,以得出在加轴压和不同轴压情况下的岩石流变特性.试验原准备试样为 6 块(S₀、S₁、S₂、S₃、S₄ 和 S₅),除去 S₁ 试样为试验前调试仪器、获取试验经验所用试样,剩余的 5 块试样中试验结果较为理想的试样只有试样 S₀ 和 S₃,故只对这两个试样进行具体分析.表 1 和表 2 为试样 S₀ 和 S₃ 的加载概况表.

表 1 试样 S₀ 加载概况表
Tab.1 Loading conditions of sample S₀

等级	荷载/MPa	持续时间/h
1	9.8	47.54
2	20.0	47.20
3	30.3	45.96
4	40.4	0.32

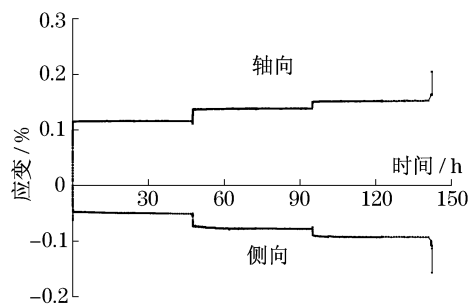
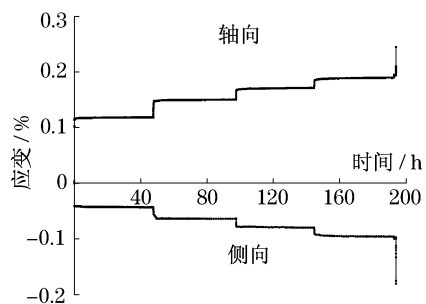
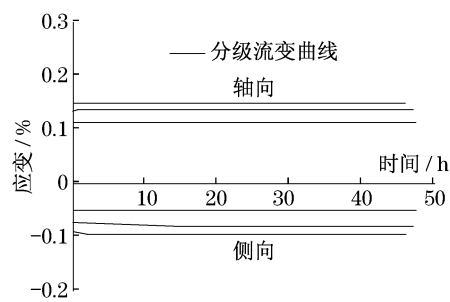
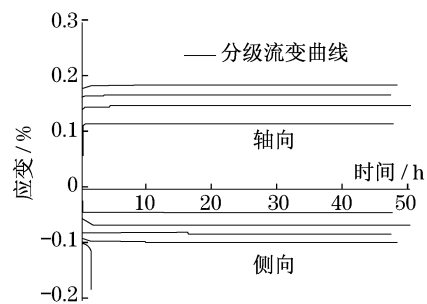
表 2 试样 S₃ 加载概况表
Tab.2 Loading conditions of sample S₃

等级	荷载/MPa	持续时间/h
1	9.9	47.37
2	20.1	49.83
3	30.4	47.11
4	40.5	48.04
5	45.6	1.33

2 试验结果

2.1 应变-时间分析

通过对试验采集数据的整理得到各试样流变全过程曲线、分级流变曲线、应力-应变曲线和流变数据统计表格.其中图 1 和图 2 为试样 S₀ 和 S₃ 的流变全过程曲线,即应变-时间曲线,图 3 和图 4 为试样 S₀ 和 S₃ 的分级流变曲线,即应变-时间曲线,表 3 和表 4 分别为试样 S₀ 和 S₃ 流变量、应变情况表.

图 1 S_0 试样流变全过程曲线Fig.1 Creep curves under step loading confining pressure of model S_0 图 2 S_3 试样流变全过程曲线Fig.2 Creep curves under step loading confining pressure of model S_3 图 3 S_0 试样分级流变曲线Fig.3 Creep curves under each loading stepwise of S_0 model图 4 S_3 试样分级流变曲线Fig.4 Creep curves under each loading stepwise of S_3 model

从图 1~4 和表 3~4 可以得出:

(1) 就各试样总应变变量来讲,轴向变形大于侧向变形,试样 S_0 在轴向的总应变变量达到了 0.163 1,而在侧向的总应变变量只有 0.108 7,试样 S_3 的在轴向的总应变变量达到了 0.195 0,而在侧向的总应变变量只有 0.099 9.

(2) 就各式样总流变量来看,侧向总流变量大于轴向总流变量,试样 S_0 在侧向的总流变量达到了 0.014 2,而在轴向的总流变量只有 0.006 9,试样 S_3 的在侧向的总流变量达到了 0.019 5,而在轴向的总流变量只有 0.018 0.

(3) 就各级流变情况来讲,各级流变的流变量在逐级增加, S_3 试样第 1 级流变轴向流变量 0.001 6 占轴向总流变量的 22.75%,侧向流变量 0.003 3 占侧向总流变量的 23.34%;第 2 级流变轴向流变量 0.002 4 占轴向总流变量的 35.36%,侧向流变量 0.004 7 占侧向总流变量的 33.17%;第 3 级流变轴向流变量 0.002 6 占轴向总流变量的 37.54%,侧向流变量 0.005 7 占侧向总流变量的 40.14%;第 4 级流变阶段时间较短主要为加速流变,只维持 0.1 h 左右就发生破坏,其轴向流变量 0.000 3 占轴向总流变量的 4.23%,侧向流变量 0.000 5 占侧向总流变量的 3.17%.

表 3 试样 S_0 流变量、应变变量情况分析表Tab.3 Rheology and strain conditions of sample S_0

流度 轴向	各级流变分量		各级应变分量		各级截止时应变量	
	轴向	侧向	轴向	侧向	轴向	侧向
第 1 级	0.001 6	-0.003 3	0.116 0	-0.051 1	0.116 0	-0.051 1
	22.75%	23.34%	71.12%	47.02%	71.12%	47.02%
第 2 级	0.002 4	-0.004 7	0.022 4	-0.027 3	0.138 4	-0.078 4
	35.36%	33.17%	13.75%	25.11%	84.87%	72.13%
第 3 级	0.002 6	-0.005 7	0.013 9	-0.015 0	0.152 3	-0.093 4
	37.54%	40.14%	8.49%	13.79%	93.36%	85.92%
第 4 级	0.000 3	-0.000 5	0.010 8	-0.015 3	0.163 1	-0.108 7
	4.35%	3.17%	6.63%	14.08%	100.00%	100.00%

表4 试样 S₃ 流变量、应变情况分析表
Tab.4 Rheology and strain conditions of sample S₃

流度 轴向	各级流分量		各级应变分量		各级截止时应变量	
	轴向	侧向	轴向	侧向	轴向	侧向
第1级	0.003 3	-0.003 6	0.118 2	-0.045 0	0.118 2	-0.045 0
	18.62%	18.46%	60.63%	45.05%	60.63%	45.05%
第2级	0.004 8	-0.004 8	0.032 7	-0.017 4	0.150 9	-0.062 4
	26.89%	24.53%	16.75%	17.43%	77.38%	62.47%
第3级	0.005 3	-0.006 0	0.020 2	-0.017 5	0.171 1	-0.079 9
	29.45%	30.77%	10.35%	17.48%	87.74%	79.95%
第4级	0.006 8	-0.007 1	0.018 5	-0.016 1	0.189 6	-0.096 0
	37.94%	36.26%	9.48%	16.15%	97.21%	96.11%
第5级	0.001 1	-0.001 6	0.005 5	-0.003 9	0.195 0	-0.099 9
	6.17%	8.33%	2.80%	3.93%	100.00%	100.00%

试样 S₀ 第1级流变轴向流变量 0.003 3 占轴向总流变量的 18.62%,侧向流变量 0.003 6 占侧向总流变量的 18.46%;第2级流变轴向流变量 0.004 8 占轴向总流变量的 26.89%,侧向流变量 0.004 8 占侧向总流变量的 24.53%;第3级流变轴向流变量 0.005 3 占轴向总流变量的 29.45%,侧向流变量 0.006 0 占侧向总流变量的 30.77%;第4级流变轴向流变量 0.006 8 占轴向总流变量的 37.94%,侧向流变量 0.007 1 占侧向总流变量的 36.26%;第5级流变阶段时间较短主要为加速流变,只维持 1.1 h 左右就发生破坏,其轴向流变量 0.001 1 占轴向总流变量的 6.17%,侧向流变量 0.0016 占侧向总流变量的 8.33%.

另外,根据以上数据得出:虽然各级流变在轴向和侧向流变量上来讲存在较大差异,但是,各级流变的轴向流变量和侧向流变量占轴向总流变量和侧向总流变量的百分比是相似的,这就是说各级时间内在轴向和侧向两个方向上的各级流变占各方向上流变总量的百分比是很接近的,而且试样 S₀ 和试样 S₃ 在这一点上表现出同样的规律性.试样 S₀ 轴向总流变量占轴向总应变变量 4.23%,侧向则为 13.04%;试样 S₃ 轴向总流变量占轴向总应变变量 9.22%,侧向则为 19.50%.

2.2 应力-应变分析

图5和图6分别为试样 S₀ 和试样 S₃ 应力-应变关系曲线,从图5和图6可以得出:

(1) 每级荷载在加载开始阶段都有瞬时变形阶段,在每级荷载的剩余时间内都不同程度地发生蠕变,在应力水平较低时试样 S₀ 和 S₃ 的流变现象均不明显,这是由于该绿片岩试样的单轴流变阈值大约在 25 MPa 左右,在应力低于 25 MPa 的情况下流变并不明显,在应力大于 25 MPa 时,试样 S₀ 在轴向和侧向均表现出较为明显的流变阶段,而试样 S₃ 仅在轴向表现较为明显,侧向表现并不明显,可能因为试

样 S₃ 影响侧向应变的微裂隙在从第2级荷载加载到第3级荷载过程中由加载引起的附加动荷载导致应变增加较大,在第3级应变稳定后静荷载较小导致裂缝发展停滞在较高荷载水平,第3级流变不明显,在荷载再次增高时才产生较大变形.

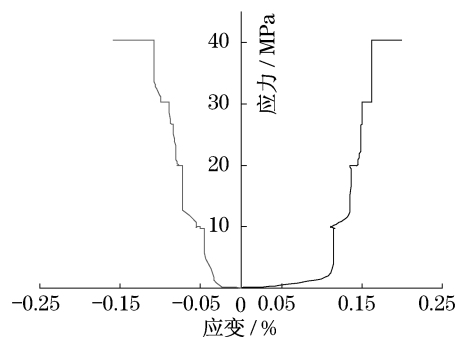


图5 S₀ 试样应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of sample S₀

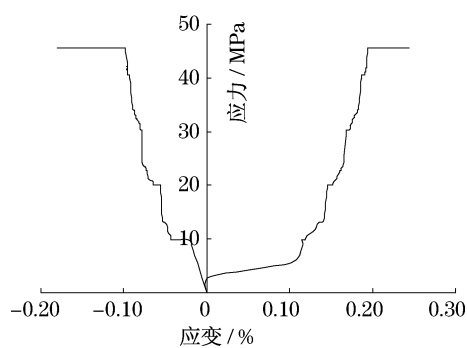


图6 S₃ 试样应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of sample S₃

(2) 试样 S₀ 在施加初级荷载时,轴向和侧向应力-应变曲线均呈向上凹状,众所周知,岩石在成岩过程中经历了众多地应力条件的改变,使岩石材料本身存在很多微裂隙,这一曲线特征可以说明这一阶段是岩石的裂隙压密阶段;第二阶段试样 S₀ 的各

级瞬时变形的弹模是不断增大的,这也符合岩石流变试验的一般性规律,但是应该明白的是,根据岩石此阶段的弹性模量的变化并不是真正的“弹性”,岩石处于微裂缝的稳定发展状态时,其表现为弹性模量基本不变,在各级加载过程中应力应变曲线表现为直线;当下一级荷载增加时,前一级的压密作用导致微裂缝的发展越发困难,岩石弹性模量增大。

试样 S_3 从其应力-应变关系图来看其规律性不如试样 S_0 规律性好,虽然也出现轴向和侧向应力-应变曲线均呈向上凹状,并表明其岩石裂隙压密阶段特性,但是第一阶段的轴向流变和第三、四阶段侧向流变并不明显,其侧向弹模变化也不明显。

(3) 在加速流变阶段出现微裂缝的贯通,其最终破坏通常是在最后一级荷载刚完成加载,其流变量开始迅速增加的阶段,在最高级荷载的快速加载下,岩石内部本已高度发展的微裂缝贯通,产生较大的宏观裂缝,并最终导致岩石破坏。

3 单轴流变模型及参数分析

目前研究岩石流变的模型主要有:开尔文模型、麦克斯韦尔模型、伯格模型、西原模型、积分型流

变本构模型等. 根据不同岩体的力学特性和流变特性选用不同的岩石流变模型,并根据实际情况对于系数参数进行适当的选用和推导可以得出适应不同岩石的流变规律的流变模型,通过与实际数据的拟合、对比进行参数的调整,最终确定模型类型、参数形式,并通过拟合计算出弹性、粘塑性参数的具体值,为相关工程提供参考依据。

虽然岩石单轴流变可以选用的模型较多,但是根据前面的试验数据分析得知绿片岩的特性要满足:加载初始阶段为瞬时应变阶段;每级轴压下试样应变随时间以负指数增长,应变速率趋于稳定;最后一级有加速蠕变现象这三点基本条件,确定绿片岩为常规非线性弹-粘弹性体. 根据以上数据特征和相应条件,本试验选用弹-粘弹性组合模型,伯格模型(Burgers)模型,对数据进行曲线拟合,并将其本构方程改写成

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma}{\eta_1} t + \frac{\sigma}{E_1} [1 - \exp(-\frac{E_1}{\eta_2} t)]$$

式中: σ 为法向应力; t 为作用时间; E_0 为弹性模量; E_1 为黏弹性模量; η_1 、 η_2 同为黏性系数。

拟合结果与原数据点对比曲线如图 7 和图 8 所示. 经拟合后得到各试样的流变参数如表 5 和表 6 所示。

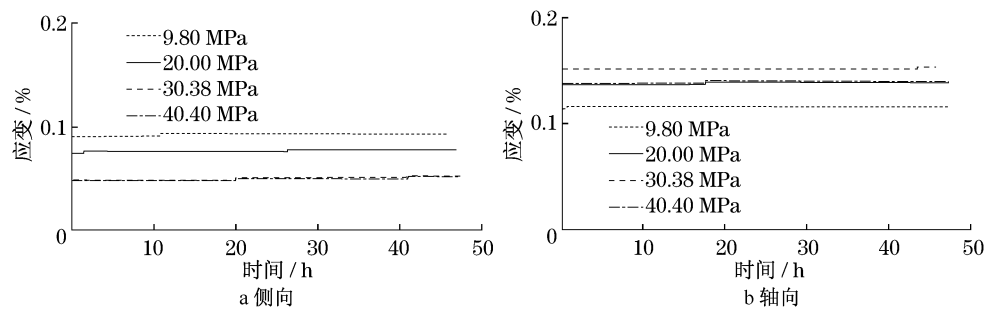


图 7 S_0 试样试验点与拟合曲线对比图

Fig. 7 Comparison between data points and model curves of sample S_0

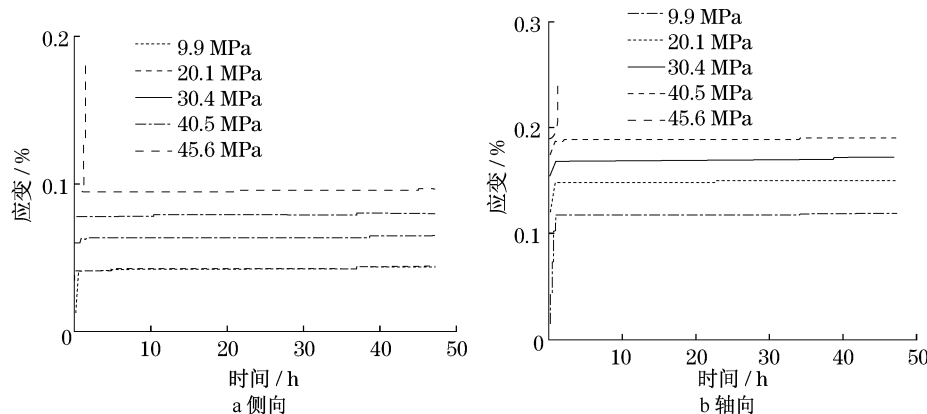


图 8 S_3 试样试验点与拟合曲线对比图

Fig. 8 Comparison between data points and model curves of sample S_3

通过对图7~8和表5~6的分析可知:除破坏荷载级别外,随着应力增加每级荷载对应的流变参数成规律性变化,流变参数 E_0 随着轴向应力的增加在大于20 MPa轴压的情况下呈现出逐渐增大的趋势,从试样 S_0 和试样 S_3 的观察来讲, E_0 在侧向大于在轴向的值; E_1 的值表现出随应力的增大逐渐增大的趋势,同样侧向大于轴向值.虽然 E_0 和 E_1 的值不断增大,但是其对应的本构模型系数 σ/E_0 和 σ/E_1 是随着应力的增大逐渐增大的,则表现出随着应力级别的升高,这也表现在实际数据点和拟合结果上,曲线的稳定蠕变阶段的曲线斜率不断增大.岩石本身由于压密作用的原因,其本身的弹性模量不断增加,表现出每一级荷载对应的瞬时应变变量减小.

表5 S_3 试样模型拟合参数表格Tab.5 Parameters of sample S_3 under the Burgers Model

试样	σ / MPa	E_0 / MPa	E_1 / MPa	η_1 / MPa·h	η_2 / MPa·h
S_3 侧向	10	1 953	240	500 000	36 000
	20	436	1 166	500 000	205 200
	30	471	2 101	750 000	442 800
	40	496	2 981	800 000	896 400
	45	35	33	281	61 200
S_3 轴向	10	2 568	86	250 000	7 200
	20	171	637	400 000	140 400
	30	198	1 673	600 000	345 600
	40	234	2 380	800 000	648 000
	45	38	34	368	302 400

表6 S_0 试样模型拟合参数表格Tab.6 Parameters of sample S_0 under the Burgers Model

试样	σ / MPa	E_0 / MPa	E_1 / MPa	η_1 / MPa·h	η_2 / MPa·h
S_0 侧向	10	743	291	200 000	39 600
	20	386	841	250 000	133 200
	30	383	2 214	375 000	500 400
	40	36	31	250	90 000
S_0 轴向	10	891	96	500 000	7 200
	20	182	747	500 000	75 600
	30	223	1 896	750 000	381 600
	40	27	23	207	104 400

另外, η_1 随着应力的增加也有逐渐增加的趋势,且轴向值大于侧向值; η_2 随着应力的增加也有逐渐增加的趋势,也存在轴向值大于侧向值的现象.同样随着 η_1 和 η_2 的增加其表现出的流变量也在增加.

就各参数表现出的规律性和在轴向、侧向规律的对比来看,轴向和侧向的流变特性表现出较强的各向异性,从变形量来讲,轴向较大,而从流变速率和流变占应变的百分比来看,侧向能更加快速和灵敏地反映应力变化带来的流变特性的改变,也能更明显的表现出流变规律.

由流变参数的变化规律和本构模型各项系数的规律来看,选用伯格斯模型能够较好的拟合试验数据,伯格斯模型可以作为锦屏绿片岩单轴流变的本构模型.

4 结论

通过对试样 S_0 和 S_3 的试验和数据分析,得到以下结论:

(1) 各试样总应变变量轴向大于侧向,而各试样总流变量侧向大于轴向,流变和应变表现出不一致性.各级流变的流变量随各级应力的增加在逐级增加,并最终发生流变速度的突然加快,导致试样破坏.

(2) 虽然各级流变在轴向和侧向流变量上来讲存在较大差异,但是,各级流变的轴向流变量和侧向流变量占轴向总流变量和侧向总流变量的百分比是相似的,各级时间内在轴向和侧向两个方向上的各级流变占各方向上流变总量的百分比很接近.

(3) 试样在施加初级荷载时,轴向和侧向应力—应变曲线均呈向上凹状,根据一般性规律判断,可以说明这一阶段是岩石的裂隙压密阶段,而且各试样的各级瞬时变形的弹模是不断增大的,符合岩石流变试验的一般性规律.

(4) 从单轴流变的基本数据来看,在轴向和侧向两个方向上存在明显的各向异性,主要体现在流变量上,也是岩石本身材料的各项异性导致岩石应力应变特性各向异性的主要表现形式.

(5) 绿片岩单轴流变试验在岩石侧向能更加快速和灵敏地反映应力变化带来的流变特性的改变,也能更明显的表现出流变规律.各流变参数均能正常反应绿片岩流变规律,伯格斯模型能较好地模拟锦屏绿片岩单轴流变特性.

(6) 岩石流变试验耗时长,试验费用高,对试验机精度要求高,本文备用的6块试样,通过试验只有两块试样的结果较为满意,较难对参数实现综合统计,故未提出各试样参数的离散性的分析.

参考文献:

- [1] 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
SUN Jun. Rheology and engineering application of geotechnical material [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.
- [2] 李永盛. 单轴压缩条件下四种岩石的蠕变和松弛试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(1): 39.
LI Yongsheng. Studies on creep and relaxation test of four types of rocks in uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(1): 39.
- [3] 彭苏萍, 王希良, 刘咸卫, 等. “三软”煤层巷道围岩流变特性研究[J]. 煤炭学报, 2001, 26(2): 149.
PENG Suping, WANG Xiliang, LIU Xianwei, et al. Research on rheological characteristics of rock in the weak coal-bearing strata[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(2): 149.
- [4] YANG Chunhe, BAI Shiwei. Analysis of stress relaxation behaviour of salt rock[C]// Proceedings of the 37th US Rock Mechanics Symposium. New York: John Wiley & Sons, 1999: 935-938.
- [5] 杨春和, 曾义军, 吴文, 等. 深层盐岩本构关系及其在石油钻井工程中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1678.
YANG Chunhe, ZENG Yijun, WU wen, et al. Constitutive relationship of deep salt rock and its application to petroleum drilling engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1678.
- [6] 朱合华, 叶斌. 饱水状态下隧道围岩蠕变力学性质的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1791.
ZHU Hehua, YE Bin. Experimental study on mechanical properties of rock creep in saturation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1791.
- [7] 李化敏, 李振华, 苏承东. 大理岩蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3745
LI Huamin, LI Zhenhua, SU Chengdong. Experimental study on creep behavior of marble [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3745.
- [8] 范庆忠, 高延法. 分级加载条件下岩石流变特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005(11): 1273.
FAN Zhong, GAO Yanfa. Classification rheological properties of rock under loading experimental study [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(11): 1273.
- [9] 崔希海, 付志亮. 岩石流变特性及长期强度的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(5): 1021.
CUI Xihai, FU Zhiliang. Rock rheological properties and long-term strength of the experimental Study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 1021.
- [10] 杨彩虹, 王永岩, 李剑光, 等. 含水率对岩石蠕变规律影响的试验研究[J]. 煤炭学报, 2007, 32(7): 695.
YANG Caihong, WANG Yongyan, LI Jianguang, et al. Testing study about the effect of different water content on rock creep law [J]. Coal Society, 2007, 32(7): 695.

.....

(上接第 319 页)

参考文献:

- [1] Powers T C, Brownyard T L. Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste. Proc J Amer[J]. Concrete Inst, 1947, 43: 262.
- [2] Nielsen E P, Geiker M R. Chloride diffusion in partially saturated cementitious material [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33: 133.
- [3] Ayman Ababneh, Farid Benboudjema, XI Yunping. Chloride penetration in nonsaturated concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(2): 183.
- [4] 张奕. 氯离子在混凝土中的运输机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
ZHANG Yi. Mechanics of chloride ions transportation in concrete[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [5] XI Yunping. A model for moisture capacities of composite materials Part I: formulation [J]. Computational Materials Science, 1995(4): 65.
- [6] XI Yunping. A model for moisture capacities of composite materials Part II: application to concrete [J]. Computational Materials Science, 1995(4): 78.
- [7] Bazant Z P, Najjar L J. Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete [J]. Materials and Structures, 1972, 5(1): 3.
- [8] Alessandro Russo. Streamline-upwind Petrov/Galerkin method (SUPG) vs residual-free bubbles (RFB) [J]. Comput Methods Appl Mech Engrg, 2006, (195): 1608.
- [9] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
WANG Xucheng. Finite element method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [10] 张君, 侯东伟. 基于内部湿度试验的早龄期混凝土水分扩散系数求解[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(12): 2033.
ZHANG Jun, HOU Dongwei. Calculation of moisture diffusion coefficient in early age concrete from interior humidity tests [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2009, 48(12): 2033.
- [11] Keun K J, Sung LC. Moisture diffusion of concrete considering self-desiccation at early ages [J]. Cement and Concrete Research, 1999(29): 1921.
- [12] CHEN Dong, Mahadevan Sankaran. Chloride-induced reinforcement corrosion and concrete cracking simulation [J]. Cement and Concrete Composites, 2008(30): 227.