

锦屏一级水电站大理岩蠕变试验与流变模型选择

张 明, 毕忠伟, 杨 强, 程丽娟, 李仲奎

(清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 结合锦屏一级水电站地下厂房洞室群施工期和运行期围岩长期稳定性分析的实际需要, 对厂区大理岩进行蠕变特性试验。对于用作比较的 Hooke-Kelvin 和 Burgers 两种常用流变模型及其模型参数确定问题进行简要阐述, 推荐采用非线性最小二乘拟合的方法直接得到模型参数。对所采用的蠕变试验系统和蠕变试验方法, 进行简要的说明和介绍。单轴和双轴蠕变试验结果表明, 厂区大理岩试件在所处的应力状态下表现出一定的时效特征, 经过一段时间的衰减蠕变后变形趋于稳定, 符合 Hooke-Kelvin 流变模型所描述的蠕变特征, 模型拟合曲线与试验数据能很好地吻合。因此, 建议采用 Hooke-Kelvin 流变模型描述大理岩的流变性质。而 Burgers 模型不宜用来描述大理岩这样的硬质岩石的黏弹性性质, 对于 Burgers 流变模型则应考察较长时间的试验数据。采用 Hooke-Kelvin 模型能够较好地解释锦屏一级水电站厂房洞室群开挖后变形最终趋于稳定的事实, 试验所确定的流变模型及其参数可用于洞室群施工期和运行期的长期稳定性数值仿真模拟。

关键词: 水利工程; 水电站; 地下厂房; 蠕变试验; Hooke-Kelvin 流变模型; Burgers 流变模型

中图分类号: TV 63

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)08 - 1530 - 08

CREEP TEST AND RHEOLOGICAL MODEL SELECTION OF MARBLE OF JINPING I HYDROPOWER STATION

ZHANG Ming, BI Zhongwei, YANG Qiang, CHENG Lijuan, LI Zhongkui

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The creep tests on marble specimens from the underground powerhouse of Jinping I hydropower station of China are carried out to meet the demand of long-term stability analysis of the caverns during the construction and the operation periods. Two common rheological models, Hooke-Kelvin model and Burgers model, and their parameters determination are described with comparative discussion for the model selection. The least squares fitting to the testing results with the model curve is recommended to gain the model parameters. The creep testing system and the testing procedure are introduced briefly. It is manifested by the uniaxial creep tests and the biaxial creep tests that the considered marble shows time-dependent behavior to some extent under certain stress states. The deformation gradually approaches to corresponding constant after the early stage of creep attenuation, which accords with the creep characteristic of the Hooke-Kelvin model. The measured strains with respect to the loading time are close to the Hooke-Kelvin model curve. Therefore, the Hooke-Kelvin model is recommended to describe the rheological properties of marble. As for the Burgers model, the analysis shows that it is unsuitable for modeling the viscoelasticity of hard rock like marble. The creep behavior during relatively longer testing time, e. g. 150 hours or so, needs to be examined if the Burgers model is adopted. The fact that the deformation of the underground powerhouse caverns of Jinping I hydropower station finally tends to become steady after excavation

收稿日期: 2010 - 02 - 07; **修回日期:** 2010 - 04 - 20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB724604); 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室项目(2009 - ZY - 4); 国家自然科学基金资助项目(50904036)

作者简介: 张 明(1965 -), 男, 博士, 1995 年于清华大学固体力学专业获博士学位, 现任副教授, 主要从事岩石力学与工程方面的教学与研究工作。
E-mail: mzhang@tsinghua.edu.cn

can be better explained by means of the Hooke-Kelvin rheological model. The Hooke-Kelvin rheological model and the model parameters obtained from creep tests may also be served as the fundamental data in the later long-term stability analysis of the surrounding rocks of the underground powerhouse caverns in the periods of construction and operation.

Key words: hydraulic engineering; hydropower station; underground powerhouse; creep test; Hooke-Kelvin rheological model; Burgers rheological model

1 引 言

水工建筑物基础、岩质边坡和地下洞室的长期稳定性对于工程的建设和运行是十分重要的,对岩体流变性质的研究则是研究这一问题的基础^[1, 2]。许多大中型水电工程普遍进行了室内和现场的岩体流变特性测试^[3~11], 以为工程设计、施工和运行提供更全面、可靠的流变分析模型和参数等基础资料。

组成岩石的胶结材料和结晶材料具有流变性, 岩体在高应力、高温、高渗透压等作用下常具有较明显的蠕变性质, 在恒定应力条件下变形随时间逐渐增长。通过试验获得岩石的蠕变形态, 直接从试验数据建立岩石蠕变本构方程, 可采取建立经验本构关系式或流变模型拟合的方式^[5, 11~13]。岩石室内蠕变试验^[6~11]不仅操作简便, 试验环境容易控制, 而且在某些特定的情况, 能得到比原位试验^[3~5]更好的结果。蠕变试验多采用单轴和双轴加载方式, 通过试验分析, 认为在低应力范围内双轴试验能代替三轴试验^[11]。

目前流行的流变模型有多种, 其中经验模型只适合描述特定问题, 不适宜推广; 屈服面模型适合描述黏弹塑性问题, 在土体中应用较多^[14]; 不可逆热力学模型和细观力学模型都可以较好地解释流变机制, 但是其理论推导复杂, 目前只在简单力学状态问题中有所应用^[15~17]; 元件组合模型直观灵活, 格式简洁, 能全面反映流变介质的各种流变特性, 模型参数也可以通过室内流变试验直接获取, 在工程中被广泛应用^[14, 18]。

岩石流变的元件组合模型也有多种, 应用较多的简单模型有 Hooke-Kelvin(H-K)和 Burgers 流变模型^[12, 13]。这些模型的选择一般都是通过观察分析试验曲线来选定的。熊良宵等^[6]对锦屏二级水电站绿片岩试件, 李化敏等^[7]对大理岩试件分别进行了蠕变试验, 试验结果明显符合 H-K 流变模型的特征,

但却都采用了 Burgers 模型。而韩冰等^[8]的蠕变试验结果支持 H-K 流变模型。这说明对于岩石蠕变试验数据, 选择流变模型时有必要进行比较分析, 尤其是在蠕变特征不是十分明显的情况下。

本文结合锦屏一级水电站地下厂房大理岩的室内蠕变试验, 观测其蠕变特点并选择合适的蠕变模型。该水电站厂房洞室群规模巨大, 主要由引水洞、主厂房、母线洞、主变室、尾水调压室和尾水洞等组成。厂区地质条件复杂, 涉及地层为杂谷脑组第二段第 2, 3, 4 层, 岩性为大理岩夹绿片岩, 围岩类别以 III₁ 类为主。在开挖过程中, 曾出现洞室变形较大且长时间发展的情况。因此, 需要探明围岩变形时效性产生的原因, 对洞室群施工期围岩稳定和支护系统安全进行分析和评价, 提出合理反映锦屏一级水电站地下厂房洞室群围岩时效性的数值分析模型, 预测施工期和开挖完成后这种时效性的发展及其对洞室群稳定收敛过程的影响。

2 岩石流变常用的 2 种模型及其参数确定

2.1 H-K 流变模型

H-K 流变模型如图 1 所示(图中 E_1 , E_2 为两弹性元件的弹性模量, η_2 为黏性元件的黏度系数)。

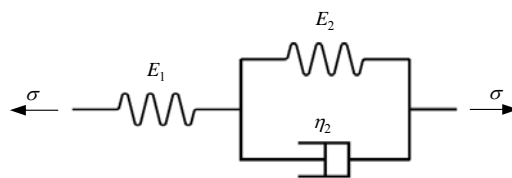


图 1 H-K 流变模型

Fig.1 H-K rheological model

通过各元件受力变形及其连接关系的分析, 容易得到正应力 σ 和正应变 ε 的关系为

$$\sigma + \frac{\eta_2}{E_1 + E_2} \dot{\sigma} = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2} \varepsilon + \frac{E_1 \eta_2}{E_1 + E_2} \dot{\varepsilon} \quad (1)$$

对于剪切变化, 系统的总剪应力 τ 和总剪应变 γ 的关系与式(1)类似, 即

$$\tau + \frac{\eta_2}{G_1 + G_2} \dot{\tau} = \frac{G_1 G_2}{G_1 + G_2} \gamma + \frac{G_1 \eta_2}{G_1 + G_2} \dot{\gamma} \quad (2)$$

式中: G_1, G_2 为两弹性元件的剪切模量。

对于三维应力状态, 推广式(1)和(2)可得到 H-K 体的本构方程为

$$s_{ij} + \frac{\eta_2}{G_1 + G_2} \dot{s}_{ij} = \frac{2G_1 G_2}{G_1 + G_2} e_{ij} + \frac{2G_1 \eta_2}{G_1 + G_2} \dot{e}_{ij} \quad (i, j=1, 2, 3) \quad (3)$$

$$\sigma_m = 3K \varepsilon_m \quad (4)$$

式中: s_{ij} 为应力 σ_{ij} 的偏应力, $s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_m \delta_{ij}$, σ_m 为平均正应力, δ_{ij} 为 Kronecker delta 符号; $e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon_m \delta_{ij}$ 为应变 ε_{ij} 的偏应变, ε_m 为平均正应变; K 为体积模量。

考虑系统从 $t = 0$ 开始受常应力 $\sigma_{ij}^0 = s_{ij}^0 + \sigma_m^0 \delta_{ij}$ 作用下的蠕变。解式(3)可得应变 ε_{ij} 的蠕变表达式为

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\sigma_m^0}{3K} \delta_{ij} + e_{ij} = \frac{\sigma_m^0}{3K} \delta_{ij} + \frac{s_{ij}^0}{2G_1} + \frac{s_{ij}^0}{2G_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t\right) \right] \quad (5)$$

由此可知, e_{ij} 或 ε_{ij} 随时间按指数递增, 最终可表示为

$$e_{ij\infty} = \frac{s_{ij}^0}{2G_1} + \frac{s_{ij}^0}{2G_2} = \frac{s_{ij}^0}{2G_\infty} \quad (6)$$

其中,

$$G_\infty = \frac{G_1 G_2}{G_1 + G_2} \quad (7)$$

2.2 Burgers 流变模型

Burgers 流变模型见图 2 (η_1 为串联的黏性元件的黏度系数)。

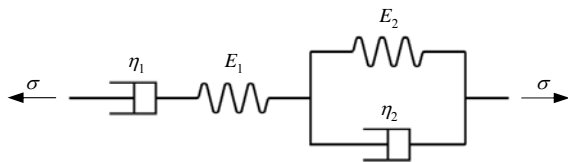


图2 Burgers 流变模型
Fig.2 Burgers rheological model

通过上述与 H-K 流变模型同样的分析, 可得到 Burgers 体的本构方程由式(4)和下式组成:

$$s_{ij} + \left(\frac{\eta_1}{G_1} + \frac{\eta_1 + \eta_2}{G_2} \right) \dot{s}_{ij} + \frac{\eta_1 \eta_2}{G_1 G_2} \ddot{s}_{ij} = 2\eta_1 \dot{e}_{ij} + \frac{2\eta_1 \eta_2}{G_2} \ddot{e}_{ij} \quad (i, j=1, 2, 3) \quad (8)$$

考虑系统从 $t = 0$ 开始受常应力 σ_{ij}^0 作用下的蠕变。解式(8)可得应变 ε_{ij} 的表达式为

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\sigma_m^0}{3K} \delta_{ij} + e_{ij} = \frac{\sigma_m^0}{3K} \delta_{ij} + \frac{s_{ij}^0}{2G_1} + \frac{s_{ij}^0}{2G_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t\right) \right] + \frac{s_{ij}^0}{2\eta_1} t \quad (9)$$

式(9)表明, 在恒定应力作用下, Burgers 体具有黏滞流动性, 可分为应变随时间线性递增的主蠕变和应变随时间按指数递增的次蠕变 2 个部分。比较图 1 和 2 及式(5)和(9)可知, 虽然 H-K 与 Burgers 流变模型构成有部分相像, 但所描述的蠕变现象却是很不一样的。

在单轴或多轴蠕变试验中, 通常施加主应力 σ_1, σ_2 或 σ_3 , 量测主应变 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 或 ε_3 。此时, 仅涉及 H-K 模型的式(3), (5)和(6), 或 Burgers 流变模型的式(8)和(9)中 $i=j$ 的情形。

2.3 模型参数的确定

确定流变模型参数的方法有很多, 但有的需要绘图取对数^[7, 13], 或假设泊松比的值^[6, 7], 或需要解多约束优化问题^[8, 13], 均不如以下方法简便、直观、合理。

对于 Burgers 流变模型, 利用以下函数形式直接对数据进行非线性最小二乘法拟合:

$$\varepsilon_{ij} = a_{ij} + b_{ij} \exp(-k_{ij} t) + c_{ij} t \quad (10)$$

再利用式(9)和(10)的对应项相等, 则有

$$\left. \begin{aligned} a_{ij} + b_{ij} &= \frac{\sigma_m^0}{3K} \delta_{ij} + \frac{s_{ij}^0}{2G_1} \\ b_{ij} &= \frac{-s_{ij}^0}{2G_2} \\ k_{ij} &= \frac{G_2}{\eta_2} \\ c_{ij} &= \frac{s_{ij}^0}{2\eta_1} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

令式(10)和(11)中 $i=j$, 即可处理与式(9)相应的主应变形式。

在单轴或多轴蠕变试验中, 采用荷载控制, 施加设定的常量应力, 即 σ_m^0 , s_{ij}^0 或 s_i^0 都是已知的, 于是由式(11)后 3 个表达式可得到参数 η_1 , G_2 和 η_2 。参数 K 和 G_1 的求解有 2 种途径: 其一, 如果已知 3 个初始正应变, 则 ε_m^0 已知, 由式(4)可得 K , 进而由式(11)第一式可得 G_1 ; 其二, 若试验得到 2 个方向正应变的蠕变曲线, 如 $\varepsilon_1(t)$ 和 $\varepsilon_2(t)$, 因每条曲线都给出一个式(11)那样的关系, 联立其第一式可解出 K 和 G_1 。如有需要, 用 K 和 G_1 还可以计算泊松比。

上述方法也适于确定 H-K 流变模型参数。由式(5)和(9)可知, 按各向同性均质黏弹性体考虑, 同一物体所有蠕变曲线 $e_{ij}(t) / s_{ij}^0$ 都相同, 因此用任何一条蠕变曲线所确定的模型参数 η_1 , G_2 和 η_2 都应当相同。

3 试验系统及试验方法

试验采用 CSS - 23 双轴蠕变试验机, 这是国内第一个机电伺服岩石、混凝土双轴蠕变试验机, 具有长时工作可靠性, 可进行单轴和双轴蠕变和常规拉伸压缩试验, 配上合适的夹具还可以对金属等其他材料进行蠕变和松弛试验, 其主机结构示意图如图 3 所示。该机器由主机、电控箱和计算机控制处理系统三大部分组成。主机外形尺寸为 210 cm×100 cm×275 cm(宽×厚×高), 电控箱尺寸为 60 cm×60 cm×160 cm。采用机电伺服机构提供垂直与水平方向的荷载, 最大加载能力垂直方向 500 kN(压), 250 kN(拉), 水平方向 300 kN(压)。加载速率为 2~

水平伺服电机; 6, 13—谐波减速器; 7—球形压头; 8—滚柱;
9—试件; 10—水平力传感器; 11, 15—滚柱丝杠; 12—滚动导轨;
16—涡轮升降机

图 3 双轴蠕变仪主机结构示意图

Fig.3 Sketch of biaxial creep testing machine

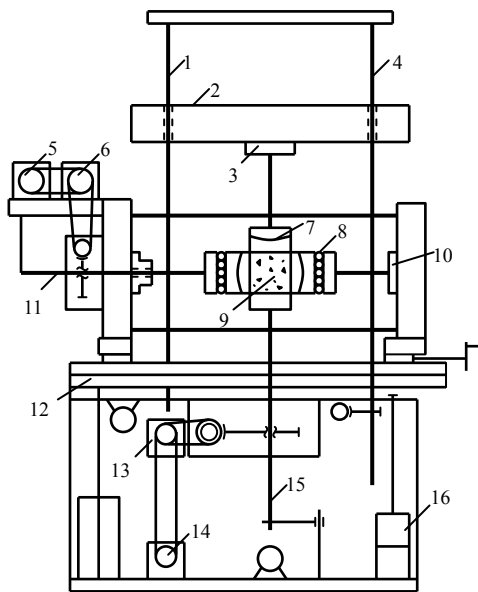
200 kN/min。采用轮幅式测力传感器测量垂直和水平方向的轴向荷载, 精度为±1%示值。变形测量方式有 2 种, 一种是差动式位移传感器, 变形测量范围为 1 mm, 精度为 0.5%满量程, 分辨率达到 0.1 mm; 另一种是贴电阻应变片测量应变, 应变片电阻为(119.8±0.1) Ω, 灵敏系数为 2.08%±1%, 栅长、栅宽分别为 10, 2 mm。本文变形测量采用前一种方式。

试验机加载系统具有锁定功能, 当意外断电时, 荷载变化平均速率小于 1 %/h。另外, 试验机还配备有 UPS 外接电源, 以保证停电时计算机和主机能正常工作, 满足蠕变试验中荷载长期稳定的要求。

传感器测出的应变变化曲线与实验室温度变化曲线存在相似性, 但存在滞后现象, 且当实验室温度恢复时传感器读数不能完全恢复^[11]。试验中保持温度相对恒定, 温度的实测值为(21±2) °C, 因此可以排除温度对试验的影响。

试验所用的试件均为大理岩, 取自锦屏一级水电站主厂房第六层, 其中试件 1~5 取自厂纵 0+80 m, 试件 6~9 取自厂纵 0~10 m, 其余岩样取自 0+185 m。地下厂房属于高地应力区, 主应力 $\sigma_1 = 20 \sim 35.7$ MPa, $\sigma_2 = 10 \sim 20$ MPa, $\sigma_3 = 4 \sim 12$ MPa。 σ_1 的方向比较一致, 为 N28.5°~N71°W, 平均 N48.7°W, 倾角 20°~50°, 平均 34.2°。取样部位水平埋深约 150m, 垂直埋深 110~300 m。岩性以浅灰~灰白色的薄~中厚层状条纹状大理岩、角砾状大理岩, 夹绿片岩条带、透镜体为主。岩样切割成边长为 100 mm 的正方体试件。这些试件整体都较完整致密, 从试件的面上可见些许隐性裂纹。大理岩属于硬质岩, 干燥状态下平均抗压强度为 50 MPa。

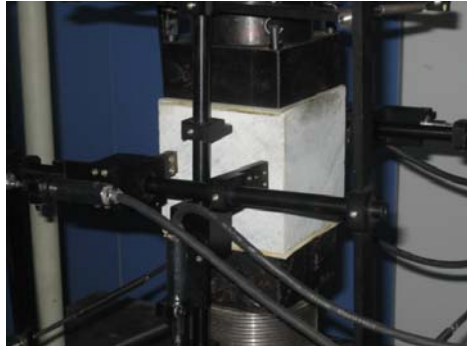
试验时首先将试件放在压板上摆正, 调整水平轴和上下横梁, 使上下横梁与试样接触; 接着布置位移计, 调节位移计上的调零螺钉和测量放大器上的调零按钮, 使变形量接近于 0, 并读取初读数。图 4 为蠕变试验加载和位移测量装置, 试件相对的 2 个表面上各布置 2 支位移计, 分别测量水平和垂直方向两刀口间的位移。将两相对表面上的位移值平均, 作为试件的真正位移, 以进一步减小受载偏



1—导向杆; 2—上横梁; 3—垂直力传感器; 4—支撑丝杠; 5, 14—

心的影响。

考虑初始地应力水平、厂房开挖表面附近的应力水平以及试验机的加载能力，来确定试验中的加载力。试验中逐渐加载至规定的应力并长时间保持，在到达规定应力之前每次加载完成后记录读数，当



(a) 单轴蠕变试验



(b) 双轴蠕变试验

图4 蠕变试验加载和位移测量装置

Fig.4 Loading and displacement measuring device of creep testing system

加载至规定应力后，每隔约 12 h 记录一次读数，直至读数平稳为止。与熊良宵等^[6-8]中的蠕变试验相比，本文试验的历时是较长的。

4 试验结果及分析

4.1 单轴加载试验

图5给出了试件2在 $\sigma_1=28.8\text{ MPa}$ 作用下各时刻应变及其模型拟合曲线。由此可见，在此应力水平下，经过约 150 h 的短时间的初期衰减蠕变阶

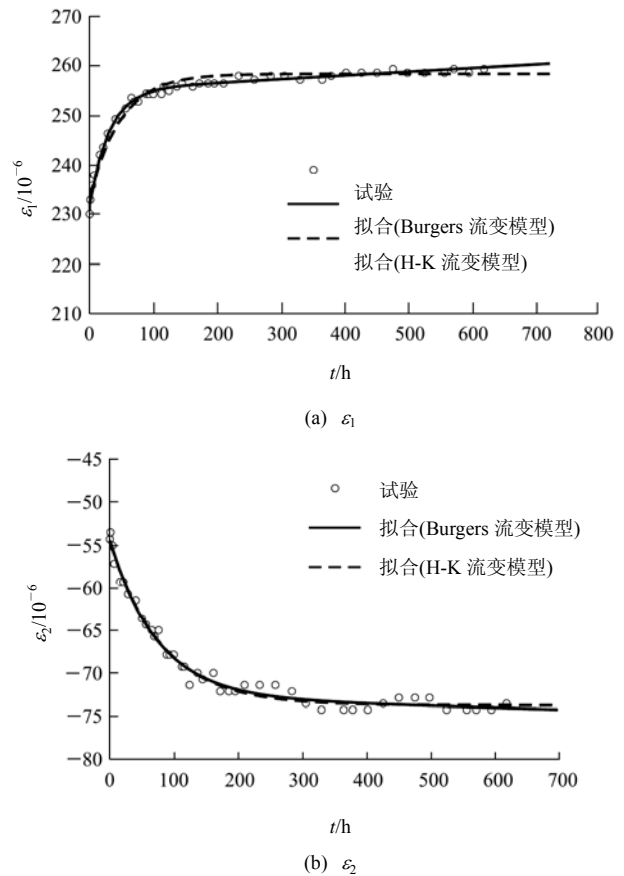


图5 试件2在 $\sigma_1=28.8\text{ MPa}$ 作用下各时刻应变及其模型拟合曲线

Fig.5 Strains at different loading times and model fitting curves of specimen 2 under $\sigma_1=28.8\text{ MPa}$

段后，变形即基本趋于稳定，进入稳定蠕变阶段。2种模型的拟合曲线比较接近，Burgers 流变模型曲线与试验数据更加吻合。

4.2 双轴加载试验

试件1在 $\sigma_1=28.8\text{ MPa}$ 和 $\sigma_2=19.4\text{ MPa}$ 作用下各时刻应变及其2种模型拟合曲线如图6所示。可见在此应力状态下，试件在经历了约 250 h 的衰减蠕变后，进入了稳定蠕变阶段，蠕变速率趋近于0。H-K 与 Burgers 流变模型拟合的效果已十分一致。对比式(5)和(8)可知，对于此试验结果，除了 Burgers 流变模型中的参数 η_1 几乎为0外，2种模型的其他参数已几乎相同。

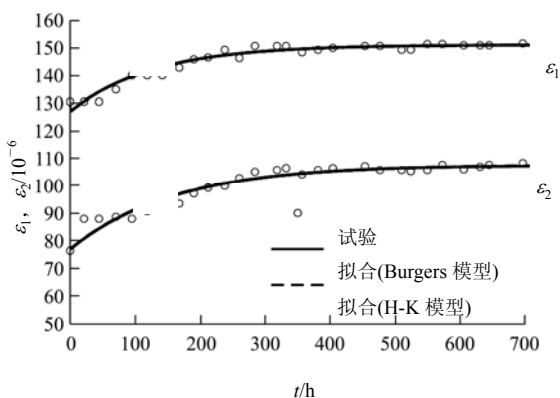


图 6 试件 1 在 $\sigma_1 = 28.8$ MPa 和 $\sigma_2 = 19.4$ MPa 作用下各时刻应变及其模型拟合曲线

Fig.6 Strains at different times and model fitting curves of specimen 1 under $\sigma_1 = 28.8$ MPa and $\sigma_2 = 19.4$ MPa

为了更清楚地说明问题, 图 7 给出了试件 5 在 $\sigma_1 = 29.2$ MPa 和 $\sigma_2 = 14.4$ MPa 作用下, 扣除了瞬时弹性变形的垂直应变 ϵ_1 和水平应变 ϵ_2 的蠕变试验

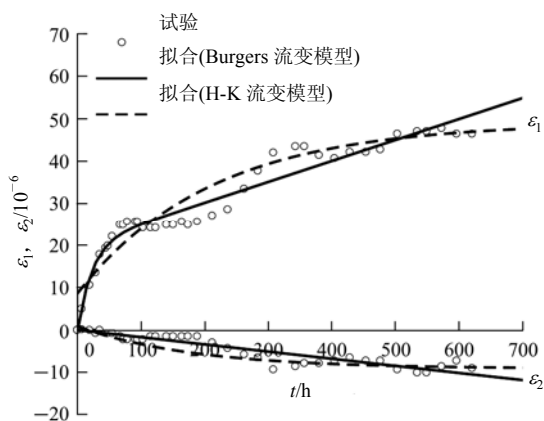


图 7 试件 5 在 $\sigma_1 = 29.2$ MPa 和 $\sigma_2 = 14.4$ MPa 作用下各时刻纯与时间有关的应变及其模型拟合曲线

Fig.7 Purely time-dependent strains ϵ_1 and ϵ_2 at different times and model fitting curves of specimen 5 under $\sigma_1 = 29.2$ MPa and $\sigma_2 = 14.4$ MPa

结果以及 2 种模型的拟合曲线。本例的试验数据规律性不是很强, 并不符合 H-K 流变模型式(5)的规律, 在加大后面数据的拟合权重后, 才得到图 7 中的 H-K 流变模型曲线, 但此纯与时间相关的应变曲线并不经过坐标原点, 使得 ϵ_1 和 ϵ_2 分别附加上 8.48×10^{-6} 和 0.86×10^{-6} 的瞬时弹性应变, 不尽合理。相反, 试验结果却与 Burgers 模型比较相符, 显示出此模型增加了随时间线性递增的主蠕变项(见式(9)及其讨论)后给数据拟合带来了灵活性。不过, 从试验数据的变化趋势来看, 在试验所施加的应力状态下, 试件出现了衰减蠕变, 且随着时间的推移, 约

300 h 后蠕变速率趋向于常数 0, 符合 H-K 模型的特征, 采用 H-K 模型应是合理的。熊良宵等^[6, 7]因考虑的时间不够长, 模型拟合数据时主要集中于衰减蠕变阶段, 造成蠕变还在明显增长的假象, 故而不恰当地采用了 Burgers 模型。

图 8 给出了试件 6 分级加载时的应变蠕变曲线 ($\sigma_2 = 14.1$ MPa)。受试验时间和加载水平限制, 试验曲线除观测到前 2 个阶段外, 没有观测到最后一级荷载下的蠕变全过程。大理岩属于坚硬岩石, 在较低应力水平下, 蠕变变形较小, 本次试验也说明了这一点。在低于某一应力水平时, 经过短时间的初期蠕变后, 变形即趋于稳定。若将加载应力水平提高, 第一阶段蠕变有明显增加。

图 9 给出了试件 6 在 $\sigma_1 = 47.8$ MPa 和 $\sigma_2 = 14.1$ MPa 作用下各时刻应变及其模型拟合曲线。H-K 流变模型已预先设定第二阶段的蠕变速率为 0, 故而很好地描述了蠕变特征。如果利用 Burgers 流变模型来拟合, 则会出现图 9 中第二阶段蠕变继续稳定减

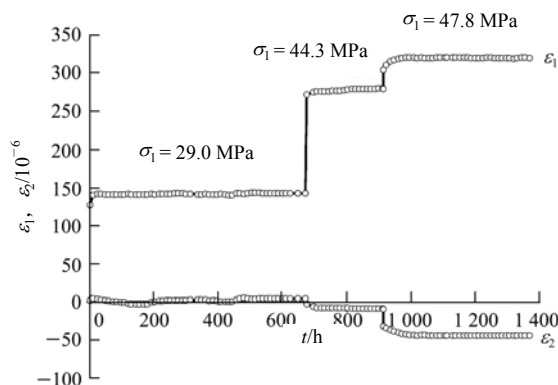
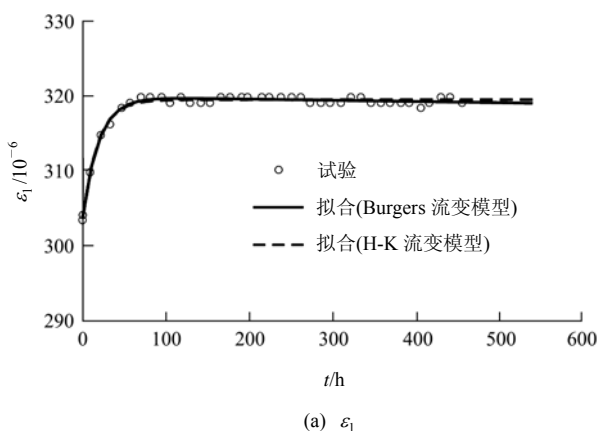


图 8 试件 6 分级加载时的应变蠕变曲线($\sigma_2 = 14.1$ MPa)
Fig.8 Creep testing curves of specimen 6 under step loading with $\sigma_2 = 14.1$ MPa



(a) ϵ_1

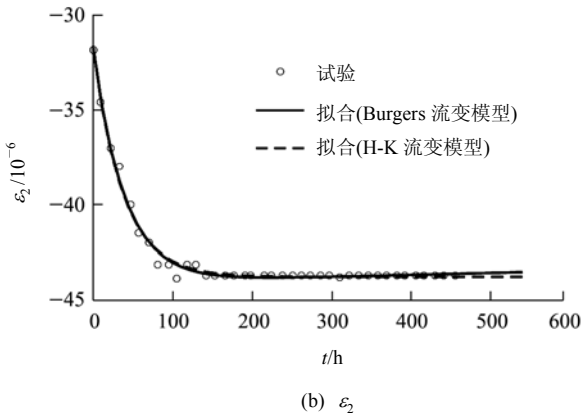


图9 试件6在 $\sigma_1 = 47.8$ MPa和 $\sigma_2 = 14.1$ MPa作用下各时刻应变及其模型拟合曲线

Fig.9 Strains at different times and model fitting curves of specimen 6 under $\sigma_1 = 47.8$ MPa and $\sigma_2 = 14.1$ MPa

少的不合理现象，违反了模型中的黏性元件的参数 $\eta_1 > 0$ 的规定。

4.3 模型参数

对于以上试件的蠕变试验结果，采用 H-K 和 Burgers 流变模型分别对其进行数据拟合，从而可以利用本文的方法确定模型参数。表 1 为锦屏一级水电站大理岩 H-K 流变模型参数。表 1 中的方程与

表 1 锦屏一级水电站大理岩 H-K 流变模型参数
Table 1 H-K rheological model parameters of marble of Jinping I hydropower station

试件编号	应力 /MPa	应变的模型曲线方程	模型参数			
			K /GPa	G_1 /GPa	G_2 /GPa	η_2 /(GPa·h)
2	$\sigma_1 = 28.8,$ $\sigma_2 = 0$	$\epsilon_1 = 258.3 -$	77.32	50.03	387.16	18 631.16
		$24.82\exp(-0.020 78t)$				
		$\epsilon_2 = -73.74 +$ $19.14\exp(-0.012 43t)$				
1	$\sigma_1 = 27.3,$ $\sigma_2 = 19.4$	$\epsilon_1 = 151.2 -$	98.62	78.83	243.46	31 281.42
		$24.11\exp(-0.007 783t)$				
		$\epsilon_2 = 107.7 -$ $30.78\exp(-0.006 349t)$				
6	$\sigma_1 = 47.8,$ $\sigma_2 = 14.1$	$\epsilon_1 = 319.4 -$	66.38	71.29	1 003.36	18 199.86
		$15.88\exp(-0.055 13t)$				
		$\epsilon_2 = -43.78 +$ $12.04\exp(-0.027 04t)$				

图 9 中的曲线对应，其中每个系数的 5%置信区间都很小。从以上分析可知，2 种模型曲线十分相近，Burgers 流变模型参数也与表 1 中的数值相差不大。

表 1 表明，以不同曲线所得的 G_2 和 η_2 并不相同，说明大理岩具有明显的各向异性，采用 H-K 流变模型只是一种简便处理^[19]。

应当指出，2 种流变模型的参数都是直接从试验数据拟合得到，尽管比较接近，但反映的物理现象毕竟不同，如果采用 H-K 模型进行数值模拟，直接利用如 FLAC^{3D}^[20]等软件所提供的 Burgers 模型时，令黏性系数 η_1 为很大的数，将其代入 H-K 模型参数是严谨的做法，而代入所得 Burgers 模型的其他参数的做法却不是很好。

5 结 论

利用 CSS - 238 岩石双轴流变试验机对锦屏一级水电站地下厂房大理岩进行了单轴、双轴压缩蠕变试验，利用试验数据对 Hooke-Kelvin 流变模型和 Burgers 流变模型作了比较，主要结论如下：

(1) 大理岩试件在单轴和双轴应力状态下变形都经过衰减蠕变阶段后基本趋于稳定，符合 H-K 流变模型的特征，采用 H-K 流变模型能够很好地描述其黏弹性特性，拟合曲线与试验数据吻合程度较高。

(2) 当试验数据具有明显的持续蠕变阶段时，利用 Burgers 流变模型是合适的。但是对于如大理岩这样的硬质岩石，其第二阶段的蠕变已不甚明显，Burgers 流变模型不宜采用。采用此模型时应考察较长时间如 150 h 以上的试验数据。

(3) 通过观察蠕变试验所得的应变时间序列，利用相应流变模型的应变蠕变方程对此直接进行非线性拟合，容易发现试验数据与模型的吻合程度，也方便解算流变模型参数。

(4) 锦屏一级水电站厂区大理岩具有较明显的时效特征，采用 H-K 流变模型能够较好地说明洞室群开挖一定时间后变形趋于平稳的事实，运用试验所确定的 H-K 流变模型及其参数有助于使洞室群施工期及运行期的长期稳定性的仿真数值计算结果更接近实际情况。

参考文献(References):

[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. Geomaterial rheology and its applications[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.(in Chinese))
[2] SUN J, WANG S J. Rock mechanics and rock engineering in China: developments and current state-of-the-art[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(3): 447 - 465.

- [3] XU P, YANG T Q, ZHOU H M. Study of the creep characteristics and long-term stability of rock masses in the high slopes of the TGP ship lock, China[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(Supp.1): 261 - 266.
- [4] 徐平, 丁秀丽, 全海, 等. 溪洛渡水电站坝址区岩体蠕变特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2003, 24(增1): 220 - 222, 226.(XU Ping, DING Xiuli, QUAN Hai, et al. Testing study of creep behavior of rock mass at Xiluodu dam site[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(Supp.1): 220 - 222, 226.(in Chinese))
- [5] 贺如平, 张强勇, 王建洪, 等. 大岗山水电站坝区辉绿岩脉压缩蠕变试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(12): 2 495 - 2 503.(HE Ruping, ZHANG Qiangyong, WANG Jianhong, et al. Study of compressive creep test on diabasic dike at dam site of Dagangshan hydropower station[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(12): 2 495 - 2 503.(in Chinese))
- [6] 熊良宵, 杨林德, 张尧, 等. 锦屏二级水电站绿片岩双轴压缩蠕变特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(增2): 3 928 - 3 934.(XIONG Liangxiao, YANG Linde, ZHANG Yao, et al. Experimental study of creep behaviors of greenschist specimen from Jingping II hydropower station under biaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(Supp.2): 3 928 - 3 934.(in Chinese))
- [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): 3 745 - 3 749.(LI Huamin, LI Zhenhua, SU Chengdong. Testing study of creep characteristics of marble[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(22): 3 745 - 3 749.(in Chinese))
- [8] 韩冰, 王芝银, 郝庆泽. 某地区花岗岩三轴蠕变试验及其损伤分岔特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(增2): 4 123 - 4 129.(HAN Bing, WANG Zhiyin, HAO Qingze. Study of damage and bifurcation properties of some granites based on triaxial creep experiment[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(Supp.2): 4 123 - 4 129.(in Chinese))
- [9] 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))
- [10] MARANINI E, BRIGNOLI M. Creep behaviour of a weak rock: experimental characterization[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(1): 127 - 138.
- [11] 胡昱. 软弱砾岩力学特性及其对拱坝应力影响[博士学位论文][D]. 北京: 清华大学, 2003.(HU Yu. Mechanical properties of weaken conglomerate and its effect to the stress distribution of arch dam[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Tsinghua University, 2003. (in Chinese))
- [12] 范广勤. 岩土工程流变力学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.(FAN Guangqin. Rheological mechanics in geotechnical engineering[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1993.(in Chinese))
- [13] 王芝银, 李云鹏. 岩体流变理论及其数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2008.(WANG Zhiyin, LI Yunpeng. Rock rheological theory and numerical simulation[M]. Beijing: Science Press, 2008.(in Chinese))
- [14] 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))
- [15] 陈沅江. 岩石流变的本构模型及其智能辨识研究[博士学位论文][D]. 长沙: 中南大学, 2003.(CHEN Yuanjiang. Study of the rheological constitutive model of rock and its intelligent identification[Ph. D. Thesis][D]. Changsha: Central South University, 2003.(in Chinese))
- [16] CHALLAMEL N, LANOS C, CASANDJIAN C. Creep damage modelling for quasi-brittle materials[J]. *European Journal of Mechanics*, 2005, 24(4): 593 - 613.
- [17] BERDICHEVSKY V, HAZZLEDINE P, SHOYKHET B. Micro-mechanics of diffusional creep[J]. *International Journal of Engineering Science*, 1997, 35(10/11): 1 003 - 1 032.
- [18] 夏才初, 王晓东, 许崇帮, 等. 用统一流变力学模型理论辨识流变模型的方法和实例[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(8): 1 594 - 1 600.(XIA Caichu, WANG Xiaodong, XU Chongbang, et al. Method to identify rheological models by unified rheological model theory and case study[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(8): 1 594 - 1 600.(in Chinese))
- [19] SHAO J F, CHAU K T, FENG X T. Modeling of anisotropic damage and creep deformation in brittle rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006, 43(4): 582 - 592.
- [20] 张明, 孙思奥, 李仲奎. 地下厂房布置优化及施工过程的显式有限差分法数值模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(增2): 3 760 - 3 767.(ZHANG Ming, SUN Siao, LI Zhongkui. Numerical simulations of layout optimization and construction process of underground powerhouse with explicit difference method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(Supp.2):

3 760 - 3 767.(in Chinese)