

文章编号:1000-582x(1999)05-0099-05

攀钢朱矿东山头边坡辉 长岩流变特性试验研究

TU458.3

张学忠¹, 王 龙², 张代钧¹, 郑硕才¹, 褚美霞¹

(1. 重庆大学 建筑工程学院, 重庆 400044; 2. 攀钢集团公司矿山设计研究院, 攀枝花 617003)

摘 要: 采用 MTS880 ± 500 型材料试验机, 对攀钢朱矿东山头边坡辉长岩进行了单轴压缩蠕变试验研究, 拟合出蠕变曲线的经验公式。经综合分析, 提出了试验辉长岩的蠕变理论模型, 确定了岩石的蠕变参数和长期强度。

关键词: 边坡; 辉长岩; 流变特性; 试验研究

岩石

中图分类号: TU458.3

文献标识码: A

岩石流变性质是进行岩体工程长期稳定性预测的重要依据。流变现象越来越引起广大学者的注意和研究。近几年来, 对于岩质边坡, 除开展常规的力学参数测试, 还进行岩石流变参数的测试和岩体长期稳定性分析, 尽可能地为工程设计提供全面、可靠的资料和方案。

笔者对攀枝花钢铁集团朱家包包铁矿东山头边坡岩石进行了辉长岩的单轴压缩蠕变试验, 研究其变形特性, 特别是长期荷载作用下的变形特性及流变性质; 拟合出了蠕变曲线的经验公式, 提出了试验岩石流变的理论模型; 在此基础上, 确定了辉长岩的蠕变参数和长期强度。上述试验研究成果已用于攀钢朱矿东山头边坡岩体工程稳定性计算分析之中^[1,5]。

1 岩石试样和试验方法

本试验岩石试样采自攀枝花钢铁集团公司朱家包包铁矿东山头滑坡 ES2 剖面上的三个标高位置。试样分 3 组: I 组为微风化细粒辉长岩, II 组为细粒辉长岩, III 组为粗粒辉长岩。试验环境温度为常温条件, 试验试样加工尺寸为 $\Phi 50 \times 100$ 。在进行流变试验前, 首先按常规试验方法测得 3 组岩石的力学特性参数: 弹性模量 E 、瞬时破坏强度 σ_c 以及泊松比 μ , 以此作为蠕变试验的参考值, 如表 1。

试验在 MTS880 ± 500 型材料试验机上进行, 纵向应变用 MTS632.25C-20 型引伸计采集。采用梯级加载方式, 即将常规试验所测得的瞬时破坏强度 σ_c 分成若干等级, 在同一试件上由小到大逐渐施加荷载。每一级荷载持续时间视变形速率而定, 一般变形速率小于 $1 \times 10^{-4} \text{ mm/h} \sim 2 \times 10^{-4} \text{ mm/h}$, 即当应变率小于 $1 \times 10^{-6} / \text{h} \sim 2 \times 10^{-6} / \text{h}$ 就施加下一级荷载。参照岩石试验方法, 加载速率取为 4 MPa/min 。由于梯级加载方式只用一个试样, 试验的离散

• 收稿日期: 1999-01-25

作者简介: 张学忠 (1974-), 男, 河北邯郸人, 重庆大学建工学院硕士生。

性较小,因而这一方法在岩土工程流变试验中应用比较广泛。根据叠加原理(假设为均质各向同性介质),随时间变化的荷载所引起的蠕变变形等于用各级应力增量引起的变形之和。

2 试验结果与分析

2.1 蠕变试验结果

通过蠕变试验,测得 3 组岩石在不同荷载水平下的应变随时间变化的 $\epsilon - t$ 曲线如图 1 所示。辉长岩属坚硬岩石,在较低应力水平下,蠕变相对较小,经过短时期的初期蠕变后,变形即趋于稳定,而在较高的应力水平下蠕变比较明显,本次实验也证明了这一点。在实验中,由于载荷控制较好,除观测到了衰减蠕变和稳定蠕变,还观测到了一段加速蠕变过程^[5]。

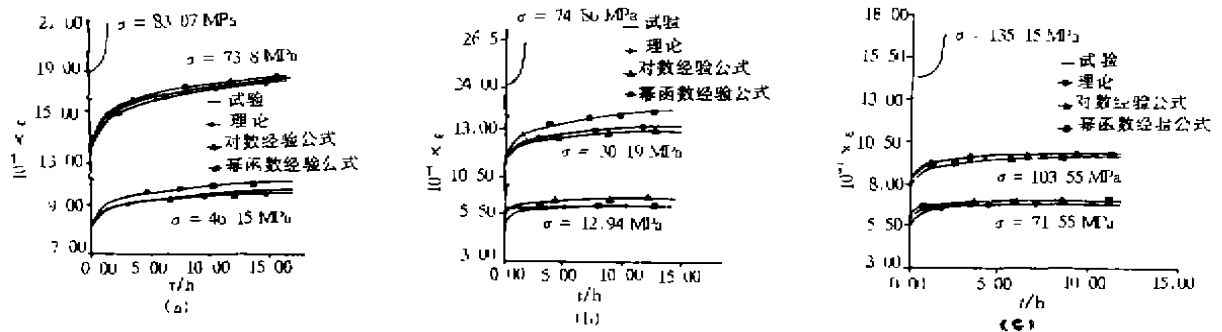


图 1 岩石蠕变试验 $\epsilon - t$ 曲线

2.2 蠕变特性分析

2.2.1 蠕变经验公式

岩石的力学模型是建立在统计分析岩石力学试验结果的基础上,利用试验数据拟合得出蠕变经验公式,可以了解岩石材料在给定条件下的蠕变特性。一般地,总应变 ϵ 包括弹性应变 ϵ_e 、第 I 阶段蠕变 ϵ_I 、第 II 阶段蠕变 ϵ_{II} 以及第 III 阶段加速蠕变 ϵ_{III} 四部分,即

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_I + \epsilon_{II} + \epsilon_{III} \quad (1)$$

根据目前的研究情况,经验公式一般只用于描述第 I 和第 II 阶段蠕变,对于加速蠕变,还未找到简单适用的经验公式,下面的经验公式也不考虑加速蠕变阶段。

1) 对数型蠕变经验公式

根据老化理论,对数型蠕变经验公式基本形式为 $\epsilon_t = A\delta + B\ln(t+1) + Ct$ (2)

其中 A、B、C 为试验常数。式中 $A\delta$ 相当于瞬时弹性应变, $B\ln(t+1)$ 相当于衰减蠕变阶段的应变, Ct 相当于稳定蠕变阶段的应变(C 即为稳定蠕变速率),描述应变随时间线形增长的情况。

根据试验数据采用最小二乘法进行回归分析,得到了微风化细粒辉长岩、细粒辉长岩、粗粒辉长岩在不同应力水平下的经验公式,所确定的系数 A、B、C 列于表 2 中。

2) 幂函数型经验蠕变公式

根据遗传继效理论,蠕变方程为
$$\epsilon(t) = \frac{1}{E} \left[\sigma(t) + \int_0^t K(t-u) \sigma(u) du \right] \quad (3)$$

式中 $\epsilon(t)$ ——时间 t 的总应变; $\sigma(t)$ ——时间 t 的应力; $K(t-u)$ ——蠕变继效函数;
 E ——时刻 t 时的弹性模量。

表2 不同应力水平下岩石流变对数型经验公式的参数

岩石类别	编号	应力水平 $\sigma(\text{MPa})$	$A(\times 10^{-5})$	$B(\times 10^{-5})$	$C(\times 10^{-5})$	相关系数 R
微风化细粒辉长岩	I	46.15	1.777	6.979	—	0.8937
		73.84	1.904	4.089	1.006	0.9019
未风化细粒辉长岩	II	12.94	4.525	0.546	—	0.9670
		30.19	3.810	10.455	—	0.9829
粗粒辉长岩	III	71.55	0.883	3.709	—	0.9545
		103.55	0.840	6.053	0.040	0.9237

当 $\sigma = \text{恒量}$ 时,方程变为
$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \left[1 + \int_0^t K(t) dt \right] \quad (4)$$

岩石试验幂函数为蠕变继效函数 $K(t-u) = \delta(t-u) - \alpha \quad (5)$

δ, α 为试验系数,积分后可得岩石蠕变继效理论幂函数型经验公式为^[6]:

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma}{E} \left[1 + \frac{\delta}{1-\alpha} t^{1-\alpha} \right] \quad (6)$$

在不同应力下所确定的系数 α, δ 列于表3。

表3 不同应力水平下岩石流变幂函数型经验公式的参数

编号	应力水平 $\sigma(\text{MPa})$	δ	α	相关系数 R
I	46.15	0.0245	0.4459	0.8422
	73.84	0.0253	0.4573	0.9010
II	12.94	0.0278	0.6957	0.9241
	30.19	0.0304	0.4950	0.8721
III	71.55	0.0275	0.2961	0.9215
	103.55	0.0356	0.6328	0.9086

I——微风化细粒辉长岩;

II——未风化细粒辉长岩; III——粗粒辉长岩

从表2、表3中可以看到,在不同应力水平下的经验公式,相关系数(除个别外)大部分均在0.9以上。将经验公式拟合曲线绘于相应的 $\epsilon-t$ 曲线图中,可以看到经验公式曲线与试验曲线拟合较好。通过相关系数的比较,可以看出对数型方程拟合较幂函数型方程要好。

2.2.2 岩石蠕变理论模型

岩石蠕变理论模型有许多种,对具体的岩石而言,在确定蠕变理论模型之前,需对试验曲线进行简要的分析。本次试验的蠕变曲线大致有以下几个特点:

- 1) 当瞬时施加应力后,立刻产生瞬时弹性应变,可知模型中应包含弹性元件;
- 2) 从蠕变曲线中可以看出,应变随时间增加有增大的趋势,知模型中还应包含粘性元件;
- 3) 从低应力水平下的卸载曲线发现,在应力降为零的瞬间,应变有部分瞬时恢复,且卸载后应变随时间渐渐趋近于零,这一特征与开尔文模型类似;

4) 在低应力水平下的蠕变曲线中,发现在 $t \rightarrow \infty$ 时应变将趋于某一定值,这与广义开尔文模型应变时间曲线相似。

广义开尔文模型是将 K 体作为一个整体与 H 串联而成,用三个常数 E_0 、 E_1 和 η_1 表示该种材料的性状,该模型能够描述有瞬时强度且 I、II 阶段蠕变趋于稳定的情况。综上所述,本次试验蠕变曲线采用 HK 体模型较为合适,其组合方式见图 2。

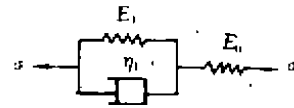


图 2 蠕变理论模型

在常应力 $\sigma = \sigma_0$ 常数的作用下, HK 体模型的应力-应变-时间关系式为:

$$\epsilon(t) = \sigma_0 [E_0^{-1} + (1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t})] / E_1 \quad (7)$$

3 岩石流变参数和长期强度的确定

3.1 流变参数

我们采用直接法计算流变参数,式(7)中只有 E_0 、 E_1 和 η_1 三个参数,在 $t=0$ 时,施加常应力 σ_0 , 则 $\epsilon_0 = \sigma_0 / E_0$, $\epsilon(\infty) = \frac{\sigma_0 (E_0 + E_1)}{E_0 E_1}$ (8)

$$\text{故} \quad E_0 = \sigma_0 / \epsilon_0 \quad E_1 = \sigma_0 / [\epsilon(\infty) - \epsilon_0] \quad (9)$$

$$\text{在蠕变曲线上任取一点} (\epsilon, t), \text{ 可得} \quad \epsilon - \epsilon_0 = \sigma_0 (1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1} t}) / E_1 \quad (10)$$

$$\text{从而有} \quad \eta_1 = \frac{E_1 t}{\ln \sigma_0 - \ln [\sigma_0 - E_1 (\epsilon - \epsilon_0)]} \quad (11)$$

由于岩石材料十分复杂,其蠕变特性与应力水平有关,因此计算岩石的蠕变参数时,应考虑几个应力水平。模型参数的计算结果见表 4^[7]。

表 4 不同应力水平下的蠕变参数计算值

岩石类别	编 号	应力水平	E_0	E_1	η_1
		G(MPa)	($\times 10^4$ MPa)	($\times 10^4$ MPa)	($\times 10^9$ MPa·S)
微风化细粒辉长岩	I	46.15	5.627	26.040	6.182
		73.84	5.376	20.175	7.971
		均值	5.502	23.108	7.076
未风化细粒辉长岩	II	12.94	2.393	11.411	4.644
		30.19	2.656	16.661	1.970
		均值	2.524	14.036	3.307
粗粒辉长岩	III	71.55	11.679	50.601	17.358
		103.55	12.616	54.988	8.322
		均值	12.148	52.794	12.840

从表 4 可以看出,所求参数离散不大,其平均值基本反映了试验岩石的流变特性。

3.2 长期强度

岩石长期强度是指岩石在长期荷载作用下抵抗破坏的临界强度值,也是岩石强度随着作用时间延长而降低的最低值。由指数型长期强度方程: $S_t = A + B \exp(-\alpha t)$ (12) 式中, A 为长期强度, $A = S_\infty$; $A + B = S_0$, 是瞬时强度。

根据岩石种类及试验情况,取经验常数 $\alpha = 0.002$,由常规强度试验及非衰减蠕变达到破坏时的应力和荷载历时时间 t ,我们求出试验岩石的长期单轴压缩强度。

I 组: $S_{\infty} = 72.5 \text{ MPa}$ $S_{\infty}/S_0 = 69.8\%$;

II 组: $S_{\infty} = 54.9 \text{ MPa}$ $S_{\infty}/S_0 = 31.9\%$; III 组: $S_{\infty} = 112.2 \text{ MPa}$ $S_{\infty}/S_0 = 70.6\%$ 。

4 结论

1) 试验结果表明,辉长岩的流变力学特性表现为滞弹性,可采用虎克体与开尔文体串联的 HK 体模型来描述。文中确定了试验辉长岩流变 HK 模型中的有关参数值。

2) 辉长岩虽属坚硬岩石,试验表明其强度仍存在时间效应,它的长期强度指标明显小于相同材料的瞬时强度。对本试验而言,长期强度与瞬时强度的比值,微风化细粒辉长岩和粗粒辉长岩为 0.7 左右,细粒辉长岩为 0.3 左右,这对于承受荷载水平较高、工作年限比较长的矿山边坡岩体工程具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 徐平,夏熙伦. 三峡工程花岗岩蠕变特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 1996, 7(4): 63~67.
- [2] 范广勤. 岩土工程流变力学[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1992.
- [3] 王贵君,孙文若. 硅藻岩蠕变特性研究[J]. 岩土工程学报, 1996, 11(6): 55~60.
- [4] 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, 3(1): 39~47.
- [5] 夏熙伦,徐平. 岩石流变特性及高边坡稳定性流变分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 12(4): 312~322.
- [6] 刘雄. 岩石流变学概论[M]. 北京:地质出版社, 1992.
- [7] 李青麒. 软岩蠕变参数的曲线拟合计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 10(5): 559~564.

A Experimental Study on Rheological Characteristics of Gabbro in East Mountain Slope of Zhujiabaobao Mine

ZHENG Xue-zhong¹, WANG Long²,

ZHANG Dai-jun¹, ZHENG Shuo-cai¹, ZHU Mei-xia¹

(1. Faculty of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Mining Institute Panzhihua Steel Group Company 617003, China)

ABSTRACT: Applying $MIS880 \pm 500$, the experiments of uniaxial compression creep upon gabbro, in east mountain slope of Zhujiabaobao mine of Panzhihua Steel Group Company are made. The experimental formulae of creep curve are fitted. Through comprehensive analysis, HK model can express the rheological characteristics of tested gabbro very well. Creep parameters and long-term strength of rock are obtained.

KEYWORDS: slope; gabbro; rheological characteristic; experimental study

(责任编辑 钟学恒)