

DOI: 10.11779/CJGE201601004

构皮滩软岩流变模型原位载荷蠕变试验研究

熊诗湖, 周火明, 黄书岭, 蒋志明

(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: 针对构皮滩水电站破碎页岩进行 2 点原位刚性承压板载荷蠕变试验, 采用 1 级循环加载方式, 试验压力为工程应力水平, 试验历时 1686, 2299 h。试验揭示了该软岩如下蠕变特性: 在工程应力下, 岩体经历起始阶段减速蠕变和 682, 910 h 较长时间的等速蠕变后, 蠕变速率趋于零, 总体呈衰减蠕变, 并不发生塑性流动; 卸荷后, 经历瞬时回弹、弹性后效, 存在较大的残余变形, 残余变形大于总变形的 50%。提出一种加载呈弹性、卸载不回弹的单向弹簧元件 $[H_1]$ 描述残余变形, 将其与广义 Kelvin 模型串联组成变异广义 Kelvin 模型, 该模型结构简单, 可综合描述软岩加载呈衰减蠕变、卸载存在较大残余变形的蠕变特性。视岩体体积变形为弹性、畸变遵循变异广义 Kelvin 模型, 基于相应性原理推导了岩体表面蠕变方程, 以岩体蠕变方程拟合试验蠕变曲线, 得到了模型参数。

关键词: 岩石力学; 页岩; 软岩; 载荷蠕变; 构皮滩; Kelvin; 原位试验

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2016)01 - 0053 - 05

作者简介: 熊诗湖(1967 -), 男, 高级工程师, 主要从事岩体力学现场试验研究。E-mail: xsh-xiong@163.com。

Rheological model of soft rock in Goupitan by in-situ plate-loading creep tests

XIONG Shi-hu, ZHOU Huo-ming, HUANG Shu-ling, JIANG Zhi-ming

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

Abstract: Two in-situ plate-loading creep tests on fracture shale in Goupitan Hydropower Station are conducted, in which the pressure is at the same engineering stress level and is loaded under one cycle pattern and the test durations are 1686 and 2299 h, respectively. Some creep characteristics of the soft rock are revealed as follows: (1) Under the engineering stress level, after decelerating creep at the initial stage and the subsequent constant-rate creep continuing for a period of 682 and 910 h, the creep rate tends to zero instead of occurrence of plastic flow, showing that the creep is the attenuation creep in total. (2) After unloading, there's instantly rebound deformation and anelasticity and residual deformation, which is over 50% of the total deformation. A kind of one-way spring element ($[H_1]$), which will behave as elastic object under pressure but not rebound after unloading, is used to describe the residual deformation. By connecting the $[H_1]$ element with the generalized Kelvin model, a changed generalized Kelvin model is established. It has simple components and can comprehensively describe the creep features of soft rock, that is, it is the attenuation creep while loading and there is the residual deformation after unloading. The constitutive equation of the model is derived, and the creep formula is also derived based on the corresponding principle. The model parameters are inverted by taking the creep formula to fit the trial curves.

Key words: rock mechanics; shale; soft rock; plate-loading creep test; Goupitan; Kelvin; in-situ test

0 引 言

岩体在工程应力下多呈衰减蠕变。一般认为衰减蠕变是黏弹性的, 多用广义 Kelvin 模型描述^[1-4]。但岩体卸荷后存在残余变形, 其原因在于岩体内的裂隙在压力下闭合^[5], 该部分变形在卸载时大部分不可恢复, 因此广义 Kelvin 模型描述岩体卸荷蠕变是不准确的。另一方面, 对于卸荷蠕变, 多采用非线性模型描述^[6-12], 带塑性元件的非线性模型在应力达到屈服面后卸载存在不可恢复变形, 但加载时产生塑性流动,

并非衰减蠕变, 因此带塑性元件的非线性模型可反映卸荷残余变形, 但不能描述加载时的衰减蠕变。赵延林等^[13]将岩石衰减蠕变分为瞬时弹性变形、黏弹性变形、瞬时塑性变形、黏塑性变形 4 部分, 并采用经验蠕变方程描述, 该方程可描述加、卸载蠕变曲线, 但不便于数值分析。

基金项目: 国家自然科学基金项目(面上项目)(51379022)

收稿日期: 2014 - 11 - 04

本文针对构皮滩水电站升船机基础破碎页岩,进行原位岩体刚性承压板载荷蠕变试验,采用1级循环载荷方式,试验压力为工程应力水平,试验历时69~95 d,基于蠕变曲线提出一种变异广义 Kelvin 黏弹性流变模型,描述软岩加载呈衰减蠕变、卸荷存在较大残余变形的蠕变特性。

该模型可克服广义 Kelvin 模型可描述衰减蠕变但不能反映卸荷残余变形,以及黏弹塑性模型可反映卸荷残余变形但描述衰减蠕变不准确的缺陷,对于地下洞室围岩、工程边坡等工程岩体,特别是软岩,采用该模型分析其开挖过程和运行期卸荷状态下的长期变形,结果更合理。

1 试验条件

共完成2点载荷蠕变试验(编号C1、C2),试验布置于升船机基础试验平洞底板,洞深280,300 m,试验段渗水但无积水。试验岩体为二级升船机基础和边坡奥陶系湄潭组(O_{1m}^1)页岩,颗粒密度 2.80 g/cm^3 ,天然块体密度 2.61 g/cm^3 ,垂直层面抗压强度 16.2 MPa 、平行层面抗压强度 7.3 MPa ,原位刚性承压板变形试验变形模量 0.33 GPa 。C1点为碎裂状,岩层倾角 15° ,C2点为碎块状,岩层倾角 51° 。

载荷承压板为圆形刚性承压板,直径 50.5 cm 。千斤顶做为出力设备。YLB-60型气-液式压力伺服系统做为压力控制设备,该系统最大输出压力 33 MPa ,压力波幅 $\pm 0.2 \text{ MPa}$ 。光栅传感器做为变形测量设备,测量精度 $1 \mu\text{m}$ 。在承压板表面边缘对称布置4个测点,以4点变形的平均值作为承压板下岩体表面的变形。试验安装见图1。

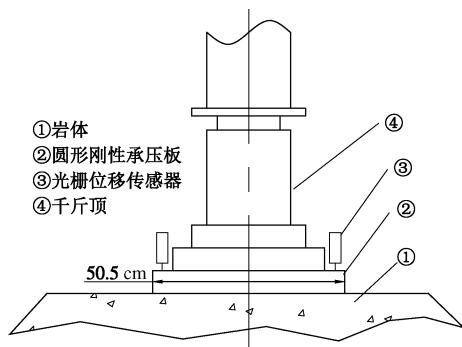


图1 试验安装示意图

Fig. 1 Sketch of test installation

由于软岩蠕变的非线性显著,如采用分级加载,各应力水平的蠕变按 Boltzmann 法叠加将产生不可忽略的累积误差,故采用1次加、卸载循环载荷方式,试验压力为工程应力水平,分别为 $1.5, 2.0 \text{ MPa}$ 。

2 蠕变特性

蠕变曲线见图2,岩体变形见表1。加、卸载初始,岩体变形急剧发展,为便于与常规变形试验比较,加、卸载“瞬时”变形取2.5 h时刻的变形。

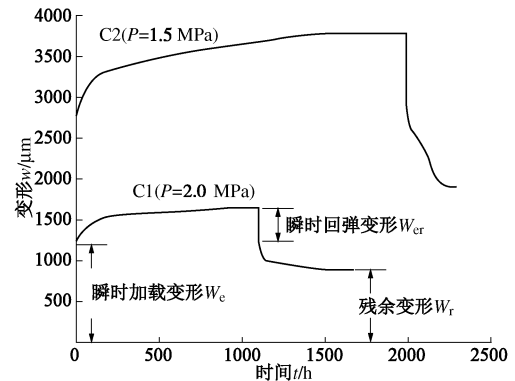


图2 变形与时间关系曲线

Fig. 2 Deformation-time curves

表1 岩体变形

Table 1 Rock deformation

试点编号	压力 /MPa	恒载时间 /h	瞬时变形 / μm	总变形 / μm	瞬时回弹变形 / μm	残余变形 / μm
C1	2.0	1105	1151	1635	350	901
C2	1.5	1999	2314	3686	731	1896

蠕变具有以下特征:

(1) 加载有瞬时变形。C1, C2点瞬时变形分别为 $1151, 2314 \mu\text{m}$ 。

(2) 蠕变经起始段加速衰减、较长时间的等速蠕变阶段后,蠕变速率趋于零。采用移动平均法对加载变形数据平滑处理,计算24 h时间间隔的变形速率,见图3。可见:C1点在 $0\sim 228 \text{ h}$ 时间段蠕变速率递减, $204\sim 886 \text{ h}$ 时间段大体呈等速蠕变,蠕变速率在 $0.179 \mu\text{m/h}$ 上下波动, $886\sim 1105 \text{ h}$ 时间段蠕变速率大体为零;C2点在 $0\sim 451 \text{ h}$ 时间段蠕变速率递减, $451\sim 1361 \text{ h}$ 时间段大体呈等速蠕变,蠕变速率在 $0.391 \mu\text{m/h}$ 上下波动, $1361\sim 1505 \text{ h}$ 时间段蠕变速率递减, $1505\sim 1999 \text{ h}$ 时间段蠕变速率大体为零。

(3) 卸荷有瞬时回弹。

(4) 有较大残余变形。C1点残余变形 $901 \mu\text{m}$,与总变形的比值为 0.55 ;C2点残余变形 $1896 \mu\text{m}$,与总变形的比值为 0.51 。

(5) C2点压力低于C1点,但瞬时变形和蠕变较后者大,其原因在于前者岩体性状较差,为碎块状,后者为碎裂状。因岩体性状差异较大,无法分析应力

水平对于蠕变的影响。

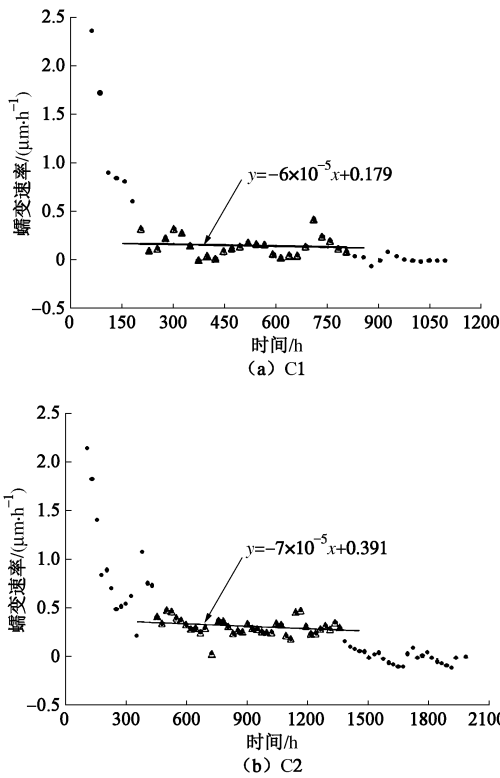


图 3 蠕变速率与时间关系曲线
Fig. 3 Creep rate-time curves

3 蠕变模型

3.1 变异广义 Kelvin 模型

设蠕变由弹性应变 ε_e^0 、瞬时不可逆应变 ε_i^0 、黏弹性应变 $\varepsilon_{cc}(t)$ 3 部份组成:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e^0 + \varepsilon_i^0 + \varepsilon_{cc}(t) \quad (1)$$

卸荷时, 瞬时不可逆应变 ε_i^0 不可恢复, 成为残余变形。采用一种单向弹簧 $[H_1]$ 描述 ε_i^0 , $[H_1]$ 加载状态呈弹性, 卸载状态为刚体, 不回弹, 其本构关系为

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= E_1 \varepsilon & (\sigma > 0), \\ \varepsilon &= 0 & (\sigma \leq 0), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, E_1 为弹性模量。

将 $[H_1]$ 与广义 Kelvin 模型串联, 组成变异广义 Kelvin 模型。模型见图 4。

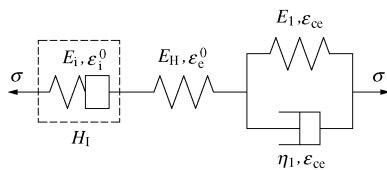


图 4 变异广义 Kelvin 模型

Fig. 4 Changed generalized Kelvin model

模型蠕变方程为

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} \left\{ \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_H} + \frac{1}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1 t}{\eta_1}\right) \right] \right\} \sigma & (\sigma > 0) \\ \left\{ \frac{1}{E_H} + \frac{1}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_1 t}{\eta_1}\right) \right] \right\} \sigma & (\sigma \leq 0) \end{cases} \quad (3)$$

3.2 岩体蠕变方程

承压板下岩体表面弹性变形公式为

$$w = \frac{\pi P D (1 - \nu^2)}{4 E} \quad (4)$$

式 (4) 采用 K, G 表达为

$$w = \frac{\pi P D (3K + 4G)}{8G(6K + 2G)} \quad (5)$$

式中, w 为承压板下岩体表面弹性变形, P 为压力, D 为承压板直径。

假定体变为弹性, 畸变为黏弹性、符合变异广义 Kelvin 模型本构方程。根据黏弹性与弹性相应性原理, 基于式 (3)、(5) 推导承压板下岩体表面蠕变方程为

$$w(t) = \frac{\pi P D}{4 E_0} \left(\frac{2 E_0^2 E_1 + 2 E_0 E_1^2 + 3 K (E_0 + E_1)^2}{A E_1} + \frac{-3 E_0^3}{2 A (E_0 + 6 K)} \exp\left(\frac{-A t}{\eta_1 (E_0 + 6 K)}\right) - \frac{E_0}{2 E_1} \exp\left(\frac{-E_1 t}{\eta_1}\right) \right) \quad (6a)$$

其中,

$$A = E_0 E_1 + 6 K E_0 + 6 K E_1 \quad (6b)$$

$$E_0 = \begin{cases} \frac{E_H E_1}{E_H + E_1} & (\sigma > 0) \\ E_H & (\sigma \leq 0) \end{cases} \quad (6c)$$

3.3 解析法求解模型参数 K, E_H, E_1

瞬时加载变形与瞬时回弹变形不相等, 因此, 加、卸载状态下的 E_e 不相等, 相应地, 加、卸载状态下的 K, G 亦不相等。

K 按下式求解:

$$K = \frac{E_e}{3(1 - 2\nu)} \quad (7a)$$

式中,

$$E_e = \begin{cases} \frac{\pi P D (1 - \nu^2)}{4 w_e} & (\sigma > 0) \\ \frac{\pi P D (1 - \nu^2)}{4 w_{er}} & (\sigma \leq 0) \end{cases} \quad (7b)$$

其中, E_e 为瞬时弹性模量, w_e 为瞬时加载变形, w_{er} 为瞬时回弹变形 ($w_{er} = w_e - w_r$, 见图 2)。

$t = 0$ 时, 加载状态下的模型与串联弹簧 E_H, E_1 等效, 卸载状态下的模型与弹簧 E_H 等效, 式 (3) 可化为

表2 蠕变模型参数

Table 2 Parameters of creep model

试点 编号	E_H /GPa	E_1 /GPa	K /GPa		变异广义 Kelvin 模型		扩展变异广义 Kelvin 模型			
			加载	卸载	E_1 /GPa	η_1 /(GPa·h)	E_1 /GPa	η_1 /(GPa·h)	E_2 /GPa	η_2 /(GPa·h)
C1	1.97	0.55	0.82	3.78	0.84	92.13	2.30	944.51	1.26	58.15
C2	0.88	0.19	0.31	1.69	0.21	46.49	0.42	265.15	0.38	6.69

$$\sigma = \begin{cases} \frac{E_H E_1}{E_H + E_1} \varepsilon & (\sigma > 0) \\ E_H \varepsilon & (\sigma \leq 0) \end{cases} \quad (8)$$

注意到物性假定，式(8)实为畸变本构，可知

$$2G = \begin{cases} \frac{E_H E_1}{E_H + E_1} & (\sigma > 0) \\ E_H & (\sigma \leq 0) \end{cases} \quad (9)$$

又

$$G = \frac{E_e}{2(1+\nu)} \quad (10)$$

据式(9)、(10)、(7b)可求解 E_H , E_1 。

3.4 蠕变曲线拟合

以式(6a)拟合试验蠕变曲线，对 E_1 , η_1 优化取值。因岩体加、卸载蠕变曲线有差异，采用以下3种拟合方式得到的模型参数不同：综合拟合加、卸载曲线；仅拟合加载曲线；仅拟合卸载曲线。考虑试验岩体为升船机基础岩体，基本处于加载状态，采取拟合加载曲线的方式。

为优化拟合效果，在模型中再串联一个 Kelvin 体（模型参数 E_2 , η_2 ），形成扩展变异广义 Kelvin 模型，基于该模型的岩体蠕变方程可仿式(6)推导。

变异广义 Kelvin 模型及扩展变异广义 Kelvin 模型拟合曲线见图5，模型参数见表2。

模型可较好地拟合加载曲线，扩展变异广义 Kelvin 模型拟合效果更佳。对于卸载蠕变，模型的长期变形与试验曲线一致，但是，由于加、卸载变形规律存在差异，而模型参数基于加载曲线确定，对卸载蠕变过程的拟合效果较差。

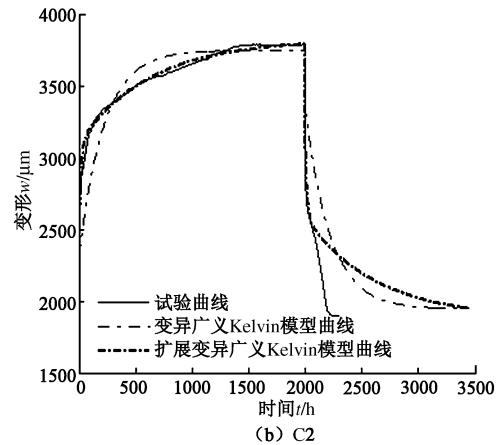
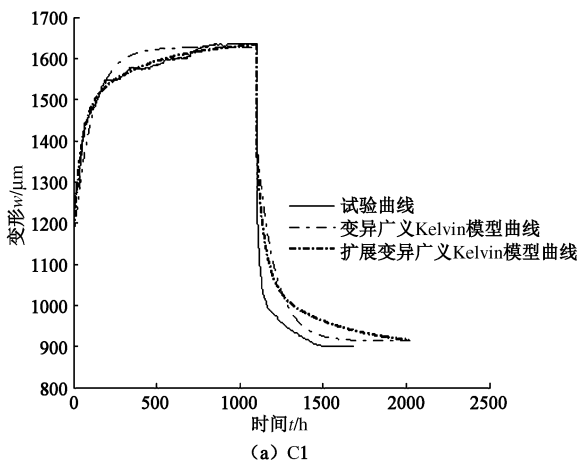


图5 蠕变模型拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves of creep model

4 结 语

针对构皮滩水电站破碎页岩，进行2点原位刚性承压板载荷蠕变试验，采用1次加、卸载循环载荷方式，试验压力为工程应力水平，试验周期1686, 2299 h。

试验表明，在工程应力下，软岩经历起始阶段减速蠕变及682, 910 h较长时间的等速蠕变后，蠕变速率趋于零，总体呈衰减蠕变；卸荷后，经历瞬时回弹、弹性后效，存在较大的残余变形，残余变形大于总变形的50%。

提出一种加载呈弹性、卸载不回弹的单向弹簧元件[H₁]，将其与广义 Kelvin 模型串联组成变异广义 Kelvin 模型，该模型结构简单，可综合描述软岩加载呈衰减蠕变、卸载存在较大残余变形的蠕变特性。通过拟合试验蠕变曲线，得到了模型参数。

参考文献:

- [1] 刘学增, 王华军, 周敏, 等. 板岩流变特性试验与模型辨识[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(5): 664 - 672. (LIU Xue-zeng, WANG Hua-jun, ZHOU Min, et al. Rheological tests of slates and model identification of rocks[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(5): 664 - 672. (in Chinese))
- [2] 张强勇, 向文, 杨文东, 等. 坝区岩体蠕变参数反演与边坡开挖流变计算分析[J]. 武汉大学学报, 2008, 41(5): 72 -

- 76, 96. (ZHANG Qiang-yong, XIANG Weng, YANG Weng-dong, et al. Creep parameters inversion for dam zone rockmass and rheological computational analysis of slope excavation[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2008, **41**(5): 72 - 76, 96. (in Chinese))
- [3] 周火明, 徐平. 三峡永久船闸边坡现场岩体压缩蠕变试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, **20**(增刊): 1882 - 1885. (ZHOU Huo-ming, XU Ping. In-situ testing study on compressive creep behavior of rock mass in Three Gorges Project shiplock slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, **20**(S0): 1882 - 1885. (in Chinese))
- [4] 熊诗湖, 周火明, 钟作武. 岩体载荷蠕变试验方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(10): 2121 - 2127. (XIONG Shi-hu, ZHOU Huo-ming, ZHONG Zuo-wu. Study on methodology of plate-loading creep test of rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(10): 2121 - 2127. (in Chinese))
- [5] 陈文玲, 赵法锁, 弓虎军. 基于微观试验的云母石英片岩三轴蠕变机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(增刊 2): 3578 - 3584. (CHEN Wen-ling, ZHAO Fa-suo, GONG Hu-jun. Study of triaxial creep mechanism of mica-quartz schist based on microscopic test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S2): 3578 - 3584. (in Chinese))
- [6] 范庆忠, 高延法, 崔希海, 等. 软岩非线性蠕变模型研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(4): 505 - 508. (FAN Qing-zhong, GAO Yan-fa, CUI Xi-hai, et al. Study on nonlinear creep model of soft rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(4): 505 - 508. (in Chinese))
- [7] 张治亮, 徐卫亚, 王伟. 向家坝水电站坝基挤压带岩石三轴蠕变试验及非线性黏弹塑性蠕变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(1): 132 - 140. (ZHANG Zhi-liang, XU Wei-ya, WANG Wei. Study of triaxial creep tests and its nonlinear visco-elastoplastic creep model of rock from compressive zone of dam foundation in Xiangjiaba hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(1): 132 - 140. (in Chinese))
- [8] 闫子舰, 夏才初, 李宏哲, 等. 分级卸荷条件下锦屏大理岩流变规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(10): 2153 - 2159. (YAN Zi-jian, XIA Cai-chu, LI Hong-zhe, et al. Study on rheological rules of marble in Jinping hydropower station under condition of step unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(10): 2153 - 2159. (in Chinese))
- [9] 蒋昱州, 朱杰兵, 王瑞红. 软硬互层岩体卸荷蠕变力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(4): 778 - 784. (JIANG Yu-zhou, ZHU Jie-bing, WANG Rui-hong. Experimental study of unloading creep mechanical properties alternatively distributed soft and hard rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(4): 778 - 784. (in Chinese))
- [10] 夏才初, 闫子舰, 王晓东, 等. 大理岩卸荷条件下弹黏塑性本构关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(3): 459 - 466. (XIA Cai-chu, YAN Zi-jian, WANG Xiao-dong, et al. Experimental research on mechanical properties of limestone containing natural joints under loading and unloading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(3): 459 - 466. (in Chinese))
- [11] 朱杰兵, 汪斌, 邬爱清. 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[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(3): 528 - 534. (ZHU Jie-bing, WANG Bin, WU Ai-qin. Study of unloading triaxial rheological tests and its nonlinear damage constitutive model of Jinping station green sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(3): 528 - 534. (in Chinese))
- [12] 谌文武, 原鹏博, 刘小伟. 分级加载下薄层状岩石蠕变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(增刊 1): 3076 - 3081. (CHEN Wen-wu, YUAN Peng-bo, LIU Xiao-wei, et al. Study on creep properties of red-bed soft rock under step load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(S1): 3076 - 3081. (in Chinese))
- [13] 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 Yan-lin, CAO Ping, WEN You-dao, 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))