

锦屏二级水电站绿片岩双轴压缩蠕变特性试验研究

熊良宵^{1,2}, 杨林德^{1,2}, 张尧^{1,2}, 沈明荣^{1,2}, 石振明^{1,2}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 利用岩石双轴流变试验机对锦屏二级水电站辅助洞的绿片岩进行不同加载路径、不同应力水平下的双轴压缩蠕变试验, 将一维 Burgers 模型推广到双轴受压状态, 对试验曲线进行辨识。结果表明, 轴向和侧向的蠕变规律与加载方式有很大关系, 当以定侧压比同时加轴向和侧向荷载时, 轴向和侧向应变基本随荷载的增加而增加, 而采用定侧压的加载方式时, 侧向应变则随轴向荷载的增加而逐渐减小。采用 Burgers 模型拟合试验曲线时, 其理论值与试验结果比较接近, 因此, Burgers 模型比较适合描述绿片岩的黏弹性流变特征, 研究得到的双轴压缩蠕变参数也可供锦屏二级水电站深埋隧洞的设计参考。

关键词: 岩石力学; 双轴压缩蠕变试验; 水电站; 绿片岩; 流变模型

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)增 2 - 3928 - 07

EXPERIMENTAL STUDY ON CREEP BEHAVIORS OF GREENSCHIST SPECIMEN FROM JINPING II HYDROPOWER STATION UNDER BIAXIAL COMPRESSION

XIONG Liangxiao^{1,2}, YANG Linde^{1,2}, ZHANG Yao^{1,2}, SHEN Mingrong^{1,2}, SHI Zhenming^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China*; 2. *Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China*)

Abstract: The biaxial compression creep tests on greenschist specimens from auxiliary tunnel of Jinping II Hydropower Station were carried out. There were many kinds of loading paths and many different stress levels in the tests. The one-dimensional Burgers model was developed into biaxial compression state. And the creep parameters of greenschist under biaxial compression were determined by Burgers model. The results show that the loading path has important effect on the axial and lateral creep laws. If the axial and lateral loads are exerted simultaneously with fixed ratio, the axial and lateral strains will ascend with increasing axial and lateral stresses. But if the axial load is exerted gradually with fixed lateral stress, the lateral strain will descend with increasing axial stresses. The comparison between Burgers model and experimental curves shows that Burgers model is applicable for determining the viscoelastic rheological parameters of greenschist. These parameters are helpful for the design of deep cavern of Jinping II Hydropower Station.

Key words: rock mechanics; biaxial compression creep test; hydropower station; greenschist; rheological model

收稿日期: 2008 - 06 - 13; **修回日期:** 2008 - 07 - 11

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重点项目(50639090)

作者简介: 熊良宵(1982 -), 男, 2003年毕业于成都理工大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩石力学与隧道工程方面的研究工作。E-mail: xiongliangxiao@163.com

1 引言

目前, 国内外关于岩石单轴和三轴流变特性试验的研究成果颇多, 而关于岩石双轴压缩状态流变特性的成果^[1~10]则相对比较少。其实, 对于岩石地下工程而言, 在一些特定情况下, 岩石也会处于双向压缩状态($\sigma_1 \geq \sigma_2$, $\sigma_3 = 0$)。如隧道(洞)开挖过后, 内边界部分位置的围岩就近似处于双轴受压状态, 即 $\sigma_3 \approx 0$ 。研究此种应力状态下的流变特性对分析内边界围岩的长期稳定性有着重要意义, 因此, 有必要开展岩石的双轴压缩蠕变试验及其理论分析。

双轴压缩蠕变试验结果与加载方式和应力水平有很大关系。双轴压缩蠕变特性主要有两种加载方式, 即定侧压加载和定侧压比同时加载, 如刘光廷等^[11]采用的是定侧压加载方式, 即先施加侧压, 后逐级增加轴压; 李 铀等^[12]采用的是定侧压比同时加侧压和轴压。实际上, 应当根据工程岩体的受力方式选择合理的加载方式和应力水平。此外, 选用合理的流变模型对分析双轴压缩蠕变试验结果也有很大关系, 选用的模型应当考虑 σ_2 的影响。双轴压缩蠕变特性试验实际上相当于真三轴蠕变特性试验的一种特定情况, 因此, 可以将流变模型由一维推广到三维, 再将 $\sigma_3 = 0$ 代入可得到双轴受压状态下的分析模型。

鉴于此, 笔者利用同济大学岩石双轴流变仪 (CSS - 1950) 对锦屏二级水电站辅助洞的绿片岩进行系统的双轴压缩流变试验, 研究不同加载路径、不同应力水平下绿片岩的双轴蠕变特性, 并将一维 Burgers 模型推广到双轴压缩状态, 对试验结果进行辨识对比。通过对该试验进行系统的研究, 可为今后岩石双轴流变特性的研究提供有益的参考, 得到的蠕变参数也可作为锦屏二级水电站深埋隧洞的设计研究依据。

2 试验设备及试验方法

2.1 试验装置

绿片岩双轴压缩蠕变试验在 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与水平方向加载。加载能力: 垂直方向

为 500 kN(压), 水平方向为 300 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。

2.2 试样特征

试验所采用的 T_1 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, 现场取样位置如图 1 所示。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°。绿片岩属于硬质岩, 干燥状态下平均单轴抗压强度约为 70 MPa。



图 1 现场取样位置

Fig.1 In-situ sampling position

2.3 试验方法

双轴压缩蠕变试验有两种加载方式: (1) 定侧压加载, 即先将侧压加到预定值, 再逐级施加轴压; (2) 定侧压比加载, 即按一定的比例同时逐级加侧压和轴压。荷载方向与层理之间的关系如图 2 所示, 其轴向荷载与层理平行, 而侧向荷载与层理垂直, 此种加载方式与图 1 所示的现场岩石受力状态也是吻合的。

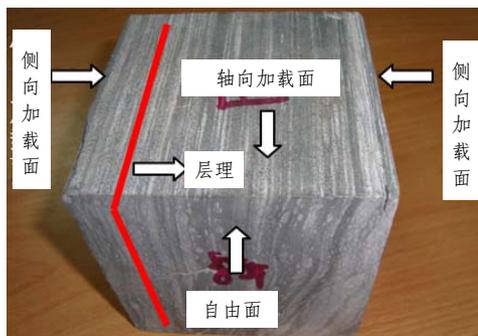


图 2 荷载方向与层理之间的关系

Fig.2 Relation between load direction and bedding

试验分组见表1。表1中，1[#]、2[#]试样采用1/2的定侧压比同时加侧压和轴压，分4级加载；3[#]试样采用先加侧压，待变形稳定后，再逐级加轴压；4[#]试样采用先加侧压到达预定值，后立即逐级加轴压，共分4级；5[#]和6[#]试样采用1/4的定侧压比同时加侧压和轴压，分2级加载；7[#]试样采用1/3的定侧压比同时加侧压和轴压，分3级加载。

表1 试验分组

Table 1 Experimental groups

试样编号	含水状态	轴向荷载/kN	侧向荷载/kN	试样尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)
1 [#]	干燥	445.7	223.1	99.5×97.7×102.0
2 [#]	干燥	397.8	199.4	102.9×103.1×103.3
3 [#]	干燥	149.9	100.5	101.1×103.9×103.3
4 [#]	干燥	447.6	104.7	102.5×102.9×100.9
5 [#]	干燥	397.1	100.5	102.9×103.0×100.9
6 [#]	干燥	445.4	112.4	99.7×98.9×101.6
7 [#]	干燥	447.5	150.1	102.9×102.6×102.2

2.4 试验步骤

双轴压缩蠕变试验步骤为：(1) 将试样放在夹具上摆正，调整水平轴和上下横梁，使上下横梁与试样接触；(2) 布置位移计，并调节位移计上的调零螺钉和测量放大器上的调零按钮，使变形量接近于0，并读取初读数；(3) 均按表1设定侧向、轴向加载水平，当以定侧压比同时加载时，侧向和轴向加载速率也保持相同的比例，以保证侧向和轴向荷载同时到达预定值；(4) 在第1级应力水平下的蠕变加载完成后，改加至设定的第2级应力水平，并维持这一应力水平恒定的条件下测试试样的蠕变变形；(5) 在第3级或更高级应力水平下，重复上述操作步骤，直至试验结束。

3 试验结果

3.1 应变 - 时间关系

以定侧压比为1/2加载的1[#]和2[#]试样的蠕变试验曲线分别见图3和4，不同应力水平下的轴向和侧向流变量见表2。

由图3、4和表2可知，当以定侧压比同时加侧压和轴压时，轴向应变和侧向应变均随着荷载等级的增加而增加，同时，轴向和侧向的应变增量相对

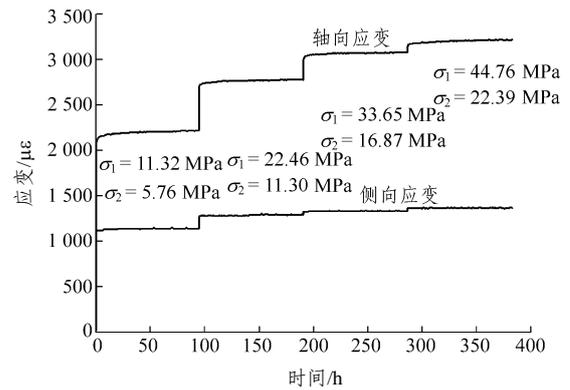


图3 1[#]试样蠕变试验曲线

Fig.3 Creep testing curves of specimen #1

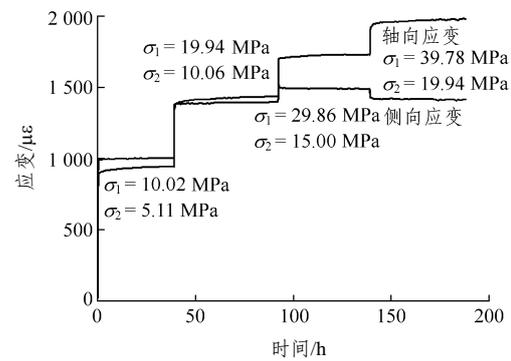


图4 2[#]试样蠕变试验曲线

Fig.4 Creep testing curves of specimen #2

表2 1[#]和2[#]试样的应变

Table 2 Rheological values of specimens #1 and #2

试样编号	σ ₁ /MPa	σ ₂ /MPa	轴向应变/με	侧向应变/με
1 [#]	11.32	5.76	169	32
	22.46	11.30	87	25
	33.65	16.87	79	7
	44.76	22.39	78	4
2 [#]	10.02	5.11	92	22
	19.94	10.06	87	18
	29.86	15.00	79	-45
	39.78	19.94	78	-50

于上一级均有所减小。这主要是因为施加第1和2级荷载时，试样的内部孔隙开始被压闭合，试样的瞬时弹性变形较大，而在施加第3和4级荷载时，内部孔隙已基本被压闭合，在同等的应力增量下，试样的瞬时弹性变形逐渐减小，而绿片岩属于硬质岩，瞬时弹性变形在蠕变变形中占很大的比例，因此，随着荷载等级的增加，应变增量有相对减小的趋势。而2[#]试样的蠕变变形规律与1[#]试样有所不同，

主要反映在第 3 和 4 阶段, 侧向应变则随着时间的增加而逐渐减小, 出现了负应变增量现象, 当施加完第 3 级荷载的瞬时, 侧向应变增加至 1 535 $\mu\epsilon$, 之后在 92.97~138.90 h 的第 3 阶段, 侧向应变有不断减小的趋势, 在第 3 级结束时刻, 侧向应变减小为 1 490 $\mu\epsilon$, 而当施加完第 4 级荷载后, 侧向应变则减小为 1 456 $\mu\epsilon$, 第 4 阶段结束时减为 1 416 $\mu\epsilon$ 。

出现侧向应变增量为负值的现象主要是因为是在施加到第 3 和 4 级荷载时, 轴向与侧向荷载之间的差值很大, 轴向荷载引起试样往侧向的膨胀变形量大于侧向荷载的压缩变形增量。因此, 侧向出现负的应变增量现象是正常的。而 1[#]试样未出现这种现象, 这可能是由于岩石的不均匀性导致 1[#]和 2[#]试样的泊松比有所不同, 在对 1[#]试样施加第 3 和 4 级荷载时, 轴向荷载引起侧向的膨胀变形量小于侧向荷载的压缩变形量, 因此, 侧向应变仍随着荷载等级的增加而增加。

按定侧压方式加载的 3[#]和 4[#]试样的蠕变试验曲线分别见图 5 和 6, 4[#]试样的流变量见表 3。

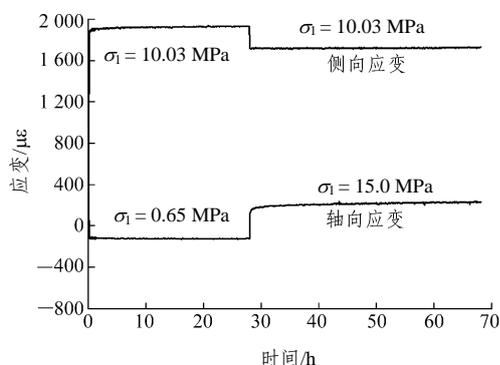


图 5 3[#]试样蠕变试验曲线(σ_2 恒定)

Fig.5 Creep testing curves of specimen #3 with constant σ_2

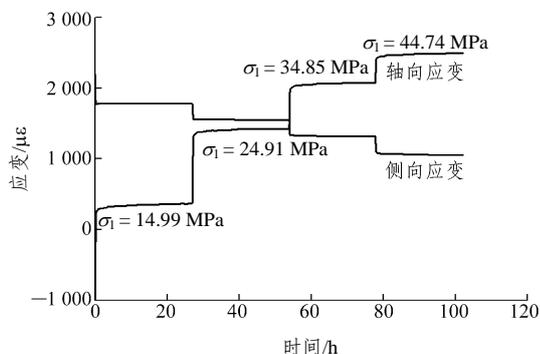


图 6 4[#]试样蠕变试验曲线(σ_2 恒定)

Fig.6 Creep testing curves of specimen #4 with constant σ_2

表 3 4[#]试样的应变
Table 3 Rheological values of specimens #4

σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	轴向应变/ $\mu\epsilon$	侧向应变/ $\mu\epsilon$
14.99	10.05	211	13
24.91	10.25	208	-30
34.85	10.46	92	-32
44.74	10.46	88	-44

由图 5, 6 和表 3 可知, 当先加侧向荷载, 然后再逐级施加轴向荷载时, 轴向应变随着荷载等级的增加而增加, 而侧向应变则呈不断减小的趋势。这主要是因为固定侧向荷载后, 逐级施加轴向荷载会引起侧向的膨胀, 从而导致侧向应变逐级下降。表 3 中给出的侧向应力有所变化, 主要是由逐级施加轴向荷载所引起的, 同时其变化量还是相对较小的, 变化幅度在试验机精度范围内, 因此, 对分析不会造成太大的影响。

对比图 3~6 可知, 双轴压缩蠕变试验的加载方式不同, 轴向和侧向的蠕变变形规律也不同。实际上, 随着开挖面的推进, 隧道(洞)围岩的主应力往往是同时上升和下降的。因此, 相比先加侧压、后逐级施加轴压的加载方式, 定侧压比同时施加或者同时加卸轴压、侧压的加载方式更符合工程岩体的实际受力方式。但定侧压加载方式对于研究不同加载路径下岩石的流变特性还是有价值的。

以定侧压比为 1/4 加载的 5[#]和 6[#]试样的蠕变试验曲线分别见图 7 和 8。

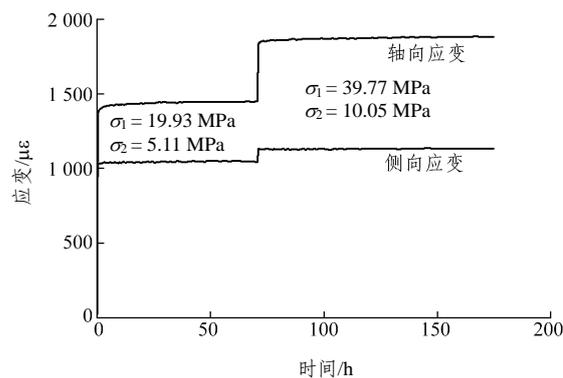


图 7 5[#]试样蠕变试验曲线

Fig.7 Creep testing curves of specimen #5

由图 7, 8 可知, 当以定侧压比为 1/4 同时加轴压和侧压时, 5[#]和 6[#]试样所施加的荷载水平虽然不同, 但轴向和侧向的蠕变规律基本一致, 轴向和侧

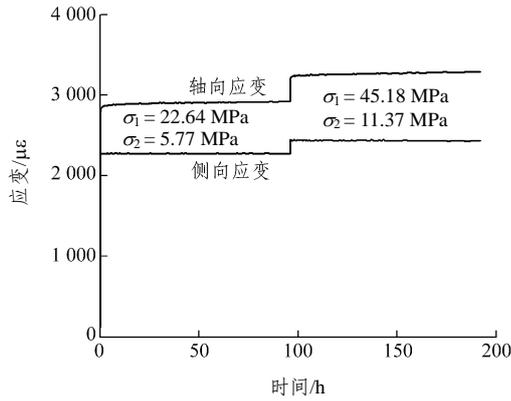


图 8 6#试样蠕变试验曲线

Fig.8 Creep testing curves of specimen #6

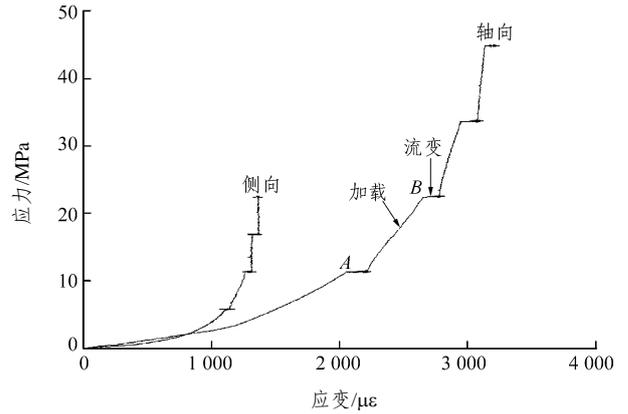


图 10 1#试样应力 - 应变曲线

Fig.10 Stress-strain curve of specimen #1

向应变均随着荷载等级的增加而增加。

以定侧压比 1/3 加载的 7#试样的蠕变试验曲线见图 9。

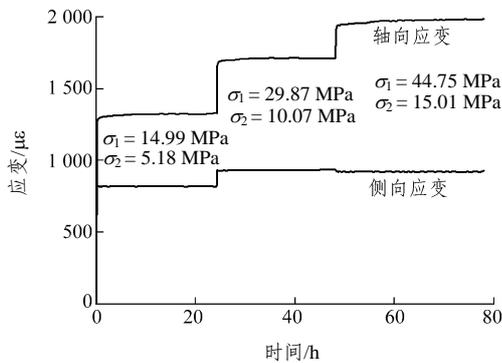


图 9 7#试样蠕变试验曲线

Fig.9 Creep testing curves of specimen #7

由图 9 可知，当以定侧压比 1/3 同时施加轴压和侧压时，轴向和侧向蠕变规律基本与定侧压比为 1/2 和 1/4 时的规律一致，且在第 3 阶段，侧向应变也出现了负增量现象。

3.2 应力 - 应变关系

由于以定侧压比加载的试样的应力 - 应变关系特征基本一致，因此，只对 1#试样的应力 - 应变关系进行分析，结果见图 10。

由图 10 可知，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，表现为岩石的裂隙压密阶段，如图中的 OA 段。在施加第 2 级或者更高级荷载时，轴向和侧向应力 - 应变曲线服从线性规律，如图中的 AB 段，但不同荷载等级的应力 - 应变曲线斜率明显不同，整个蠕变试验过程中弹性模量是变化的。

4 Burgers 模型及参数拟合

由图 3~9 可知，绿片岩在双轴压缩状态下表现出典型的黏弹性特性，且出现了稳态蠕变阶段，采用黏弹性模型分析比较合适。另外，绿片岩的层理虽然比较发育，应当考虑各向异性的因素，但目前关于考虑各向异性的岩石蠕变模型研究还不是很成熟，因此，先暂时按照均质体来进行分析。综合上述原因，决定采用各向同性的 Burgers 模型来进行分析。

4.1 Burgers 模型

Burgers 模型由四元件组成，见图 11。

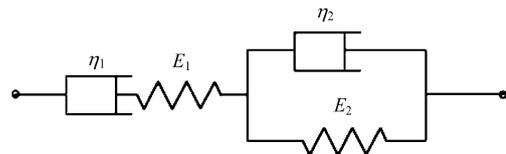


图 11 Burgers 模型

Fig.11 Burgers model

Burgers 模型的一维和三维蠕变方程分别为

$$\varepsilon = \left\{ \frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_2}{\eta_2} t\right) \right] \right\} \sigma \quad (1)$$

$$e_{ij} = \frac{S_{ij}}{2G_1} + \frac{S_{ij}}{2G_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t\right) \right] + \frac{S_{ij}}{2\eta_1} t \quad (2)$$

式中： E_1 为瞬时弹性模量， E_2 为黏弹性模量， η_1 和 η_2 为黏滞系数。

式(2)两边同时加上球应变张量 $\delta_{ij}\varepsilon_m$ 后，可以

得到岩石的蠕变应变。

双轴受压状态下岩石的轴向应变的表达式为

$$\varepsilon_1(t) = \frac{1}{9K}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{2\sigma_1 - \sigma_2}{6G_1} + \frac{2\sigma_1 - \sigma_2}{6G_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2}t\right) \right] + \frac{2\sigma_1 - \sigma_2}{6\eta_1}t \quad (3)$$

其中,

$$K = \frac{E_1}{3(1-2\mu)}, \quad G_1 = \frac{E_1}{2(1+\mu)}, \quad G_2 = \frac{E_2}{2(1+\mu)} \quad (4)$$

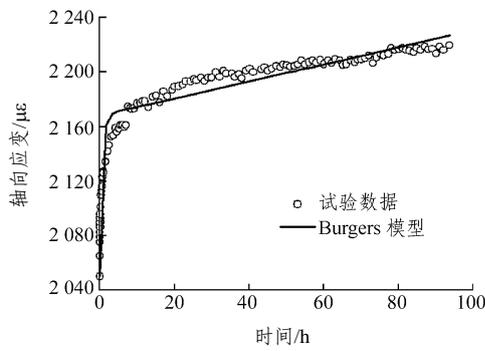
式中: μ 为泊松比。

根据式(3), 需要拟合的参数为 K, G_1, η_1, G_2 和 η_2 。利用式(4), 可以转化为求取 E_1, E_2, μ, η_1 和 η_2 。根据齐明山^[13]的研究可知, μ 值大小对其他 3 个参数影响不大, 可以先假定 μ 为一个常值, 然后再拟合分析得到其数值。本文将绿片岩的泊松比取为 0.4。

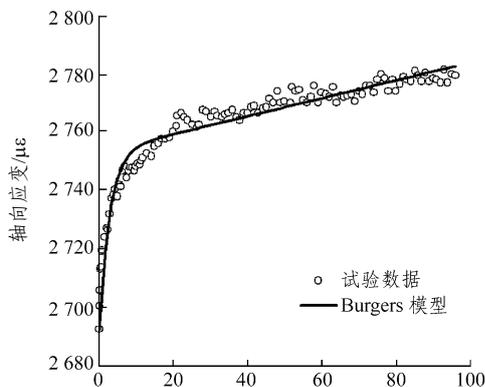
4.2 模型参数的拟合

利用 Burgers 模型对 1#试样的轴向应变 - 时间曲线进行辨识, 结果见图 12, 拟合得到的参数见表 4。

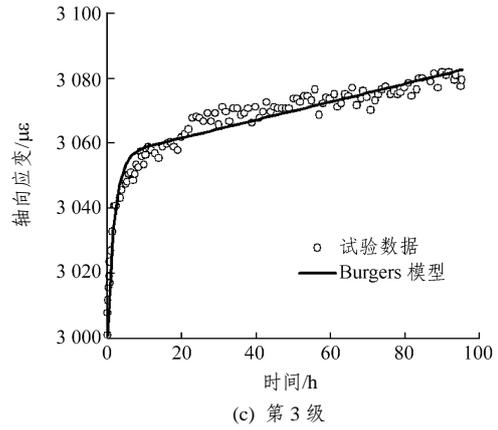
由图 12、表 4 可知, 采用 Burgers 模型对试验数据进行拟合时, 理论曲线与试验数据比较吻合, 且相关系数也比较高, 这说明采用 Burgers 模型是



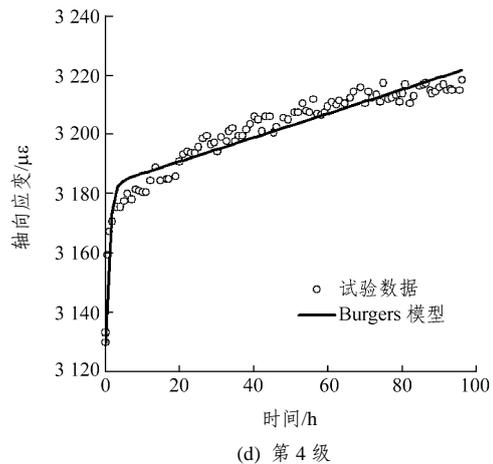
(a) 第 1 级



(b) 第 2 级



(c) 第 3 级



(d) 第 4 级

图 12 试验数据与模型曲线的对比

Fig.12 Comparison between experimental data and model curves

表 4 1#试样 Burgers 模型拟合参数值

Table 4 Values of fitting parameters of specimen #1 by Burgers model

σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	K /GPa	G_1 /GPa	η_1 /(GPa · h)	G_2 /GPa	η_2 /(GPa · h)	相关系数
11.32	5.76	7.32	1.57	4 498.0	23.8	14.4	0.933
22.46	11.30	11.10	2.38	18 353.0	93.1	262.0	0.958
33.65	16.87	14.94	3.20	30 337.6	152.6	284.4	0.959
44.76	22.39	19.06	4.09	27 725.0	211.8	207.7	0.952

合适的。笔者也采用 Burgers 模型对其他试样的试验数据进行了拟合, 拟合曲线与试验数据吻合程度也同样比较高, 但限于篇幅原因, 本文不再列出其他试样的拟合结果。

5 结 论

利用 CSS - 1950 岩石双轴流变仪对锦屏二级水电站辅助交通洞 B 洞的绿片岩进行了不同加载路

径、不同加载水平的双轴压缩蠕变试验，主要得到以下结论：

(1) 加载路径对试验结果的影响比较大，以固定侧压比同时加载时，轴向和侧向应变基本随着荷载等级的增加而增加；若采用定侧压加载方式时，轴向应变随着荷载等级的增加而增加，而侧向应变则呈不断减小的趋势。

(2) 泊松效应对双轴压缩蠕变试验结果的影响很大。当施加的荷载等级比较高时，轴向荷载引起侧向膨胀变形量有可能大于侧向荷载的压缩变形增量，从而导致侧向应变出现负增量的现象。

(3) 绿片岩的双轴压缩蠕变试验曲线呈黏弹性特征，且出现稳态蠕变阶段。通过将一维 Burgers 模型扩展到双轴受压状态，并对蠕变数据曲线进行拟合，结果表明，拟合曲线与试验数据吻合程度较高，说明采用 Burgers 模型可以很好地描述绿片岩的黏弹性蠕变特性。

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] 徐卫亚, 杨圣奇, 褚卫江. 岩石非线性黏弹塑性流变模型(河海模型)及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 433 - 447.(XU Weiya, YANG Shengqi, CHU Weijiang. Nonlinear viscoelasto-plastic rheological model(Hohai model) of rock and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 433 - 447.(in Chinese))
- [3] 徐卫亚, 杨圣奇, 谢守益, 等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究(II): 模型分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 693 - 698.(XU Weiya, YANG Shengqi, XIE Shouyi, et al. Investigation on triaxial rheological mechanical properties of greenschist specimen(II): model analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(5): 693 - 698.(in Chinese))
- [4] 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 - 47.(LI Yongsheng. Creep and relaxation of four kinds of rocks under uniaxial compression tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(1): 39 - 47.(in Chinese))
- [5] 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): 3 745 - 3 749.(LI Huamin, LI Zhenhua, SU Chengdong. Testing study on creep characteristics of marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3 745 - 3 749.(in Chinese))
- [6] 范庆忠, 李术才, 高延法. 软岩三轴蠕变特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1 381 - 1 385.(FAN Qingzhong, LI Shucai, GAO Yanfa. Experimental study on creep properties of soft rock under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(7): 1 381 - 1 385.(in Chinese))
- [7] 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): 1 791 - 1 796.(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): 1 791 - 1 796.(in Chinese))
- [8] 李 钊, 朱维申, 白世伟, 等. 风干与饱水状态下花岗岩单轴流变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1 673 - 1 677.(LI You, ZHU Weishen, BAI Shiwei, et al. Uniaxial experimental study on rheological properties of granite in air-dried and saturated states[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1 673 - 1 677.(in Chinese))
- [9] 赵延林, 曹 平, 文有道, 等. 岩石弹黏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.(ZHAO Yanlin, CAO Ping, WEN Youdao, et al. Elastovisco-plastic rheological experiment and nonlinear rheological model of rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 477 - 486.(in Chinese))
- [10] 王志俭, 殷坤龙, 简文星, 等. 三峡库区万州红层砂岩流变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 840 - 847.(WANG Zhijian, YIN Kunlong, JIAN Wenxing, et al. Experimental study on rheological behaviors of Wanzhou red sandstone in Three Gorges reservoir area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 840 - 847.(in Chinese))
- [11] 刘光廷, 胡 昱, 陈凤岐, 等. 软岩多轴流变特性及其对拱坝的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1 237 - 1 241.(LIU Guangting, HU Yu, CHEN Fengqi, et al. Rheological property of soft rock under multiaxial compression and its effect on design of arch dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1 237 - 1 241.(in Chinese))
- [12] 李 钊, 朱维申, 彭 意, 等. 某地红砂岩多轴受力状态蠕变松弛特性试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1 248 - 1 252.(LI You, ZHU Weishen, PENG Yi, et al. Multi-axial experimental study on creep and relaxation properties of red sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(8): 1 248 - 1 252.(in Chinese))
- [13] 齐明山. 大变形软岩流变性态及其在隧道工程结构中的应用研究[博士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 2006.(QI Mingshan. Study on rheological properties of soft rock with large deformation and its application to tunnel engineering[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 2006.(in Chinese))