

# 节理岩石剪切流变特性试验与模型研究

徐卫亚, 杨圣奇

(河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 利用岩石剪切流变仪, 对龙滩水电站大型地下洞室群围岩中的无充填节理岩石进行了剪切流变试验, 得到了节理岩石长期抗剪强度参数, 与快速剪切试验获得的短期抗剪强度参数进行比较, 发现长期抗剪强度参数有所降低, 且粘聚力对时间敏感性高于内摩擦角。基于得到的剪切流变试验曲线, 采用五元件粘弹性剪切流变模型对表现为粘弹性流变特性的试验曲线进行了辨识, 获得了节理岩石的粘弹性剪切流变参数。然后将提出的非线性粘塑性体与五元件粘弹性剪切流变模型串联起来, 建立了岩石七元件非线性粘弹塑性剪切流变模型。采用节理岩石加速剪切流变全程曲线, 对七元件非线性粘弹塑性剪切流变模型进行了辨识, 得到了非线性剪切流变模型材料参数, 剪切流变模型与试验结果的比较, 显示出了所建剪切流变模型的正确性与合理性。

**关键词:** 岩石力学; 节理岩石; 剪切流变; 非线性粘塑性体; 流变指数; 非线性粘弹塑性剪切流变模型

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2005)增 2 - 5536 - 07

## EXPERIMENT AND MODELING INVESTIGATION ON SHEAR RHEOLOGICAL PROPERTY OF JOINT ROCK

XU Wei-ya, YANG Sheng-qi

(*Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

**Abstract:** The shear rheology experiment on the shear rheology equipment is carried out for unfilled jointed rock specimens in the surrounding rock mass of a huge underground cave in Longtan hydropower station. The long-term shear strength parameters of jointed rock are gained. Compared with the short-term shear strength parameters gotten by rapid shear experiment, the long-term shear strength parameters have some reduction. What's more, the sensitivity of cohesion on time is higher than that of internal friction angle. Based on the shear rheological curves of joint rock obtained on rock shear rheology equipment, five-component viscoelastic shear rheology model is used to identify the curves that show the viscoelastic rheological properties, and the viscoelastic shear rheological parameters of jointed rock are obtained. Then by connecting nonlinear viscoplastic body(NVPB) put forward by the author and five-component viscoelastic shear rheology model in series, a seven-component nonlinear visco-elastoplastic shear rheology model of rock is constructed. Then by using complete accelerative shear rheological curve of joint rock, the identification of the proposed seven-component nonlinear visco-elastoplastic shear rheology model of rock is carried out. The correlative parameters of nonlinear shear rheology model such as viscoelastic shear modulus and viscosity, etc.. are also gained. The comparison between the shear rheology model and experimental result shows that the proposed non-linear shear rheology model is right and reasonable.

**Key words:** rock mechanics; jointed rock; shear rheology; nonlinear viscoplastic body(NVPB); rheological index; nonlinear visco-elastoplastic shear rheology model

**收稿日期:** 2004 - 11 - 15; **修回日期:** 2005 - 05 - 03

**基金项目:** 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412707)

**作者简介:** 徐卫亚(1962 - ), 男, 博士, 1982年毕业于河海大学, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩石力学与工程方面的教学与研究工作。E-mail: wyxu@hhu.edu.cn.



## 1 引言

节理岩石是岩体工程中常遇到的复杂介质,它具有非均质性、各向异性和非连续性等特点,其强度、变形、破坏以及流变等特性,将直接影响岩体工程的设计、施工、运营、稳定和加固方案。目前,国内外对岩石流变特性的研究已取得了一定的研究成果<sup>[1~7]</sup>,但主要成果集中在岩石材料流变特性的研究方面。而节理岩石的流变特性不同于岩石材料的流变特性,它应该是由节理流变和岩石材料流变两部分组成,且节理流变往往决定于节理岩石的流变。现有文献表明,对节理岩石流变特性的规律很少加以分析,这方面的试验研究成果更是寥寥无几,毋庸置疑,这是目前岩石流变特性研究中的重要缺陷。因而,开展节理岩石流变特性的试验研究,不仅对于分析整个岩体工程的流变特性具有重要的实践意义,而且能为岩石流变特性理论研究和数值分析提供基础。

龙滩水电站位于广西红水河中游峨县境内,是一座以发电为主,兼有防洪以及通航等综合效益的巨型工程。它分两期建设,总库容 273 亿  $\text{m}^3$ ,正常蓄水高程为 400 m,装机容量为  $54 \times 10^6 \text{ kW}$ ,拟建 218 m 高的碾压混凝土重力坝。地下洞室地层主要以砂岩为主,由砂岩、泥板岩互层的中三叠统版纳组岩层构成,进水口开挖边坡为典型的反倾向层状结构岩质边坡。岩体软硬相间,层间错动带发育。受地形剥蚀影响,最大主应力为 6~9 MPa,方向为  $\text{N}20^\circ \sim \text{N}50^\circ$ ,以水平应力为主,侧向压力系数为 1.3~1.6,对开挖边坡稳定有不利影响。

有鉴于此,本文对龙滩水电站大型地下洞室群围岩中的无充填节理岩石进行了剪切流变试验,得到了节理岩石的长期抗剪强度参数,分析了不同正应力下的剪切位移和时间的关系,提出了一个岩石非线性粘弹塑性剪切流变模型,以充分描述节理岩石的加速剪切流变特性。

## 2 剪切流变试验结果

### 2.1 剪切流变试验概况

节理岩石剪切流变试验主要是在直剪流变仪上进行,岩石直剪流变仪的主要结构如图 1 所示。试验采用气液加载方式,由人工操作,避免停电的影响。利用储能器进行稳压,当变形增加而引起压力

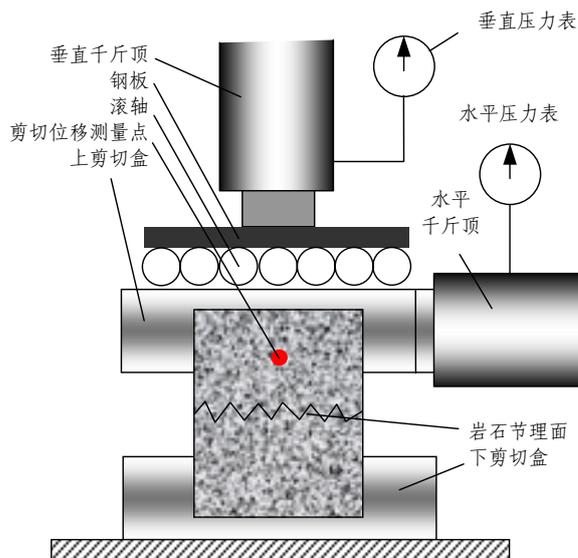


图 1 岩石剪切流变试验装置

Fig.1 Experimental equipment on the shear rheological property of rock

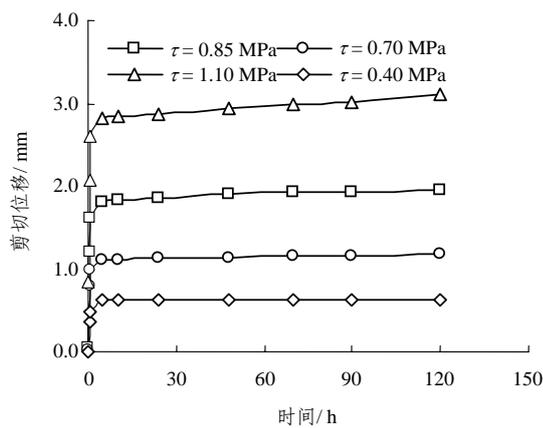
降低时,储能器可起到自动调节补压作用。采用垂直千斤顶对节理岩石施加法向荷载,而采用水平千斤顶对节理岩石施加剪切荷载。含节理面的岩石试样预先用水泥浇筑于剪切盒内,下剪切盒固定在基座上,岩石节理面位于上下剪切盒之间。为了防止剪切盒自由移动,在垂直千斤顶的钢板与上剪切盒之间设置了刚性滚轴。在上剪切盒的中间两侧各设置一个剪切位移测量点,采用千分表测量上剪切盒的位移,即节理面的剪切位移。

现场采集含一条近水平节理面的岩石试样共三块,并进行现场浇注和养护,含节理岩石试样尺寸为  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ ,采集过程中尽量避免扰动节理面。运回实验室后切割成  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  的标准抗剪尺寸。然后浇注到剪切盒内进行剪切流变试验。节理预留在中部,剪切缝为 10 mm 左右。试验过程中尽量保持实验室的恒温恒湿环境,避免周围环境的振动和干扰。根据节理岩石的快速剪切试验结果<sup>[8]</sup>,首先确定出剪切流变试验的正压力和剪切分级荷载。剪切流变试验采用单试样分级加载方法,先对试样施加一恒定的正应力,然后由低到高分级施加长期的剪应力,获得一组不同剪应力水平下的剪位移与时间的关系曲线,各级剪应力历时 5~10 d 左右。

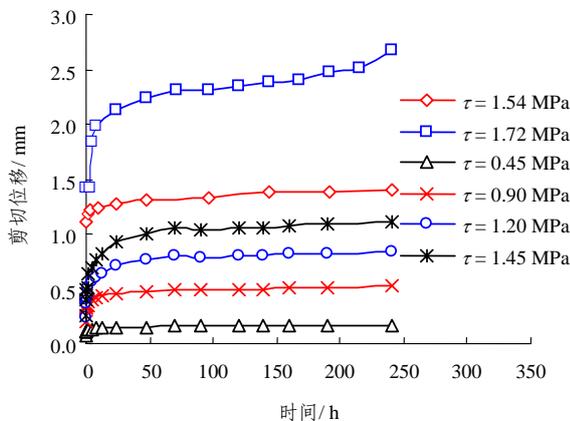
### 2.2 剪切流变试验结果分析

试验节理岩石为泥板岩,其节理面为无充填的硬性结构面。节理岩石典型的剪切流变试验结果,

如图 2 所示，图中标注的数值为剪应力。在正应力恒定的情况下，节理存在瞬时变形，随着剪应力的增加，当剪应力达到某一临界值时，节理从衰减流变阶段过渡到稳定流变阶段，此临界值即为节理的长期剪切强度值。当低于此临界值时，节理能保持长期稳定；而当剪应力高于此临界值时，节理将从稳定流变阶段很快达到加速流变阶段。节理的流变破坏呈剪切流变破坏特征，在流变过程中，构成节理的上下岩块之间以爬坡或啃断的方式产生相对位移，上下岩壁的镶嵌和摩擦将产生较大的粘滞阻力，而克服这种阻力需要一定的应力水平，当剪应力大于这一应力水平时，粘滞阻力将迅速降低，试样在很短时间内出现较大的剪切位移，并很快达到破坏。相对于岩石材料而言，节理岩石的剪切流变破坏表现出明显的瞬时变形特性，且与正应力以及剪应力水平密切相关，正应力水平越高，岩石试样瞬时剪切位移也越大。在恒定的正应力水平下，随着剪应力的增加，节理岩石的瞬时剪切位移也逐渐增大。



(a)  $\sigma = 1.12 \text{ MPa}$



(b)  $\sigma = 2.49 \text{ MPa}$

图 2 节理岩石典型的剪切流变试验曲线

Fig.2 Typical shear rheological experimental curves of jointed rock

Coulomb 准则认为岩石承载的最大剪切应力或者说抗剪强度  $\tau$  是由粘聚力  $c$  和内摩擦力共同确定，后者与内摩擦系数  $\mu$  和正应力  $\sigma$  有关，即

$$\tau = c + \mu\sigma \tag{1}$$

式中： $\mu$  为内摩擦系数， $\mu = \tan \varphi$ ， $\varphi$  为内摩擦角。基于节理岩石不同正应力下快速剪切试验<sup>[8]</sup>和剪切流变试验结果，利用 Coulomb 准则可以得到快速抗剪强度以及长期抗剪强度与正应力之间的线性回归关系曲线，如图 3 所示。由此可见，快速剪切试验下节理岩石的粘聚力为 0.31 MPa，内摩擦角为 43.23°；而剪切流变试验下节理岩石的粘聚力为 0.09 MPa，内摩擦角为 33.4°，分别比快速剪切试验得到的强度参数降低了 71%和 22.7%。因而粘聚力对时间的敏感程度高于内摩擦角，随着时间的逐渐增加，节理岩石的粘聚力衰减得更快。

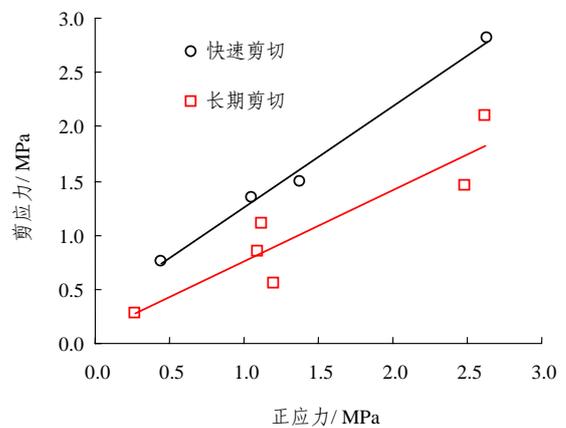


图 3 节理岩石快剪和长期剪切强度分析

Fig.3 Strength analysis of jointed rock by rapid shear and long-term shear

### 3 非线性粘弹塑性剪切流变模型

#### 3.1 五元件粘弹性剪切流变模型

基于获得的不同剪应力水平下节理岩石的流变试验曲线可知，除在破裂剪应力水平，节理岩石表现为典型的粘弹塑性特征以外，在其他剪应力水平，节理岩石均表现为典型的粘弹性特性。由于对出现加速流变阶段的剪切流变曲线进行辨识，采用以往的线性粘弹塑性剪切流变模型，如西原模型，均无法模拟节理岩石的加速剪切流变特性，因而需采用非线性剪切流变模型，关于对有加速流变阶段全程曲线的模型辨识将在节 3.2 中进行详细探讨，本节只对表现为粘弹性质的剪切流变曲线进行辨

识。

描述粘弹性质的剪切流变模型有很多种，如广义 Kelvin 模型或 Burgers 模型等，本文提出采用五元件粘弹性模型(图 4)来对节理岩石的粘弹性剪切流变曲线进行辨识。

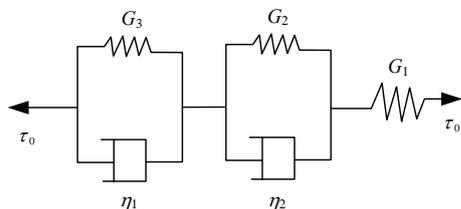


图4 岩石五元件粘弹性剪切流变模型

Fig.4 Five-component viscoelastic shear rheology model of rock

五元件粘弹性剪切流变模型的蠕变方程：

$$u(t) = \left[ \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \left( 1 - e^{-\frac{G_2 t}{\eta_1}} \right) + \frac{1}{G_3} \left( 1 - e^{-\frac{G_3 t}{\eta_2}} \right) \right] \tau_0 \quad (2)$$

式中： $u(t)$ 为岩石总的剪切位移； $t$ 为经过的时间； $G_1$ 为瞬时剪切模量； $G_2$ 和 $G_3$ 均为粘弹性剪切模量； $\eta_1$ 和 $\eta_2$ 均为粘滞系数，表示流变阶段趋向稳定的快慢程度，数值越小，则趋向稳定的时间就越短； $\tau_0$ 为剪应力。

五元件粘弹性剪切流变模型参数求算的方法采用直接迭代法，需要求取5个剪切流变参数： $G_1$ ， $G_2$ ， $G_3$ ， $\eta_1$ 和 $\eta_2$ 。根据试验得到的 $n$ 组数据( $\varepsilon$ ， $t$ )，首先给定一组初始近似值( $G_1^0$ ， $G_2^0$ ， $G_3^0$ ， $\eta_1^0$ ， $\eta_2^0$ )，以此为基础进行迭代，这样反复计算，直到满足所需要的精度，则此时对应的剪切流变参数值，即为

所求。

图5为节理岩石典型的五元件粘弹性剪切流变模型与剪切流变试验结果的对比，正应力为1.12 MPa时对应的剪应力水平为0.8 MPa条件下，五元件粘弹性剪切模型与剪切流变试验结果吻合得很好，表1中详细地给出了节理岩石的粘弹性剪切流变参数。

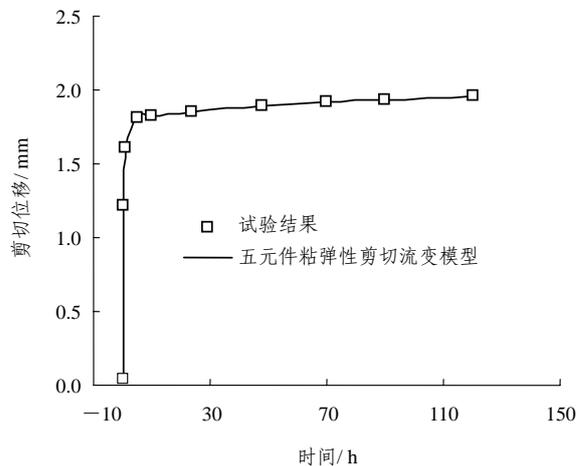


图5 五元件粘弹性剪切流变模型与试验结果的比较  
Fig.5 Comparison between five-component viscoelastic shear rheology model and experimental result

### 3.2 非线性粘弹塑性剪切流变模型

利用节理岩石剪切流变得到的典型加速剪切流变全程曲线，如图6所示。由图6可知，节理岩石加速流变全程曲线可分为如下3个阶段：(1) 初始剪切流变阶段  $OA$ ，在该阶段里节理岩石剪切流变速率很快衰减为某一不为0的恒定值；(2) 稳态剪切流变阶段  $AB$ ，在该阶段内节理岩石剪切流变

表1 节理岩石五元件粘弹性剪切流变模型拟合参数值

Table 1 Rheological parameters based on five-component viscoelastic shear rheology model of jointed rock

正应力 /MPa	剪应力 /MPa	$G_1$ / $(MPa \cdot mm^{-1})$	$G_2$ / $(MPa \cdot mm^{-1})$	$G_3$ / $(MPa \cdot mm^{-1})$	$\eta_1$ / $(MPa \cdot h \cdot mm^{-1})$	$\eta_2$ / $(MPa \cdot h \cdot mm^{-1})$	$R$
1.12	0.40	5.556	1.056	1.228	0.360	1.680	1.000
	0.70	28.902	0.652	8.681	0.264	452.280	1.000
	0.85	23.010	0.480	3.815	0.216	399.384	1.000
	1.10	1.323	1.043	1.043	0.576	0.576	0.992
2.49	0.45	6.143	8.491	11.219	2.880	397.056	0.990
	0.90	4.355	6.391	5.962	104.088	1.416	0.990
	1.20	4.728	4.060	4.554	95.424	3.432	0.997
	1.45	5.200	4.056	3.328	3.720	78.024	0.998
	1.54	1.453	9.406	8.811	8.664	689.112	0.997

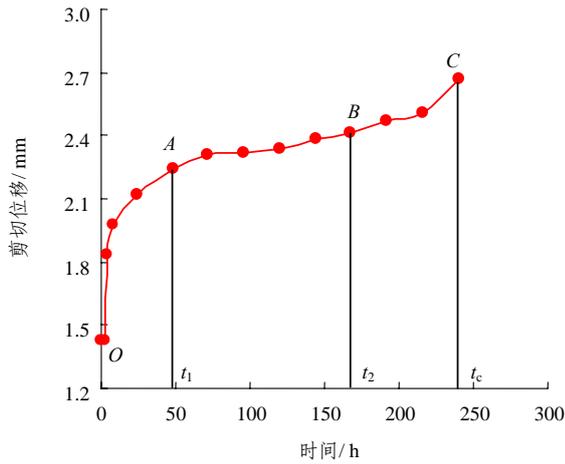


图 6 节理岩石典型的剪切流变全程曲线

Fig.6 Typical shear rheology curve of jointed rock

速率基本保持不变，对应的剪切流变速率称为稳态剪切流变速率；(3) 加速剪切流变阶段 BC，在该阶段内节理岩石剪切流变速率迅速增大，直至节理岩石发生破裂。

图 6 所示为正应力为 2.49 MPa 时对应的剪应力水平为 1.72 MPa 条件下的节理岩石加速剪切流变全程曲线，由图可知，节理岩石剪切流变全程曲线具有如下几个重要特点：(1) 在施加 1.72 MPa 剪应力水平以后，节理岩石立即产生瞬时弹性剪切变形，可知剪切流变模型中应包含弹性元件；(2) 节理岩石剪切位移随时间增加有增大的趋势，可知剪切流变模型中还应包含粘性元件；(3) 剪切位移随时间的增长不收敛于某定值，而是出现加速剪切流变阶段，具有塑性特征。因而，节理岩石的加速流变全程曲线可以用粘弹塑性模型来表征，通常描述岩石粘弹塑性剪切流变模型的有西原模型等，但这些由线性流变元件串并联组合的模型不能充分反映岩石的加速剪切流变特性，为此必须建立非线性粘弹塑性剪切流变模型。

笔者在文[9, 10]中研究绿片岩的三轴压缩流变力学特性时，曾提出一个新的非线性粘性元件，并将其与塑性体并联起来，构成一个新的非线性粘塑性体(nonlinear viscoplastic body)，简称为 NVPB 模型，如图 7 所示，该 NVPB 模型可以充分反映岩石加速流变特性。

图 8 为 NVPB 模型在恒定剪应力  $\tau_0$  作用下的位移与时间的关系，相应的蠕变方程：

$$u(t) = \frac{H(\tau_0 - \tau_s)}{\eta} t_0^{n-1} = \frac{H(\tau_0 - \tau_s)}{\eta} t^n \quad (3)$$

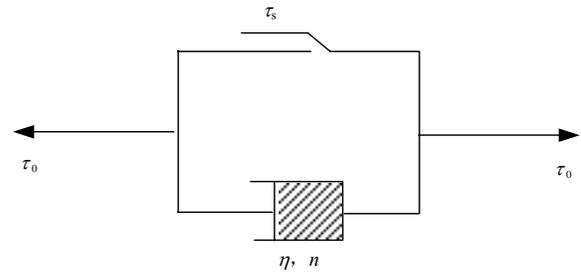


图 7 非线性粘塑性体<sup>[10]</sup>

Fig.7 Nonlinear viscoplastic body (NVPB)<sup>[10]</sup>

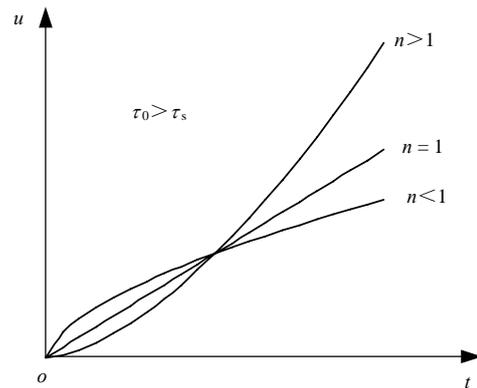


图 8 NVPB 模型的蠕变曲线<sup>[10]</sup>

Fig.8 Creep curves of NVPB model<sup>[10]</sup>

式中： $t_0$  为参考时间，这里取为 1； $\eta$  为粘滞系数，表示剪切流变阶段趋向稳定的快慢程度，数值越小，则趋向稳定的时间就越短； $n$  为流变指数，反映岩石加速剪切流变速率的快慢程度； $\tau_s$  为屈服剪应力或长期抗剪强度， $H$  可用下式所示：

$$H(\tau_0 - \tau_s) = \begin{cases} 0 & (\tau_0 \leq \tau_s) \\ \tau_0 - \tau_s & (\tau_0 > \tau_s) \end{cases} \quad (4)$$

由式(3)和图 8 可知：当  $n = 1$  时，NVPB 模型的蠕变方程退化为西原模型中塑性体和粘性体的并联组合，此时剪切位移与时间为线性关系；但当  $n \neq 1$  时，此时剪切位移与时间的关系为非线性；当  $n < 1$  时，随着时间的增长，剪切位移速率逐渐减小；而当  $n > 1$  时，随着时间的增长，剪切位移速率逐渐增大。因而通过 NVPB 模型中流变指数  $n$  的变化，NVPB 模型不仅能将西原模型中的塑性体和粘性体并联组合包括进去，而且能充分反映岩石的加速剪切流变特性，所以可以用于描述岩石剪切流变全程曲线。

前述分析已表明，采用五元件粘弹性剪切流变

模型对低剪应力和较高剪应力水平时的节理岩石粘弹性剪切流变曲线进行拟合, 发现该模型能很好地描述节理岩石的粘弹性剪切流变力学特性, 为此, 本文将 NVPB 模型与图 4 的五元件粘弹性剪切流变模型串联起来, 得到一个能充分反映加速剪切流变阶段的岩石七元件非线性粘弹塑性剪切流变模型, 如图 9 所示。

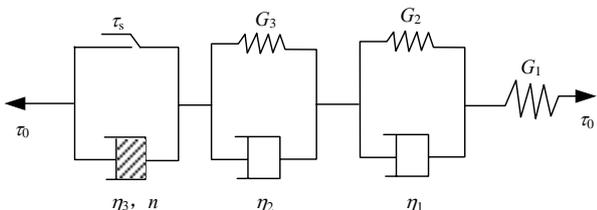


图 9 节理岩石七元件非线性粘弹塑性剪切流变模型  
Fig.9 Seven-component nonlinear visco-elasto-plastic shear rheology model of jointed rock

该七元件非线性粘弹塑性剪切流变模型的蠕变方程分两种情况, 即

当  $\tau_0 \leq \tau_s$  时,

$$u = \left[ \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \left( 1 - e^{-\frac{G_2 t}{\eta_1}} \right) + \frac{1}{G_3} \left( 1 - e^{-\frac{G_3 t}{\eta_2}} \right) \right] \tau_0 \quad (5)$$

当  $\tau_0 > \tau_s$  时,

$$u = \left[ \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \left( 1 - e^{-\frac{G_2 t}{\eta_1}} \right) + \frac{1}{G_3} \left( 1 - e^{-\frac{G_3 t}{\eta_2}} \right) \right] \tau_0 + \frac{\tau_0 - \tau_s}{\eta_3} t^n \quad (6)$$

很显然, 当  $\tau_0 \leq \tau_s$  时, 模型退化为图 4 所示的五元件粘弹性剪切流变模型, 此时可描述节理岩石的粘弹性质; 而当  $\tau_0 > \tau_s$  时, 模型即为非线性粘弹塑性剪切流变模型, 可描述出现加速剪切流变的粘弹塑性性质。

### 3.3 非线性剪切流变模型参数的确定与验证

在剪应力小于节理岩石长期抗剪强度的五元件粘弹性剪切流变模型的求解方法, 采用直接迭代法, 前面已经对此作了详细介绍, 这里主要讨论剪应力大于节理岩石长期抗剪强度的七元件非线性粘弹塑性剪切流变模型的求解方法。对图 6 所示的粘弹塑性剪切流变全程曲线而言, 不能直接采用迭代法求解, 其剪切流变模型参数求解方法如下所述。首先利用节理岩石在  $(0, t_2)$  时段内的剪切流变试验数据, 采用直接迭代法, 对五元件粘弹性剪切流变

模型进行求解, 这样可求得 5 个剪切流变参数, 即  $G_1, G_2, G_3, \eta_1$  和  $\eta_2$ , 然后利用得到的五元件粘弹性剪切流变模型, 求出在  $(t_2, t_c)$  时段内节理岩石位移的粘弹性理论解, 这里的  $t_2$  为从稳态流变向加速流变过渡的起始时刻, 对图 6 节理岩石的剪切流变全程曲线而言,  $t_2$  为 168 h, 而  $t_c$  为流变破坏时间, 为 240 h, 通过找出在  $(t_2, t_c)$  时段内的试验值与粘弹性理论解差值的  $m$  对剪切位移数据, 再通过最小二乘法对  $m$  对剪切位移数据与相对应的时间  $t$  进行幂律回归分析, 即可求得 NVPB 模型的剪切流变参数  $\eta_3$  和  $n$ 。至此, 7 个节理岩石的剪切流变参数已经全部得到, 代入到式(5), 即可得到节理岩石七元件非线性粘弹塑性剪切流变模型。采用上述方法求解得到的七元件非线性粘弹塑性模型剪切流变参数如表 2 所示。

表 2 节理岩石非线性粘弹塑性剪切流变模型参数  
Table 2 Nonlinear visco-elasto-plastic shear rheology model parameters of jointed rock

$G_1$ /(MPa · mm <sup>-1</sup> )	$G_2$ /(MPa · mm <sup>-1</sup> )	$G_3$ /(MPa · mm <sup>-1</sup> )	$\eta_1$ /(MPa · h · mm <sup>-1</sup> )	$\eta_2$ /(MPa · h · mm <sup>-1</sup> )	$\eta_3$ /(MPa · h · mm <sup>-1</sup> )	$n$
1.329	2.154	4.318	11.496	478.200	$1.133 \times 10^{15}$	6.33

图 10 给出了得到的出现加速剪切流变的全程试验结果与建立的非线性粘弹塑性剪切流变模型的对比。由图 10 可见, 节理岩石七元件非线性粘弹塑性剪切流变模型与试验结果吻合得相当理想, 这表明本文所建七元件非线性粘弹塑性剪切流变模型的正确性与合理性。

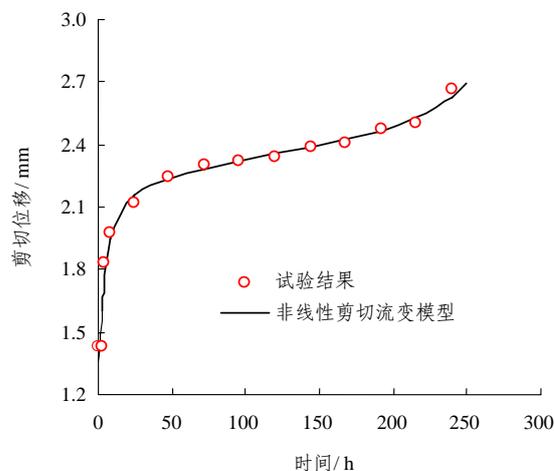


图 10 节理岩石非线性剪切流变模型与试验结果的对比  
Fig.10 Comparison between nonlinear shear rheology model and experimental result of jointed rock

图 11 讨论了提出的 NVPB 模型流变指数  $n$  的变化对剪切流变全过程曲线的影响规律, 图中用于敏感性分析的其他剪切流变参数均与表 2 中所列的等同, 所不同的只是流变指数  $n$  的变化, 由图 11 可见, 随着流变指数  $n$  的增加, 节理岩石剪切流变全过程曲线逐渐由粘弹性向粘弹塑性过渡, 剪切流变理论曲线充分反映了节理岩石的加速剪切流变特性。因而本文七元非线性粘弹塑性剪切流变模型可以清楚描述节理岩石的加速剪切流变阶段, 而且剪切流变参数的确定不很复杂, 对其他节理岩石所建剪切流变模型同样适用, 具有着重要推广价值。

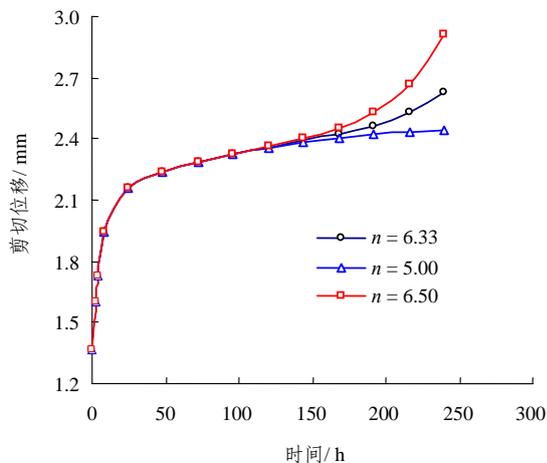


图 11 流变指数对剪切流变全过程曲线的影响

Fig.11 Effect of rheological index on complete curve of shear rheology of joint rock

## 4 结 论

利用岩石剪切流变仪, 对节理岩石剪切流变特性进行了试验和模型研究, 主要结论如下:

(1) 节理岩石剪切流变试验得到的粘聚力和内摩擦角分别比快速剪切试验获得的数值降低了 71% 和 22.7%。而且节理岩石粘聚力对时间的敏感性高于内摩擦角。

(2) 节理岩石具有明显的瞬态变形, 且与正应力以及剪应力水平密切相关。正应力水平越高, 岩样瞬时剪切位移也越大。在恒定的正应力水平, 随着剪应力的增加, 节理岩石的瞬时剪切位移也逐渐增大。

(3) 基于在岩石剪切流变仪上得到的节理岩石的剪切流变全过程曲线, 可以发现节理岩石在破裂剪应力水平时具有很强的流变性, 其剪切流变变形包括瞬时弹性变形、粘弹性变形和粘塑性变形等多种成分。

(4) 采用建立的岩石七元非线性粘弹塑性剪切流变模型对节理岩石剪切流变全过程曲线进行了成功辨识, 得到了节理岩石七元非线性粘弹塑性剪切流变模型参数, 剪切流变模型曲线与试验结果的比较, 显示了所建剪切流变模型的正确性与合理性。

(5) 所建立的岩石非线性粘弹塑性剪切流变模型, 只要恰当地确定其力学参数, 亦可望用于其他类岩石的剪切流变力学分析, 因而具有较为广泛的应用价值。

## 参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] Yang C H, Daemen J J K, Yin J H. Experimental investigation of creep behavior of salt rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(2): 233 - 242.
- [3] Fujii Y, Kiyama T, Ishijima Y, et al. Circumferential strain behavior during creep tests of brittle rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(3): 323 - 337.
- [4] Li Y S, Xia C H. Time-dependent tests on intact rocks in uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(3): 467 - 475.
- [5] Shao J F, Zhu Q Z, Su K. Modeling of creep in rock materials in terms of material degradation[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(7): 549 - 555.
- [6] Cristescu N, Hunche U. Time Effects in Rock Mechanics[M]. West Susan: John Willey and Sons, 1998.
- [7] 巫德斌, 徐卫亚, 朱珍德, 等. 泥板岩流变试验与粘弹性本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1 242 - 1 246.(Wu Debin, Xu Weiya, Zhu Zhende, et al. Study on rheological test and viscoelastic constitutive model for shale[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1 242 - 1 246.(in Chinese))
- [8] 徐卫亚, 杨松林, 朱珍德, 等. 龙滩水电站地下洞室群围岩流变研究报告[R]. 南京: 河海大学, 2003.(Xu Weiya, Yang Songlin, Zhu Zhende, et al. Investigation report of the rheological properties on the surrounding rock mass of a huge underground cave in Longtan hydropower station[R]. Nanjing: Hohai University, 2003.(in Chinese))
- [9] 徐卫亚, 杨圣奇, 杨松林, 等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究(I): 试验结果[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 531 - 537.(Xu Weiya, Yang Shengqi, Yang Songlin, et al. Investigation on the triaxial rheological mechanical properties of greenschist specimen(I): experimental results[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 531 - 537.(in Chinese))
- [10] 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 the triaxial rheological mechanical properties of greenschist specimen(II): model analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(5): 693 - 698.(in Chinese))