

不同围岩级别凝灰熔岩剪切流变特性的试验研究

刘学增^{1, 2, 3}, 苏京伟^{1, 2}, 王晓彤^{1, 2, 3}

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 上海同岩土工程科技有限公司, 上海 200092)

摘要: 结合深圳莲盐高速公路隧道围岩中的 II~V 级凝灰熔岩进行了双轴剪切流变试验, 通过试验结果分析和模型辨识, 得到不同围岩级别凝灰熔岩的剪切流变规律和流变模型。II, III 级围岩采用广义 Kelvin 模型, IV 级围岩采用伯格斯模型, V 级凝灰熔岩采用非线性流变模型, 可以较好地模拟围岩的流变特性; II, III, IV 级围岩主要以脆性破坏为主, V 级围岩则以塑性破坏为主; 试验还得到了 II~V 级凝灰熔岩的剪切流变参数; 并通过对试验结果与不同级别围岩剪切流变模型的对比分析, 进一步验证了流变模型的合理性。

关键词: 岩石力学; 凝灰熔岩; 剪切流变; 围岩级别; 模型辨识

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)01 - 0190 - 08

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON SHEAR RHEOLOGICAL PROPERTIES OF TUFLAVA WITH DIFFERENT GRADES

LIU Xuezheng^{1, 2, 3}, SU Jingwei^{1, 2}, WANG Xiaoxing^{1, 2, 3}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Tongyan Civil Engineering Technology Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: The biaxial shear rheological experiment on tuflava with grades II - V is carried out with tunnel surrounding rock of Shenzhen Lianyan Highway. Through analysis of test results and model identification, the shear rheological law of surrounding rocks different grades is discussed; and the rheological models are proposed. II and III grades of surrounding rocks can be simulated reasonably with generalized Kelvin model, as grade IV with Burgers model and V with nonlinear rheology model. The failure behaviors of surrounding rock with grades II and III are brittle fracture; and the failure behaviors of grades IV and V are plastic yielded. Rheological model parameters of surrounding rocks with different grades are gotten; besides, the comparison between the shear rheology model and experimental results shows that the proposed shear rheology model is reasonable.

Key words: rock mechanics; tuflava; shear rheology; surrounding rock grade; model identification

1 引言

目前, 国内学者对不同岩石的流变特性与模型

辨识方面开展了深入研究, 并取得了研究成果。单轴蠕变试验方面, B. Amadei 和 J. H. Curran^[1]进行了一系列的三轴和剪切流变试验, 试验岩石包括花岗岩、砂岩、石灰岩以及大理岩。S. Okubo 等^[2]

收稿日期: 2008 - 07 - 26; **修回日期:** 2008 - 10 - 13

作者简介: 刘学增(1971 -), 男, 博士, 1995年毕业于山东矿业学院, 2001年于同济大学结构工程专业获博士学位, 2003年于日本早稻田大学博士后出站, 现任高级工程师, 主要从事岩土工程监测、检测技术与信息化施工、反演分析理论方面的研究工作。E-mail: xuezhengL@263.net

利用自行研制的具有伺服控制系统的刚性试验机上完成了大理岩、砂岩、安山岩、凝灰岩和花岗岩的单轴压缩曲线的全过程测试。李永盛^[3]对粉砂岩、大理岩、红砂岩和泥岩 4 种不同岩性的岩石进行了单轴压缩条件下的蠕变和松弛试验。Y. Fuji 等^[4]对 Inada 花岗岩和 Kamisunagawa 砂岩进行了三轴蠕变试验, 分析了轴向应变、横向应变和体积应变 3 种蠕变曲线。刘光廷等^[5]利用岩石双轴流变试验机, 对砾岩进行了多轴流变试验研究, 探讨了干燥和饱水 2 种状态下以及不同侧压下砾岩的流变力学特性。杨圣奇等^[6]对饱和状态下坚硬大理岩和绿片岩进行了三轴压缩流变试验。范庆忠和高延法^[7]利用重力加载式三轴流变仪, 在低围压条件下对龙口矿区含油泥岩的蠕变特性进行了三轴压缩蠕变试验研究。

近几十年来剪切流变的研究也取得了不少成果, 比如 W. R. Wawersik^[8]采用三轴流变仪对圆柱体花岗岩试样进行了剪切流变试验。孙 钧等^[9]对 3 种不同情况下的天然节理面和混凝土模型材料中的人工节理面进行了直剪蠕变试验。陈沅江等^[10]对湖南某煤矿砂岩结构面进行了压剪蠕变试验。沈明荣和朱根桥^[11]通过规则齿形结构面在双轴应力条件下的蠕变试验, 结合双面直推式剪切流变仪对锦屏电站的绿片岩结构面进行了剪切流变试验。熊诗湖等^[12]在三峡工程坝址试验洞内开展岩体剪切蠕变试验。杨圣奇等^[13]利用直剪流变仪对龙滩水电站的节理岩石进行了剪切流变试验。

在地下工程中, 由于风化程度的不同, 同一岩石, 强度等参数也有较大差别, 不同围岩级别同一岩性材料的流变特性有很大差异, 而此方面的研究甚少, 为此, 开展不同围岩级别同一岩性的流变特性试验研究, 不仅对研究地下工程围岩的时空效应具有实际意义, 而且为围岩流变特性的理论研究和数值模拟分析提供借鉴, 同时可以指导地下工程建设。

下面结合深圳莲盐高速隧道围岩地质情况, 对隧道不同围岩级别的凝灰熔岩进行双轴剪切流变试验。

2 II~V 级凝灰熔岩剪切流变试验

2.1 试验岩样简介

剪切流变试验的岩性为凝灰熔岩, 凝灰熔岩是

由熔离条状体组成的流动构造和大量碎裂状晶屑所组成的连续不等粒碎屑结构, 它有别于喷溢作用所形成的熔岩; 不含玻屑、浮岩屑、火山岩的火山碎屑物质、大小不等、形态各异的熔离条状体被熔岩物质胶结而成, 是熔岩与火山碎屑岩之间的一种过渡性岩类。按照勘察资料, II~V 级围岩的区分按照规范^[14]及表 1 确认围岩分级, 在此基础上进行取样试验。

表 1 围岩基本物理力学参数

Table 1 Basic physico-mechanical parameters of surrounding rock

围岩级别	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$\phi/(\text{°})$	c/MPa	E/GPa	ν
II	>26.5	60~50	2.1~1.5	30.0~20.0	0.20~0.25
III	26.5~24.5	50~39	1.5~0.7	25.0~6.0	0.25~3.00
IV	24.5~22.5	39~27	0.7~0.2	6.0~1.3	0.30~0.35
V	<22.5	<27	<0.2	<1.3	>0.35

2.2 剪切流变试验概况

剪切流变试验在双轴流变试验机上进行, 如图 1 所示。试验岩样尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 立方体, 岩样端面与侧面的平整度控制在 0.0003 cm 范围以内, 试验的环境温度控制在 $(20 \pm 3) \text{ °C}$ 。



图 1 剪切流变试验装置

Fig.1 Equipment for shear rheological experiment

加载方案: 首先确定剪切流变试验的正压力和剪应力加载等级, 分级加载; 先对岩样施加恒定的正应力, 然后由低到高分级施加剪应力, 获得一组

不同剪应力水平下的蠕变曲线，每级荷载的加压时间根据岩样的蠕变速率确定，当在某级荷载作用下的蠕变速率小于某一值时，就施加下一级荷载，直至岩样破坏。

剪切试验步骤：(1) 首先施加正应力，待正向变形稳定后施加剪应力；(2) 剪应力分 3~5 级加载，直至岩样破坏；(3) 每施加一级荷载时，每隔一定的时间读取数据一次；(4) 变形稳定的标准是剪切位移速率小于 5×10^{-4} mm/d；(5) 待岩样即将破坏时应小心加载，以免施加荷载过大使岩样突然破坏。

2.3 试验结果分析

本次试验共进行 6 组试验，其中 II 级围岩(编号 II-1, II-2)和 V 级围岩(编号 V-1, V-2)各 2 组试验，III 和 IV 级围岩各 1 组(编号 III-1, IV-1)。采用多次加载的方法，先施加一定水平的正应力，在蠕变已处于稳定阶段后，再增加剪应力，加载应力水平见表 2。围岩剪切流变试验曲线见图 2。

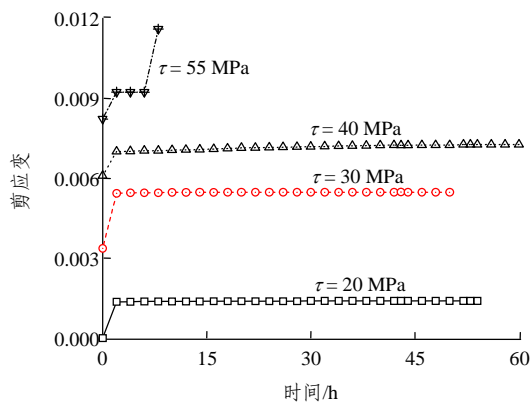
从 II, III 级围岩和 IV 级围岩岩样的蠕变试验曲线可以看出：蠕变过程有过渡蠕变阶段，在低应

表 2 凝灰熔岩试件加载应力水平

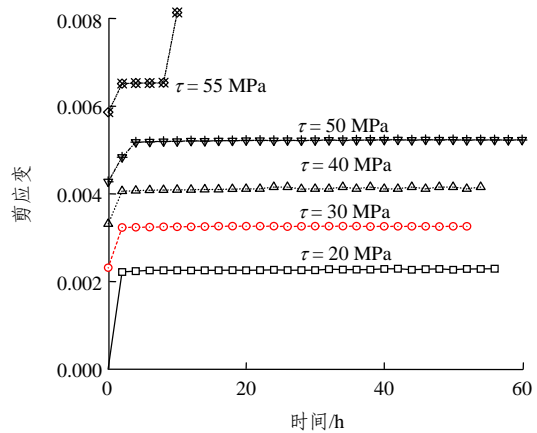
Table 2 Loading levels of tuflava rock specimen

岩样编号	正应力/MPa	剪应力/MPa
II-1	20.0	20, 30, 40, 55
II-2	30.0	20, 30, 40, 50, 55
III-1	20.0	20, 30, 40, 50, 55
IV-1	10.0	20, 30, 40, 50, 55
V-1	7.5	5, 15, 30, 40
V-2	15.0	15, 25, 40, 50

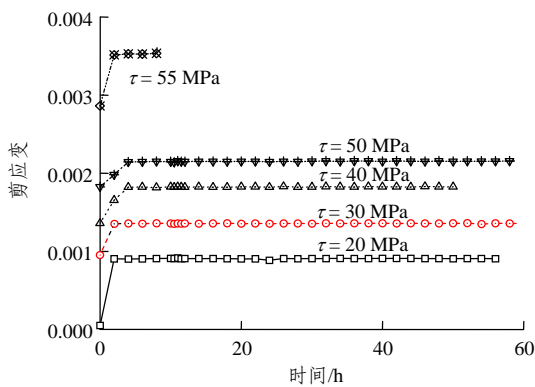
力水平都有一个稳定的过程，随着剪应力水平的提高，岩样出现脆性破坏，但是 IV 级围岩在最后一个剪应力水平已具有定常蠕变的特点；而 V 级围岩在剪应力加载到一定水平出现明显的加速蠕变过程，直至岩样破坏；表明了 V 级围岩与 II, III, IV 级围岩的破坏形式不同，II, III, IV 级围岩主要表现为变形较小情况下脆性破坏，V 级围岩主要表现为塑性破坏，具有明显的加速蠕变特点，岩样 V-1, V-2 在剪应力分别大于 40, 50 MPa 时出现明显的



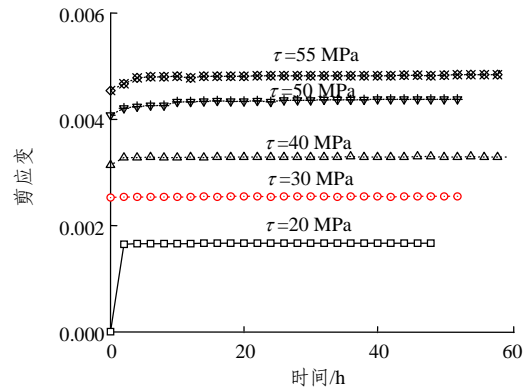
(a) II-1



(b) II-2



(c) III-1



(d) IV-1

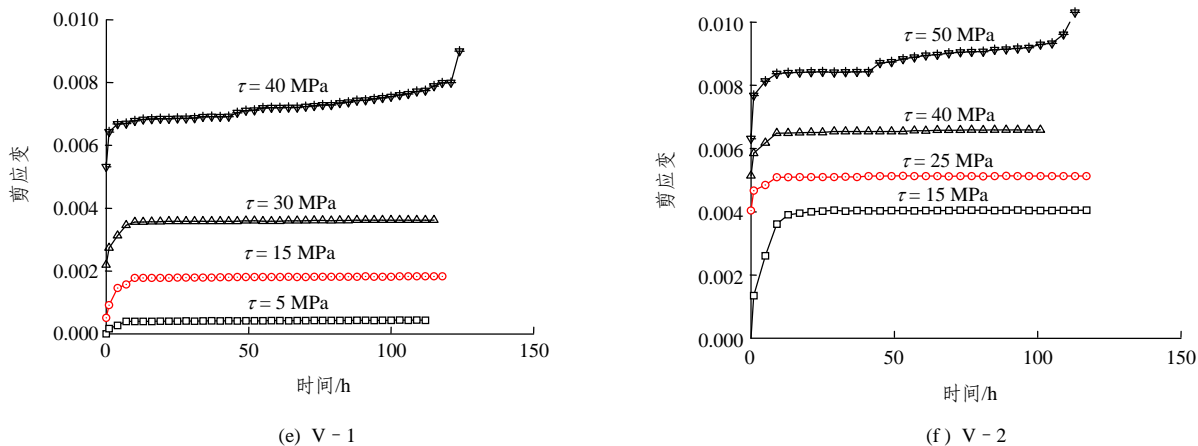


图 2 围岩剪切流变试验曲线

Fig.2 Shear rheological experimental curves of surrounding rocks

加速蠕变过程。

3 不同级别凝灰熔岩剪切流变模型辨识

3.1 II, III 级围岩

根据试验得到的 II, III 级凝灰熔岩的试验曲线, 选用广义 Kelvin 模型^[15]对其进行拟合分析, 其模型如图 3 所示。

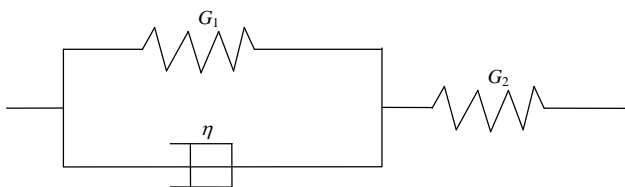


图 3 广义 Kelvin 模型

Fig.3 Generalized Kelvin model

应力 - 应变 - 时间关系为

$$\varepsilon(t) = \frac{\tau}{G_1} + \frac{\tau}{G_2}(1 - e^{-G_2 t / \eta}) \quad (1)$$

当 $t=0$ 时, $\varepsilon^e = \tau / G_1$ (ε^e) 为瞬时应变值; 当 $t \rightarrow$

∞ 时, $\varepsilon_\infty = \frac{\tau}{G_1} + \frac{\tau}{G_2}$ 。

通过对岩样不同剪应力水平下的广义 Kelvin 模型模型辨识, 可以得到 II, III 级围岩蠕变参数, 如表 3 所示。

从图 4, 5 可以看出, 试验曲线和广义 Kelvin 模型曲线比较吻合, 误差较小, 因此, 广义 Kelvin 模型可以很好地模拟 II, III 级围岩凝灰熔岩的流变

表 3 广义 Kelvin 模型拟合参数

Table 3 Fitting parameters of generalized Kelvin model

岩样编号	正应力 /MPa	剪应力 /MPa	G_1 /MPa	G_2 /MPa	η /(MPa · h)
II - 1	20.0	20	1.2×10^5	1.6×10^4	8.0×10^3
		30	8.9×10^3	1.4×10^4	7.1×10^3
		40	6.5×10^3	3.7×10^4	5.5×10^4
II - 2	30.0	20	2.3×10^6	8.8×10^3	5.2×10^3
		30	1.3×10^4	3.2×10^4	1.7×10^4
		40	1.2×10^4	4.9×10^4	4.0×10^4
III - 1	20.0	50	1.1×10^4	5.2×10^4	1.0×10^5
		20	4.0×10^5	2.3×10^4	8.1×10^3
		30	3.2×10^4	7.4×10^4	3.2×10^4
		40	3.0×10^4	8.5×10^4	1.4×10^5
		50	2.7×10^4	1.5×10^5	3.2×10^5

特性。

3.2 IV 级围岩

分析 IV 级围岩凝灰熔岩的剪切流变试验的变形特点, 拟用伯格模型^[15, 16]模拟分析, 伯格模型如图 6 所示。

应力 - 应变 - 时间关系式为

$$\varepsilon(t) = \frac{\tau}{G_m} + \frac{\tau}{\eta_m} t + \frac{\tau}{G_k}(1 - e^{-G_k t / \eta_k}) \quad (2)$$

当 $t=0$ 时, $\varepsilon^e = \tau / G_m$, 由于 ε^e 为瞬时应变值可直接由加载瞬间的读数求得, 为已知, 即可求得参数 G_m 。对岩石试样的流变力学模型进行拟合

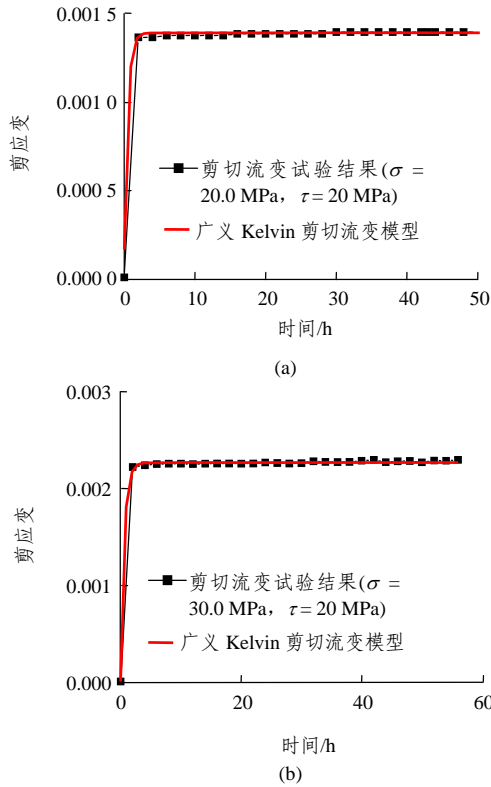


图4 II级围岩剪切流变试验与广义 Kelvin 模型的对比
Fig.4 Comparison between shear rheological experimental results of II-grade surrounding rock and generalized Kelvin model

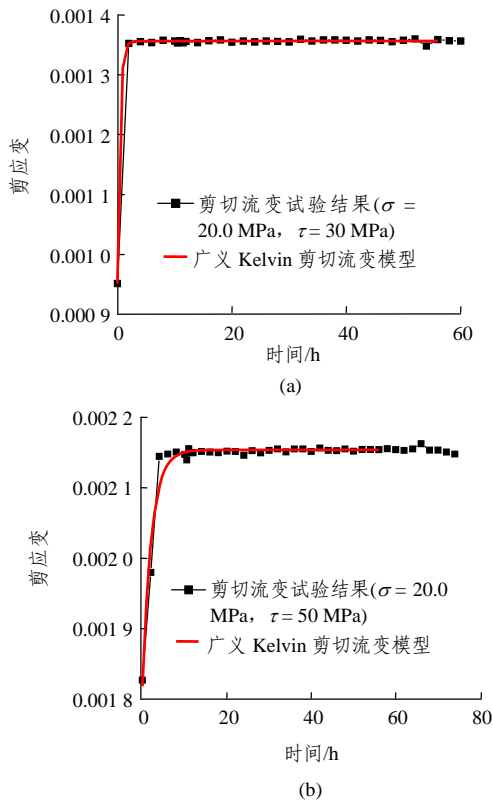


图5 III级围岩剪切流变试验曲线与广义 Kelvin 模型的对比
Fig.5 Comparison between shear rheological experimental results of III-grade surrounding rock and generalized Kelvin model

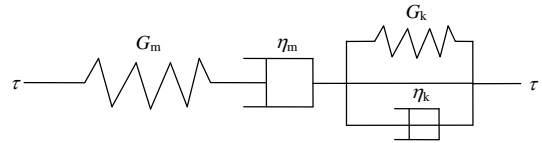


图6 伯格模型
Fig.6 Burgers model

得到岩石试样蠕变参数，如表 4 所示。根据所得模型参数得到伯格模型的流变曲线，如图 7 所示。

表 4 伯格模型拟合参数
Table 4 Fitting parameters of Burgers model

岩样编号	σ /MPa	τ /MPa	G_m /MPa	η_m /(MPa·h)	G_k /(MPa)	η_k /(MPa·h)
IV - 1	10.0	20	2.7×10^7	2.5×10^8	3.3×10^4	1.4×10^4
		30	1.2×10^4	4.3×10^8	2.1×10^6	1.8×10^8
		40	1.3×10^4	2.1×10^8	2.8×10^5	1.6×10^5
		50	1.3×10^4	4.1×10^7	2.2×10^5	9.3×10^5

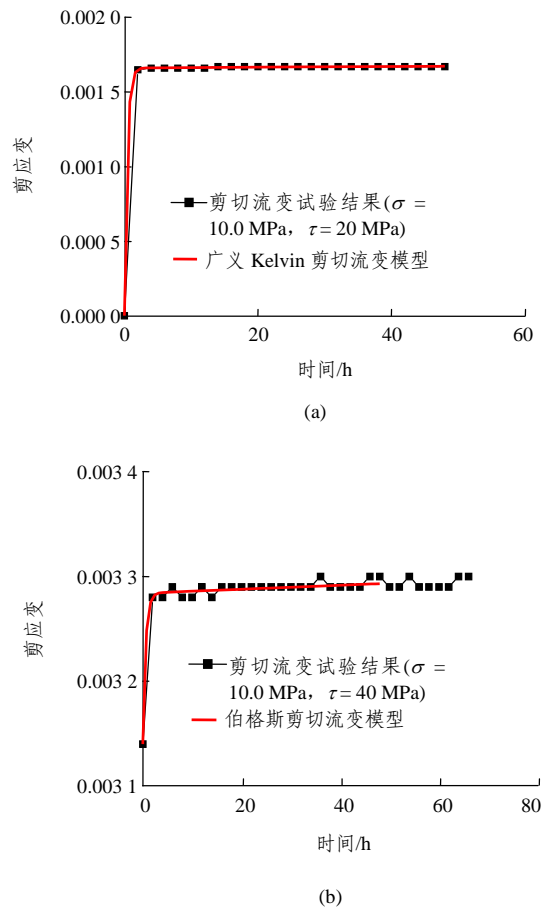


图7 IV级围岩剪切流变试验曲线与伯格模型的对比
Fig.7 Comparison between shear rheological experimental results of IV-grade surrounding rock and Burgers model

3.3 V 级围岩

很多学者^[10, 13, 17, 18]为模拟围岩的加速蠕变建立了许多本构模型, 为了模拟 V 级凝灰熔岩加速蠕变的特点, 经过仔细分析, 采用非线性流变元件 NRC 模型模拟加速蠕变特性^[13]。应力 - 应变 - 时间关系式为

$$\varepsilon(t) = \frac{\tau}{G} \left[1 - e^{-\frac{H(t-t_2)}{t_c-t_2}} \right] \quad (3)$$

式中: G , n 均为流变参数; t_2 为从剪切流变向加速剪切流变过渡的起始时刻; t_c 为剪切流变破坏时间; $H(t-t_2)$ 可表示为

$$H(t-t_2) = \begin{cases} 0 & (t \leq t_2) \\ t-t_2 & (t > t_2) \end{cases} \quad (4)$$

V 级围岩流变过程是弹性、黏性、塑性多种变形共存的一个复杂过程, 因而, 采用多种元件(线性和非线性元件)的组合来模拟其流变特性, 如图 8 所示。

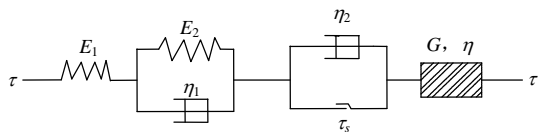
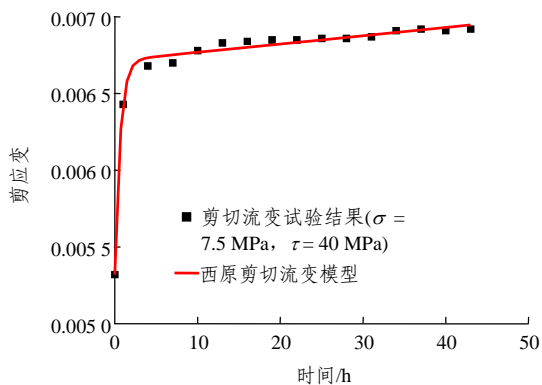


图 8 非线性黏弹塑性剪切流变模型

Fig.8 Nonlinear visco-elastoplastic shear rheological model

本文采用非线性流变元件(NRC 模型)与西原模型的串联组合来模拟 V 级围岩凝灰熔岩的流变特性, 剪切流变模型的应力 - 应变关系分如下 2 种情况:

- (1) 当 $\tau_0 \leq \tau_s$ 时, 流变模型为广义 Kelvin 模型;
- (2) 当 $\tau_0 > \tau_s$, $t \leq t_2$ 时, 流变模型为西原模型,



(a)

即

$$\varepsilon(t) = \frac{\tau}{E_1} + \frac{\tau}{E_2} (1 - e^{-E_2 t / \eta_1}) + \frac{\tau - \tau_s}{\eta_2} t \quad (5)$$

(3) 当 $\tau_0 > \tau_s$, $t > t_2$ 时, 有

$$\varepsilon(t) = \frac{\tau}{E_1} + \frac{\tau}{E_2} (1 - e^{-E_2 t / \eta_1}) + \frac{\tau - \tau_s}{\eta_2} t + \frac{\tau}{G} \left(1 - e^{-\left(\frac{H(t-t_2)}{t_c-t_2}\right)^n} \right) \quad (6)$$

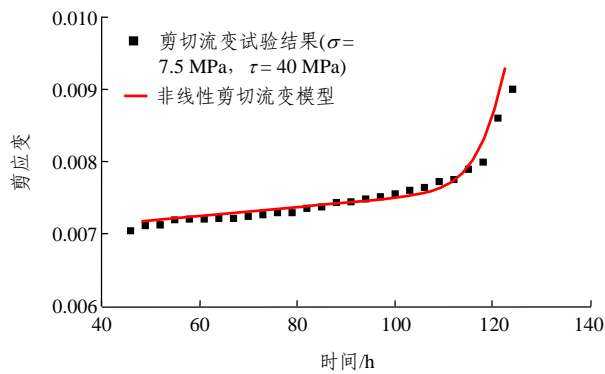
式中: ε 为总的剪切应变; t 为经过的时间; E_1 为瞬时剪切模量; E_2 为黏弹性剪切模量; η_1 , η_2 均为黏滞系数, 表示流变阶段趋向稳定的快慢程度, 数值越小则趋向稳定的时间就越短; τ_s 为屈服剪应力或长期抗剪强度(由不同剪应力下的流变曲线插值得到); τ 为剪应力。具体拟合参数如表 5 所示。

表 5 黏弹塑性模型拟合参数

Table 5 Fitting parameters of viscoelastic model

岩样编号	σ /MPa	τ /MPa	时间 t	E_1 /GPa	η_1 /(MPa·h)	E_2 /MPa	η_2 /(MPa·h)	G /GPa	n
V-1	7.5	40	$\leq t_2$	7.5	1.5×10^6	1.8×10^4	2.9×10^4	-	-
			$> t_2$	7.1	1.3×10^6	4.0×10^4	3.2×10^4	7.7	17
V-2	15.0	55	$\leq t_2$	6.9	5.3×10^5	1.8×10^5	2.7×10^6	-	-
			$> t_2$	9.1	1.2×10^6	1.9×10^4	3.1×10^4	5.3	20

从图 9 可知: 非线性流变元件(NRC 模型)与西原模型串联组合的黏弹塑性模型充分模拟了 V 级围岩凝灰熔岩的加速蠕变特性以及定常蠕变的特点, 试验曲线和模型曲线拟合的较好。



(b)

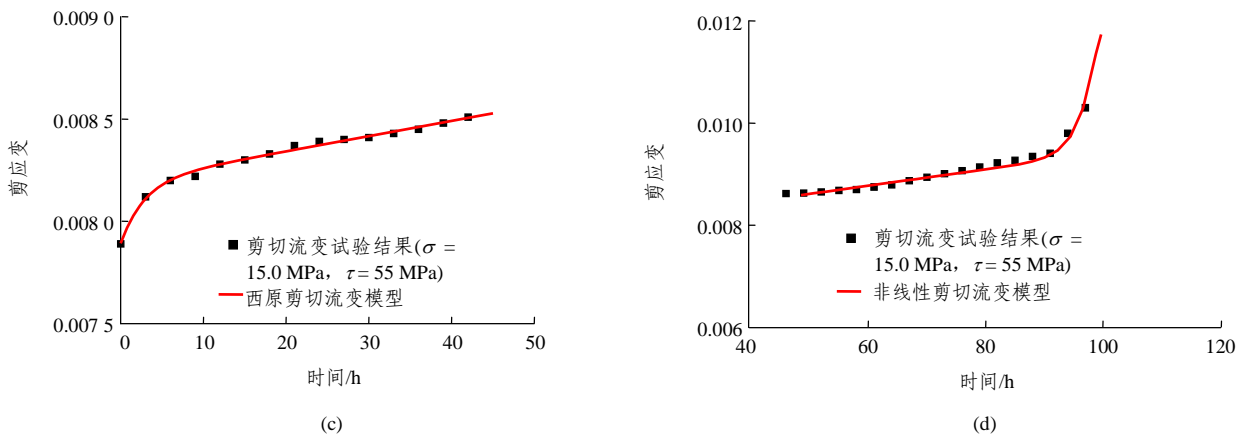


图9 V级凝灰熔岩剪切流变模型与试验结果的对比

Fig.9 Comparison between shear rheological models and experiment results of V-grade surrounding rock

4 结 论

通过对不同围岩级别凝灰熔岩剪切流变特性的试验研究以及模型辨识, 可到如下几个方面的认识:

(1) 不同级别的围岩都具有明显的瞬时变形, 应力水平越高, 瞬时剪切应变越大; 在恒定的正应力水平下, 随着剪应力增加, 瞬时剪切应变也逐渐增大, 但应变速率呈下降趋势; 随着围岩级别的提高, 瞬时弹性变形逐渐减小。

(2) II~III级凝灰熔岩, 流变具有过渡蠕变和定常蠕变2个阶段, 主要为黏弹性变形, 破坏形式表现为脆性破坏; IV级凝灰熔岩已呈现出加速蠕变的特性, 变形以黏弹性变形为主, 在高的剪应力水平会表现出塑性变形, 主要表现为脆性破坏; V级凝灰熔岩, 具有过渡蠕变、定常蠕变和加速蠕变3个阶段, 变形具有弹性、塑性和黏性组成, 破坏形式表现为塑性破坏。

(3) V级凝灰熔岩, 其剪切流变变形包括瞬时弹性变形、黏弹性变形和黏塑性变形等多种成分, 但加速蠕变过程的发生具有特定的应力阈值。对于V-1, 在 $\tau \geq 40$ MPa, $t_2 \geq 43$ h时, 对于V-2, 在 $\tau \geq 50$ MPa, $t_2 \geq 46$ h时, 岩石的加速蠕变才会发生; 而当应力低于阈值或者时间小于某一定值时, 加速蠕变并不发生。

(4) 通过模型辨识发现: II~III级凝灰熔岩采用广义 Kelvin 模型, IV级凝灰熔岩采用伯格模型, V级凝灰熔岩采用非线性流变元件(NRC模型)

与西原模型的串联模型, 可以较好的模拟围岩的流变特性, 并与试验结果进行了对比; 同时也得到了流变模型的相关力学参数, 但是这些力学参数和剪应力水平有关。

参考文献(References):

- [1] AMADEI B, CURRAN J H. Creep behaviour of rock joints[C]// The 13th Canadian Rock Mechanics Symposium.[S.l.]: [s.n.], 1980: 146 - 150.
- [2] OKUBO S, NISHIMATSU Y, FUKUI K. Complete creep curves under uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1991, 28(1): 77 - 82.
- [3] 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, 16(1): 39 - 47.(LI Yongsheng. Experimental study on creep and relaxation of four rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 16(1): 39 - 47.(in Chinese))
- [4] FUJI 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.
- [5] 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))
- [6] 杨圣奇, 苏承东, 徐卫亚. 大理岩常规三轴压缩下强度和变形特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 475 - 478.(YANG Shengqi, SU Chengdong, XU Weiya. Experimental investigation on strength and deformation properties of marble under conventional triaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(3): 475 - 478.(in Chinese))
- [7] 范庆忠, 高延法. 软岩蠕变特性及非线性模型研究[J]. 岩石力学与

- 工程学报, 2007, 26(2): 391 - 396.(FAN Qingzhong, GAO Yanfa. Study on creep properties and nonlinear creep model of soft rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 391 - 396.(in Chinese))
- [8] WAWERSIK W R. Time-dependent behaviour of rock in compression[C]// Proceedings of the 3rd Congr. Int. Soc. Rock Mech.. Denver, Colorado: [s.n.], 1974: 357 - 363.
- [9] 孙 钧, 李永盛, 李祥生. 多组节理岩体的流变性质及其粘弹塑性效应[R]. 上海: 同济大学, 1984.(SUN Jun, LI Yongsheng, LI Xiangsheng. The rheological characteristics of tunnel opening in multi-set joint rock mass and its viscous elastoplastic effects[R]. Shanghai: Tongji University, 1984. (in Chinese))
- [10] 陈沅江, 潘长良, 曹 平, 等. 软岩流变的一种新力学模型[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 209 - 214.(CHEN Yuanjiang, PAN Changliang, CAO Ping, et al. A new mechanical model for soft rock rheology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 209 - 214.(in Chinese))
- [11] 沈明荣, 朱根桥. 规则齿形结构面的蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 223 - 226.(SHEN Mingrong, ZHU Genqiao. Testing study on creep characteristic of regularly dentate discontinuity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 223 - 226.(in Chinese))
- [12] 熊诗湖, 邬爱清, 周火明. 层状软岩力学特性现场试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(12): 887 - 890.(XIONG Sihui, WU Aiqing, ZHOU Huoming. In-situ test on mechanical characteristics of soft layer rock mass[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(12): 887 - 890.(in Chinese))
- [13] 杨圣奇, 徐卫亚, 杨松林, 等. 龙滩水电站泥板岩剪切流变力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 247 - 253.(YANG Shengqi, XU Weiya, YANG Songlin, et al. Investigation on shear rheological mechanical properties of shale in Longtan Hydropower Project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 247 - 253.(in Chinese))
- [14] 中华人民共和国行业标准编写组. JTG D070 - 2004 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTG D070 - 2004 Code for design of road tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.(in Chinese))
- [15] 夏才初, 孙 钧. 蠕变试验中流变模型辨识及参数确定[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1996, 24(5): 498 - 503.(XIA Caichu, SUN Jun. Identification of rheological models and parameters estimation in creep test[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 1996, 24(5): 498 - 503.(in Chinese))
- [16] 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. Rheological behaviour of geomaterials and its engineering application[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.(in Chinese))
- [17] 金丰年, 范华林. 岩石的非线性流变损伤模型及其应用研究[J]. 解放军理工大学学报, 2000, 1(3): 1 - 5.(JIN Fengnian, FAN Hualin. Study on nonlinear rheology damage property of rock[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2000, 1(3): 1 - 5.(in Chinese))
- [18] 曹树刚, 边 金, 李 鹏. 岩石蠕变本构关系及改进的西原正夫模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 632 - 634.(CAO Shugang, BIAN Jin, LI Peng. Rheologic constitutive relationship of rocks and a modified model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(5): 632 - 634.(in Chinese))

下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》主要发表下列内容的文章:

- (1) 干旱半干旱矿区水资源保护性采煤基础与应用研究;
- (2) 开滦范各庄井田突水特征及煤层底板突水地质条件分析;
- (3) 小浪底水库下采煤导水裂隙发育监测与模拟研究;
- (4) 高压奥灰水大型逆断层下盘煤层安全开采研究;
- (5) 底板突水危险性评价专家系统及应用研究;
- (6) 矿井富水体的瞬变电磁场物理模型实验研究;
- (7) 基于地下水渗流中地电场响应的矿井水害预警实验研究;
- (8) 新驿煤田奥灰顶部相对隔水性及底板突水危险性评价;
- (9) 三维内置裂隙倾角对类岩石材料拉伸力学性能和断裂特征的影响。