

文章编号:1009-3087(2014)03-0001-06

水环境中高水速凝材料蠕变特性及其流变模型

王 丁^{1,2,3}, 曾靖皓^{1,2}, 刘长武^{1,2}, 徐煜航^{1,2}

(1. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;

2. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065; 3. 页岩气评价与开采四川省重点实验室, 四川 成都 610072)

摘 要:为了研究高水速凝材料作为采空区充填体是否具有长期、有效控制上覆岩层移动变形的能力,对高水速凝材料进行了瞬时物理力学试验和微观扫描分析,及利用重力连续加载方式进行了干燥和水环境中的蠕变试验,根据蠕变试验曲线进行了高水速凝材料的流变模型辨识和参数反演。结果表明:高水速凝材料在空气环境中容易丧失强度,水环境条件工作更利于提高其自身结构和承载力的稳定性;高水速凝材料的长期蠕变稳定性取决于荷载水平是否达到其材料的长期屈服强度;Burgers 流变模型能更好地描述水环境中高水速凝材料这种“类”软岩的蠕变特性。

关键词:水环境;高水速凝材料;蠕变试验;蠕变特性;流变模型

中图分类号:TU458

文献标志码:A

Creep Law and Rheological Model of High-water Rapid-setting Material in Water Environment

WAND Ding^{1,2,3}, ZENG Jinghao^{1,2}, LIU Changwu^{1,2}, XU Yuhang^{1,2}

(1. State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;

2. School of Hydraulic and Hydroelectrical Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;

3. Shale Gas Evaluation and Exploitation Key Lab. of Sichuan Province, Chengdu 610072, China)

Abstract: In order to study whether the high-water rapid-setting material (HRM) have the ability to control the strata movement chronically and effectively, transient mechanical tests and microscopic scanning were performed on HRM. HRM creep experiments in air environment and water environment were conducted through continuously gravitational loading way. At the same time, based on creep experiments, the rheological model and rheological parameters of HRM were identified. The results of creep experiments and rheological identification showed that the strength of HRM will be reduced in air environment, and water environment is beneficial for its strength reinforcement. The creep behavior stability of RHM is determined by whether its loading level is above or below its yield stress. The creep law of HRM in water environment can be better simulated by the Burgers model.

Key words: water environment; high-water rapid-setting material (HRM); creep experiment; creep law; rheological model

深部地下煤矿资源开采过程中所面临的岩石工程流变问题日趋复杂。如为控制地面的变形破坏,减少地下开采造成的环境问题而采用充填法处理采空区时,充填体的稳定分析及地面沉降计算,均涉及岩体或充填体在地应力和水长期耦合作用下的物性变化问题,水环境中岩石材料或充填材料的蠕变规律是决定充填效果的决定性因素之一^[1-4]。

岩石材料的瞬态力学特性试验表明,在影响岩

石强度的众多因素中水的作用尤其明显。Chang等^[5]通过三轴压缩试验表明,“湿”状态下的岩石极限强度只有“干”状态下岩石极限强度的60%~85%。沈荣喜等^[6]对干燥和受压力水作用的碳质页岩进行了三轴流变试验,试验结果表明,与干燥碳质页岩相比,压力水降低了页岩的屈服强度,使页岩的塑性和黏性特征更加明显,也使页岩的轴向应变明显增大。由此可见,岩石“干”、“湿”2种状态

收稿日期:2013-08-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51134018)

作者简介:王 丁(1979—),男,高级工程师.研究方向:地下工程.

http://jsuese.scu.edu.cn

下的长时物理力学特性存在差异性。

高水材料是近年来中国学者研发的一种新型充填材料^[7],广泛应用于地下矿山充填开采过程中的采空区充填,在物理力学性质方面与岩石有很大的相似性,人们对其一般的物理力学性质进行了较充分的研究,但对其在水环境下的蠕变规律缺乏足够的重视,而高水材料在“2 种状态下”的物理力学特性又不同于普通岩石。此外,前人对普通岩石处于“2 种状态下”的物理力学特性研究侧重于试样不同含水率条件下的岩石蠕变试验,未能准确模拟处于真实水环境中工程岩体的蠕变特性,更不能体现处于真实水环境中高水材料的蠕变规律。

高水速凝材料应用于深部充填开采,其长期强度及蠕变稳定性将直接影响采空区的充填效果及地表沉降量。研究在深埋空间上覆地层荷载作用下、地下水环境中的高水速凝材料蠕变特性及对应的流变模型对指导充填开采具有重要的工程实际意义。

1 瞬时物理力学试验

为研究高水速凝材料的体积变化特征,首先对其进行容重测试。测试结果表明:配合后形成的高水速凝材料结石体密度均一,体应变小。含水率测试结果表明:结石体的含水率可高达 85%,材料内部孔隙发育并且含有大量水分。为进一步研究高水速凝材料细部结构,对材料进行了微观电镜扫描(SEM)分析,结果见图 1。

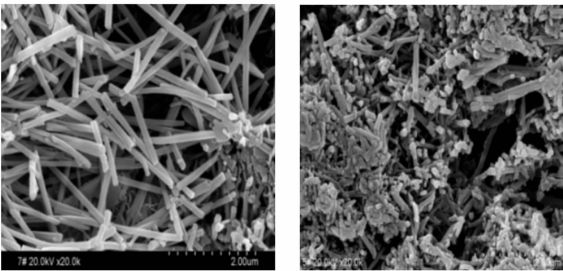


图 1 高水速凝材料 SEM 分析结果

Fig.1 HRM under microscopic scanning

根据物理试验可以得出:高水速凝材料的结构组成均一,可将其视作各向同性材料。材料含水率高,这些水分将是影响材料力学特性的因素之一。材料水理性稳定,水环境养护更利于材料自身结构和承载力的稳定性;而干燥条件下的高水速凝材料可能会因为迅速失水,在结石体内形成大量孔隙和空洞,从而导致材料强度显著降低。

为验证材料的物理性质对其强度的影响,以及确定下一步蠕变试验中荷载级别的设置,利用

MTS815 岩石与混凝土力学实验系统平台进行高水速凝材料的强度试验。试件在不同养护龄期的单轴抗压强度整理值见图 2。从图 2 可以看出,随着养护龄期从 3 d 提高到 7 d,材料单轴强度值不断上升,到 7 d 时达到最大值;然后随着龄期的延长,强度呈下降趋势,15 d 后强度基本趋于定值。

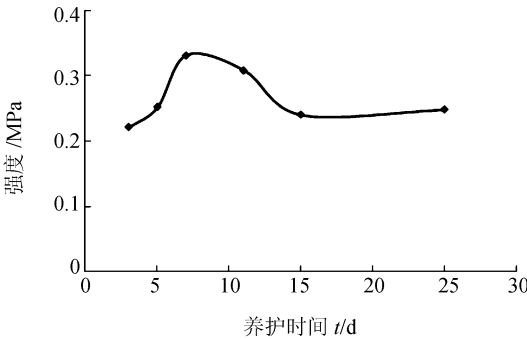


图 2 高水速凝材料强度-龄期曲线

Fig.2 Strength curve of HRM under different ages
龄期为 25 d 的材料强度参数整理成果见表 1。

表 1 高水速凝材料单轴强度参数计算表

Tab.1 Uniaxial strength parameters of HRM

试件编号	峰值荷载 <i>P</i> /N	抗压强度 σ /MPa	弹性模量 <i>E</i> /GPa	泊松比 μ
6-25-1	478	0.246	0.162	0.087
6-25-2	483	0.252	0.154	0.084
6-25-3	470	0.246	0.161	0.085
平均值	477	0.248	0.159	0.085

可以看出,水环境长期养护下的材料单轴抗压强度约为 0.25 MPa,可将高水速凝材料视为一种特殊的“类”软岩材料。SEM 分析显示结石体内部以纤细的枝网状结构为主,且枝柱间距离明显,这也是含水率较高时,材料的强度较低、变形较大的原因。

总结瞬时物理力学试验成果,发现相较于传统软岩遇水软化的特征,高水速凝材料作为一种特殊的“类”软岩材料,在形成结石体并达到其养护要求后材料的体应变和强度变化都较小。此外,高水速凝材料不具有类似石膏等人工合成气硬性材料的普遍特征,材料的抗风干性能差,在开放式环境中使用其强度会显著降低。

2 蠕变试验设置

鉴于高水速凝材料的长期变形特征对充填技术在煤矿开采中的应用及推广有着显著的研究意义,下面将进一步展开真实水环境中高水速凝材料的蠕变试验研究。图 3 为高水速凝材料蠕变试验系统示意图。

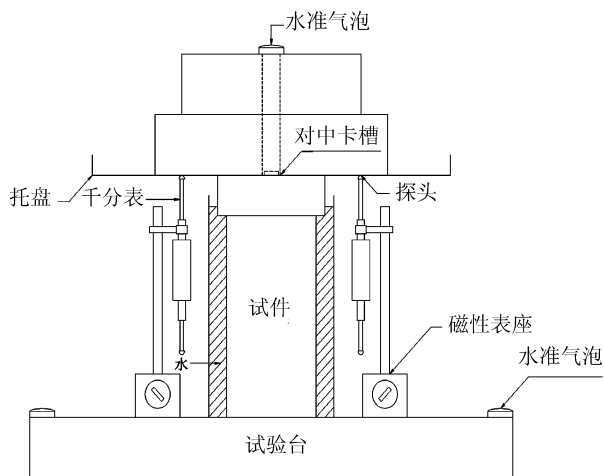


图3 蠕变试验系统示意图

Fig.3 Creep experiment system layout

根据岩石力学试验规范,将高水速凝材料取样后制成 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的标准试件,将试样统一浸水饱和和养护一个月以上,排除龄期条件的干扰。蠕变试验重点研究水环境对高水速凝材料长期强度的影响;另外还设置了一组干燥条件下蠕变试验作为水环境下的对照试验。针对高水速凝材料抗压强度低的特点,选择简单易行、保载稳定的重力连续加载方式。为通过试验确定材料的流变参数以便应用于采矿设计中的数值计算,选择的受力条件明确的单轴压缩试验进行研究。根据试样单轴压缩试验的平均极限强度值,蠕变试验的轴向施力荷载等级分别选定质量为 10 kg(干燥条件)、15 kg(水环境)和 20 kg(水环境)的砝码,对应的应力水平分别为 0.05、0.075 和 0.099 MPa 这 3 个级别。

3 蠕变试验结果分析

整理不同试验条件下的高水速凝材料蠕变试验测量成果,3 组试验曲线对比见图 4 和 5。

对比干燥和饱水条件下的蠕变试验可以发现:不同于普通水硬性材料,高水速凝材料对空气环境相当敏感,干燥状态下的材料长期强度低于饱和状态下的强度。高水速凝材料在水环境的养护作用下,长期强度明显提高。高水速凝材料水理性稳定,材料内部的孔隙基本由结晶水、结合水和少量自由水充满,材料在水环境养护条件下更利于其自身结构和承载力的稳定性。

水环境中高水速凝材料的蠕变规律表明:当材料所受荷载级别未达到其屈服应力时,由于材料具有在饱水状态下保持和发展其结石体强度的水硬性材料特征,水环境的存在起到了养护材料中水化物强度,降低

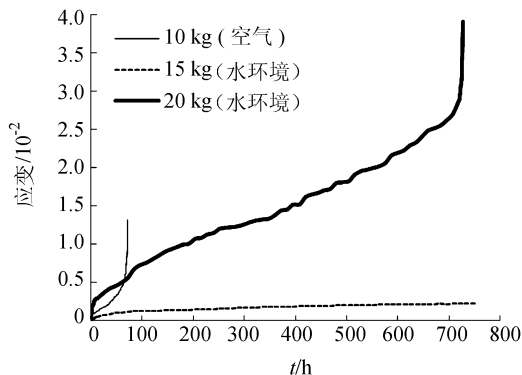


图4 高水速凝材料蠕变试验应变-时间曲线对比

Fig.4 Strain-time curve of HRM under different conditions

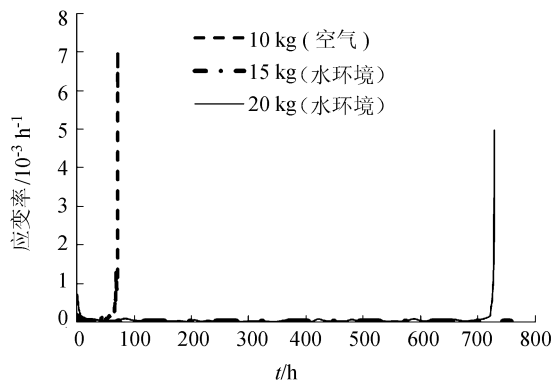


图5 高水速凝材料蠕变试验应变率-时间曲线对比

Fig.5 Strain velocity-time curve of HRM under different conditions

其结构损伤程度、减小蠕变速率和极限蠕变变形量的作用。当材料受到大于其长期强度的荷载作用时,结石体中水化物的结晶水发生压缩断裂,枝网状结构和孔隙通道内的结合水被大量挤出。水在渗流通道内的流动和析出,一方面会加速材料的压缩变形;另一方面由于水的粘滞效应和材料本身亲水性等特点,结石体将发生比干燥条件下蠕变速率更慢,持续时间更长的蠕变过程,最终导致试样在蠕变断裂破坏时的极限蠕变变形量大于空气环境中破坏时的变形量。

4 流变模型研究

为进一步研究高水速凝材料的蠕变特性,下面将根据蠕变试验曲线进行水环境中高水速凝材料的流变模型辨识与参数反演。

4.1 流变模型辨识

假设高水速凝材料均质、各向同性,满足线粘弹性体或线粘弹塑性体的蠕变规律。为更好地拟合不同加载应力水平条件下的蠕变试验曲线,将分别对不同试验下的流变模型参数进行反演。流变模型的参数反演中采用的基本力学参数有:弹性模量 $E =$

221 MPa;泊松比 $\nu = 0.093$;体积模量 $K = 90.5$ MPa。

观察蠕变试验曲线,发现无论是干燥条件还是水环境中,当荷载达到一定应力水平时材料的蠕变速率在整个过程中均不等于 0,蠕变变形量将不断发展增大直至材料发生蠕变断裂破坏。该特点与任意荷载条件下的 Burgers 模型,或者是荷载大于其屈服强度条件下的西原模型特征类似。进一步观察水环境中受 15 kg 荷载作用下的蠕变试验,材料在 100 h 后进入稳态蠕变阶段。而 Burgers 模型和西原模型均有描述稳态蠕变阶段的蠕变方程。因此计划分别选用 Burgers 模型和西原模型对高水速凝材料的不同加载应力水平条件下的蠕变试验曲线进行参数反演,然后判断其流变模型的适用性。

4.2 流变参数反演

Burgers 流变模型是由 Maxwell 模型(M 体)与 Kelvin 模型(K 体)串联而成的元件模型^[8]。单轴压缩条件下的 Burgers 流变模型 1 维蠕变方程为:

$$\varepsilon_1(t) = \frac{\sigma_1}{9K} + \frac{\sigma_1}{3G_M} + \frac{\sigma_1}{3G_K} \times \left[1 - \exp\left(-\frac{G_K}{\eta_K}t\right) \right] + \frac{\sigma_1}{3\eta_M}t$$

(1)

式中, $\varepsilon_1(t)$ 为 t 时刻的轴向应变, σ_1 为轴向应力, K 为体积模量, G_M 和 G_K 分别为 M 体和 K 体的弹性参数, η_M 和 η_K 分别为 M 体和 K 体的粘性参数。

根据蠕变试验的应变-时间曲线,采用回归分析来确定 Burgers 模型中的 4 个流变参数^[9]。表 2 给出了 2 组水环境条件下蠕变试验的 Burgers 模型流变参数反演值。

表 2 Burgers 模型的流变参数反演值

Tab.2 Rheological parameters of Burgers model					
试样编号	σ_1 / MPa	η_M / MPa	G_K / (MPa·h)	η_K / MPa	G_M / (MPa·h)
GS-2	0.074 9	3 120 2	19.32	2 691	14.5
GS-3	0.099 8	1 196	15.39	2 916	88.0

西原模型是岩石流变中常用的 5 元件流变模型,由胡克体、K 体和 Bingham 体串联而成^[10]。单轴压缩条件下的西原流变模型 1 维蠕变方程为^[11]:

$$\begin{cases} \text{当 } \sigma < \sigma_s \text{ 时:} \\ \varepsilon = \frac{\sigma}{E_H} + \frac{\sigma}{E_K} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_K}{\eta_K}t\right) \right]; \\ \text{当 } \sigma \geq \sigma_s \text{ 时:} \\ \varepsilon = \frac{\sigma}{E_H} + \frac{\sigma}{E_K} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_K}{\eta_K}t\right) \right] + \frac{(\sigma - \sigma_s)}{\eta_B}t \end{cases}$$

(2)

式中, σ 和 ε 分别为材料的应力和应变, E_H 和 E_K 分别

为胡克体和 K 体的弹性模量, η_K 和 η_B 分别为 K 体和 Bingham 体的粘性参数, σ_s 为材料的屈服应力。

3 个流变参数 E_K 、 η_K 和 E_H 的确定根据回归分析法^[12-13],流变参数 η_B 通过数值计算工具 MATLAB 来反演。

表 3 给出了西原模型流变参数获取中选用的蠕变试验数据及参数计算结果整理。

表 3 西原模型流变参数的回归计算及反演值整理表

Tab.3 Rheological parameters of Visco-elastoplastic model							
试样编号	σ_1 / MPa	ε_e / 10^{-4}	ε_∞ / 10^{-3}	E_H / MPa	E_K / MPa	η_K / (MPa·h)	η_B / (MPa·h)
GS-2	0.074 9	1.29	2.26	576	35.1	7 805	—
GS-3	0.099 8	10.00	13.32	100	8.1	1 077	843

4.3 流变模型讨论

将 2 种流变模型反演参数代入对应的蠕变方程,得到 Burgers 模型、西原模型拟合曲线与蠕变试验曲线对比,见图 6 和 7。

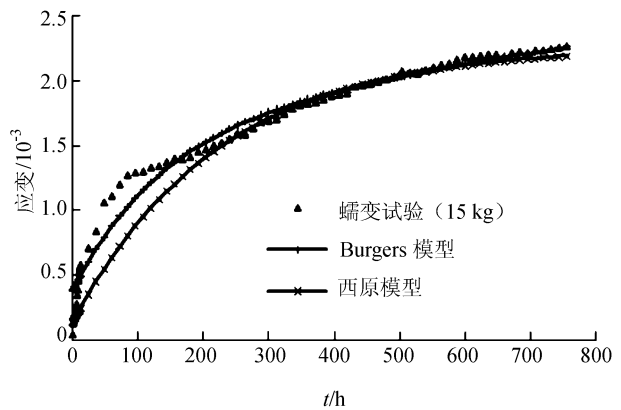


图 6 15 kg 荷载作用下的试验曲线与拟合曲线对比
Fig. 6 Comparison between experiment curve and simulation curve under 15 kg load

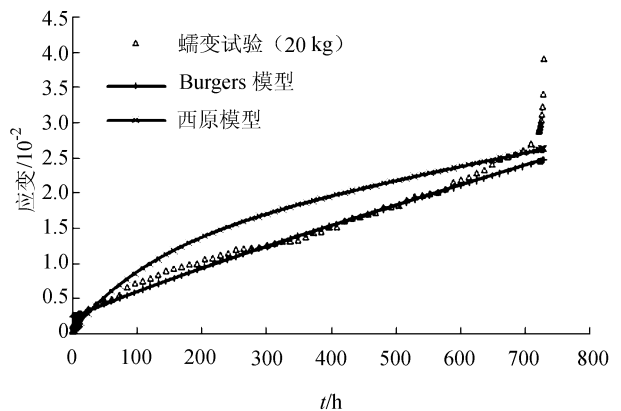


图 7 20 kg 荷载作用下的试验曲线与拟合曲线对比
Fig. 7 Comparison between experiment curve and simulation curve under 20 kg load

分析2种流变模型对水环境中高水速凝材料蠕变试验的适应性,发现相较于西原模型,Burgers在模拟蠕变曲线的拐点处,特别是蠕变试验初始的应变率迅速衰减阶段,以及一期蠕变过渡到二期蠕变的过程中更接近试验观察数据。Burgers模型既反映材料的瞬时弹性变形,又反映了一期衰减蠕变和二期稳态蠕变的粘性流动过程。因此Burgers模型能更好地描述水环境中高水速凝材料的蠕变规律。

可以得出,由于高水速凝材料的亲水性和水硬性,水环境的长期养护提高了该种“类”软岩材料的弹性参数,使材料的初期蠕变小于干燥条件下的材料变形值。然而水也起到粘滞材料结石体中水化物滑动和变形的作用,使材料的粘性参数增大,蠕变过程增长。

5 结 论

1)高水速凝材料对空气环境相当敏感,干燥状态下材料的长期强度低于饱和状态下的强度。由于高水材料具有在饱水状态下保持和发展其结石体强度的水硬性材料特征,水环境起到了加强养护材料中水化物强度,降低其结构损伤程度、减小蠕变速率和极限蠕变变形量的作用。高水速凝材料作为充填体,大多处于“湿”环境下,因此,其作为充填体可以长期有效地控制上覆岩层移动。

2)当高水速凝材料轴向应力未达到其长期强度时,水环境的养护能降低其结构损伤程度和蠕变速率;当受到大于其长期强度的荷载作用时,材料中的结晶水和结合水大量析出并在孔隙中形成渗流,从而加速材料的压缩蠕变。

3)Burgers模型能更好地描述水环境中高水速凝材料这种“类”软岩的蠕变特性。由于高水速凝材料的亲水性和水硬性,水环境的长期养护提高了该种“类”软岩材料的弹性参数,使材料的初期蠕变小于干燥条件下的材料变形值;然而水也起到粘滞材料结石体中水化物滑动和变形的作用,使材料的粘性参数增大,蠕变过程增长。

参考文献:

[1] Zhang Guijin, Yang Songlin. Risk analysis of deep-buried free-flow large-diameter tunnel based on surrounding rock rheology[J]. Hydro-Science and Engineering, 2005(1): 15-22. [张贵金, 杨松林. 深埋大直径无压引水隧洞基于流变的风险分析[J]. 水利水运工程学报, 2005(1): 15-22.]

[2] Wu Shiyong, Ren Xuhua, Chen Xiangrong, et al. Stability analysis and supporting design of surrounding rocks of diversion tunnel for jinping hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 3777-3782. [吴世勇, 任旭华, 陈祥荣, 等. 锦屏二级水电站引水隧洞围岩稳定分析及支护设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3777-3782.]

[3] Miao Xiexing, Yang Chengyong, Chen Zhida. Humidity-stress filed in swelling rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 1993, 14(4): 49-56. [缪协兴, 杨成永, 陈至达. 膨胀岩体中的湿度应力场理论[J]. 岩土力学, 1993, 14(4): 49-55.]

[4] Einstein H. Advice on mud-swelling rock indoor experiment[J]. Rock and Soil Mechanics, 1994, 15(3): 81-93. [Einstein H. 泥质膨胀岩室内试验的建议方法[J]. 岩土力学, 1994, 15(3): 81-93.]

[5] Chang Chandong, Haimson Bezael. Effect of fluid pressure on rock compressive failure in a nearly impermeable crystalline rock: Implication on mechanism of borehole breakouts[J]. Engineering Geology, 2007, 89(3/4): 230-242.

[6] Shen Rongxi, Liu Changwu, Liu Xiaofei. Triaxial rheology characteristics and model of carbonaceous shale in pressure water[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(7): 1031-1034. [沈荣喜, 刘长武, 刘晓斐. 压力水作用下碳质页岩三轴流变特征及模型研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 1031-1034.]

[7] Feng Guangming. Research and application on super-high-water rapid-setting material apply to filling and mining technology[D]. Xu Zhou: China University of Mining and Technology, 2009. [冯光明. 超高水充填材料及其充填开采技术研究与应用[D]. 徐州: 中国矿业大学矿业工程学院, 2009.]

[8] Zhang Zhiliang, Xu Weiya, 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, 1(1): 132-140.

- [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,2011,1(1):132-140.]
- [9] Li Huamin, Li Zhenhua, Su Chengdong. Testing study on creep characteristics of marble [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23 (22): 3745 - 3749. [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 - 3749.]
- [10] Tao Bo, Wu Faquan, Guo Gaihui, et al. Flexibility of Visco-elastoplastic to rheological characteristics of rock and solution of rheological parameter [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (17): 3165 - 3173. [陶波,伍法权,郭改悔,等. 西原模型对岩石流变特性的适应性及其参数确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (17): 3165 - 3173.]
- [11] Wang Honggui, Wei Limin, He Xiaoming. Determination of three-dimensional rheological parameters based on long term oedometer test [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28 (5): 669 - 673. [王宏贵,魏丽敏,赫晓光. 根据长期单向压缩试验结果确定三维流变模型参数[J]. 岩土工程学报, 2006, 28 (5): 669 - 673.]
- [12] Chen Zongji, Kang Wenfa. Locking stress, creep, dilatancy and constitutive equation of rocks [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 10 (4): 299 - 312. [陈宗基,康文法. 岩石的封闭应力、蠕变和扩容及本构方程[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10 (4): 299 - 312.]
- [13] Jiang Yongdong, Xian Xuefu, Xiong Deguo, et al. Study on creep behavior of sandstone and its mechanical models [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27 (12): 1478 - 1481. [姜永东,鲜学福,熊德国,等. 砂岩蠕变特性及蠕变力学模型研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27 (12): 1478 - 1481.]

(编辑 张 琼)