

构皮滩水电站工程软岩原位流变试验研究

陈建胜, 翦波, 左成荣, 于新华

(中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南长沙 410014)

摘要:对构皮滩水电站第二级升船机基础的薄层状页岩进行了现场原位流变试验研究。结果表明,薄层状页岩在外荷载的长期作用下蠕变变形较大,表现出显著的黏弹性特征;同时根据半无限空间弹性理论,推导了基于刚性承压板原位流变试验的流变本构关系——Burgers 模型解析表达式,并建立了岩体流变本构模型参数的辨识方法。研究结论有效解决了基于原位流变试验的岩体流变力学参数取值问题。

关键词:软岩;原位流变试验;Burgers 模型;参数辨识

中图法分类号: P642

文献标志码: A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.03.014

大量的现场测量和室内试验都表明,软弱岩石以及含有泥质充填物和夹层破碎带的松散岩体,其流变特性较为显著^[1]。岩体的流变试验一般是在室内的 MTS 机或流变试验机上进行^[2]。长期以来,不少研究者对岩石单轴压缩、弯曲、剪切、常规三轴流变试验均开展了研究,但由于现场原位流变试验费用高、耗时长,因而受到了极大的限制和制约。承压板试验是岩土工程现场进行原位测试的一种重要方法,通常用于确定岩体的变形参数,通过荷载的分级加载,由观测装置可连续不断地测得试验点处岩体变形对载荷、时间的响应关系。基于刚性承压板荷载试验的原位流变试验可获得不同应力水平下岩体的流变变形特征,如何充分有效地利用这些数据和试验曲线获取试验区域岩体的流变力学模型及参数,为实际工程的设计、计算分析提供较可靠的信息是工程师长期关注的热点问题之一。

岩石流变模型及其参数的确定历来是一个比较棘手的问题,本文在对构皮滩水电站原位流变试验变形曲线研究的基础上,对试验区域岩体力学参数及流变模型的识别进行探讨研究,推导出能合理描述岩体长

期变形规律的流变模型并进行流变参数辨识。

1 试验原理及方法

现场岩体承压板法试验是用于测量岩体变形参数的最广泛的方法之一,也是进行岩体流变试验较为常用的一种方法,具有试验方法简单、操作方便、便于长期观测等优点。本文所说的原位流变试验是指在岩体刚性承压板试验的基础上,采用逐级加(卸)载的试验方法,获得岩体在不同荷载水平下的位移-时间关系曲线。

承压板法试验的理论依据是基于均匀、连续、各向同性的半无限弹性体表面局部受力的 Boussinesq 问题^[3]。刚性承压板在岩体表面上采用千斤顶加压,通过多层钢垫板与岩基刚性接触,在钢垫板范围内岩体表面承受非均布压力,但产生均匀垂直位移。通过弹性力学理论可得到实心刚性圆形承压板下岩体表面中心点垂直位移为

$$w_{z=0} = \frac{\pi(1-\mu^2)pR_0}{2E} \quad (1)$$

式中, p 为法向均布荷载, N/mm^2 ; R_0 为承压板半径,

收稿日期:2014-05-13

基金项目:中国水电顾问集团科技开发项目

作者简介:陈建胜,男,高级工程师,博士,主要从事岩体力学、岩土工程数值计算等方面的研究工作。E-mail:jshchen2011@

cm; μ 为岩体泊松比; E 为岩体弹性模量, MPa。

笔者在构皮滩水电站第二级升船机基础下游侧的薄层状页岩段开展了基于刚性承压板的压缩流变试验。试验采用自行研制的 LSB-1A 电液伺服流变试验仪,该试验仪由液压千斤顶(轴向加载部分)、液压伺服油源、变形测量系统、加载控制系统、工业计算机系统、UPS 电源等组成。试验采用圆形刚性承压板,面积 2 000 cm²。选定试点后,先清除受扰动的岩体,然后人工凿平,并用砂轮打磨,岩体表面起伏差控制在 5 mm 以内。

2 原位流变本构模型

岩石非线性黏弹性流变模型是通过一些基本元件^[4],如弹簧、黏壶、塑性体等来反映线性黏弹塑性材料的性质,通过这些基本元件的相互并联或串联组合成非线性流变本构模型。广义开尔文(Modified Kelvin)体由一个开尔文元件和一个弹簧串联组成;伯格斯(Burgers)体是一种弹黏性体,它由马克斯威尔体与开尔文体串联而成,其本构方程如公式(2)~(3)所示。伯格斯(Burgers)模型有瞬时弹性变形、减速蠕变、等速蠕变的性质,该模型对软岩(如泥质岩)较适用。

$$\frac{\eta}{E_0} \dot{\sigma} + (1 + \frac{E_1}{E_0}) \sigma = \eta \dot{\varepsilon} + E_1 \varepsilon \quad (2)$$

$$\ddot{\sigma} + (\frac{E_1}{\eta_2} + \frac{E_1}{\eta_1} + \frac{E_0}{\eta_2}) \dot{\sigma} + \frac{E_1 E_0}{\eta_1 \eta_2} \sigma = E_1 \ddot{\varepsilon} + \frac{E_1 E_0}{\eta_2} \dot{\varepsilon} \quad (3)$$

上述流变本构模型表达式仅表征了应力-应变的对应关系,原位流变试验通常量测岩体的沉降变形,而对应半无限空间中岩体的应变则难以确定。有关如何依据试验得到的位移-时间关系曲线获得岩体的流变本构模型及流变参数的研究成果还甚少。以刚性圆形承压板试验为例,假定岩体为均质、各向同性介质,忽略试验时其它干扰因素的影响,则试验接近于半空间体在边界上受圆形法向均布力作用的情况。

借助微分算子 $P' = \sum_{k=0}^m p_k \frac{d^k}{dt^k}$, $Q' = \sum_{k=0}^m q_k \frac{d^k}{dt^k}$, (p_k, q_k 为取决于材料性质的常数),根据三维黏弹性本构关系则得到

$$\begin{cases} P' S_{ij} = 2Q' e_{ij} \\ P'' \sigma_{ij} = 3Q'' \varepsilon_{ij} \end{cases} \quad (4)$$

式中, S_{ij}, e_{ij} 分别为应力偏量和应变偏量; $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$ 分别为体积应力和体积应变; P', Q' 为微分算子; P'', Q'' 是反映材料黏弹性体积变形的算子,若材料体积变形呈弹性,则可取 $Q'' = K$, K 为弹性体积模量, $P'' = 1$ ^[5]。

根据黏弹性理论,通过拉氏变换,可以推导出如下参数变换式

$$\begin{cases} \bar{E}(s) = \frac{9\bar{Q}'(s)\bar{Q}''(s)}{3\bar{P}'(s)\bar{Q}''(s) + 3\bar{P}''(s)\bar{Q}'(s)} \\ \bar{\mu}(s) = \frac{3\bar{P}'(s)\bar{Q}''(s) - 2\bar{P}''(s)\bar{Q}'(s)}{6\bar{P}'(s)\bar{Q}''(s) + 2\bar{P}''(s)\bar{Q}'(s)} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\bar{P}'(s), \bar{Q}'(s), \bar{P}''(s), \bar{Q}''(s)$ 为拉普拉斯空间中的微分算子。

已知刚性承压板边缘岩体表面的压缩变形为

$$w = \frac{\pi(1 - \mu^2)pR_0}{2E} = A \frac{1 - \mu^2}{E} \quad (6)$$

式中, $A = \pi p R_0 / 2$ 。

对于广义开尔文模型,岩体表面压缩变形^[6-9]为

$$\begin{aligned} w(t) = & \frac{\pi p R_0 (G_0 + G_1)}{8 G_0 G_1} + \\ & \frac{3 \pi p R_0 (G_0 + G_1)}{8 [3K(G_0 + G_1) + G_0 G_1]} - \frac{\pi p R_0}{8 G_1} e^{-\frac{c_1}{\eta} t} - \\ & \frac{3 \pi p R_0 G_0^2}{8 (3K + G_0) [3K(G_0 + G_1) + G_0 G_1]} e^{-at} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $a = [3K(G_0 + G_1) + G_0 G_1] / [(3K + G_0)\eta]$; $w(t)$ 为岩体 t 时刻的压缩变形, cm; G_0 为岩体弹性剪切模量, MPa; K 为岩体弹性体积模量, MPa; G_1 为岩体黏弹性剪切模量, MPa; η 为黏性系数。其余符号意义同前。

对于伯格斯模型,拉普拉斯空间中岩体表面的压缩变形为

$$\bar{w}(s) = A \frac{1 - \bar{\mu}(s)^2}{s \bar{E}(s)} \quad (8)$$

$$\bar{P}'(s) = 1 + (\frac{\eta_1}{G_0} + \frac{\eta_1 + \eta_2}{G_1})s + \frac{\eta_1 \eta_2}{G_0 G_1} s^2 \quad (9)$$

$$\bar{Q}'(s) = \eta_2 s + \frac{\eta_1 \eta_2}{G_1} s^2 \quad (10)$$

将 $\bar{\mu}(s), \bar{E}(s)$ 及 $\bar{P}'(s), \bar{Q}'(s), \bar{P}''(s), \bar{Q}''(s)$ 代入式(8)中,经过推导整理可得

$$\begin{aligned} \bar{w}(s) = & \frac{A}{4} \frac{1 + (\frac{\eta_2}{G_0} + \frac{\eta_1 + \eta_2}{G_1})s + \frac{\eta_1 \eta_2}{G_0 G_1} s^2}{s^2 (\eta_2 + \frac{\eta_1 \eta_2}{G_1}) s} [1 + \\ & \frac{3(\eta_2 + \frac{\eta_1 \eta_2}{G_1}) s}{3K + [3K(\frac{\eta_2}{G_0} + \frac{\eta_1 + \eta_2}{G_1} + \eta_2)s + (3K\frac{\eta_1 \eta_2}{G_0 G_1} + \frac{\eta_1 \eta_2}{G_1})]}] \end{aligned} \quad (11)$$

将式(11)进行拉普拉斯逆变换,最后得到任意时刻 t 刚性承压板边缘岩体表面的压缩变形为

$$w(t) = \frac{\pi p R_0}{8} \left[\frac{1}{K} + \frac{t}{\eta_2} + \left(\frac{1}{G_0} + \frac{1}{G_1} \right) (1 - e^{\frac{c_1}{\eta_1 t}}) - \frac{\eta_2 (e^{-a_1 t} - e^{-a_2 t}) + \frac{\eta_1 \eta_2}{G_1} (a_2 e^{-a_1 t} - a_1 e^{-a_2 t})}{K (3K \frac{\eta_1 \eta_2}{G_0 G_1} + \frac{\eta_1 \eta_2}{G_1}) (a_2 - a_1)} \right] - \frac{1}{G_0} e^{\frac{c_1}{\eta_1 t}}$$

(12)

式中,

$$a_{1,2} = \frac{(3K(\frac{\eta_2}{G_0} + \frac{\eta_1 + \eta_2}{G_1} + \eta_2) \pm \sqrt{(3K(\frac{\eta_2}{G_0} + \frac{\eta_1 + \eta_2}{G_1} + \eta_2)^2 - 12K(3K \frac{\eta_1 \eta_2}{G_0 G_1} + \frac{\eta_1 \eta_2}{G_1})})}{2(3K \frac{\eta_1 \eta_2}{G_0 G_1} + \frac{\eta_1 \eta_2}{G_1})};$$

η_1, η_2 为黏性系数。将 $t = 0$ 代入式(7)、(12), 可得到刚性承压板边缘岩体表面的瞬时弹性变形, 同式(6)

$$w(t) |_{t=0} = \frac{\pi (1 - \mu^2) p R_0}{2E} \tag{13}$$

3 原位流变模型参数辨识

3.1 弹性参数辨识

原位流变试验开始加载或卸载时, 岩体表面会产生一定的突变位移, 通常称之为瞬时弹性变形。由刚性承压板边缘岩体表面瞬时弹性变形式(6), 可得到岩体在压缩荷载作用下的瞬时变形模量 E_0 为

$$E_0 = (1 - \mu^2) \frac{\pi p}{2w} R_0 \tag{14}$$

式中, p 为分级压缩荷载, MPa; w 为岩体位移突变值, cm。其剪切模量和体积模量的计算公式为

$$G_0 = \frac{E_0}{2(1 + \mu)}, K = \frac{E_0}{3(1 - 2\mu)} \tag{15}$$

利用加卸载时岩体的突变位移, 以 LB-2 为例通过(15)式计算不同荷载级别下弹性参数, 见表 1。

表 1 现场压缩流变试验弹性参数计算成果 MPa							
p	E_0	G_0	K	p	E_0	G_0	K
0.6	67.18	26.87	44.79	2.2	44.42	17.77	29.61
1.2	52.16	20.86	34.77	2.5	44.52	17.81	29.68
1.5	50.66	20.26	33.77	2.9	43.23	17.29	28.82
1.7	45.44	18.18	30.29	3.2	40.89	16.36	27.26
2	47.83	19.13	31.89	平均值	48.48	19.39	32.32

3.2 黏性参数辨识

原位流变载荷试验曲线表明, 不同荷载水平条件下, 岩体表面位移随时间而发展; 荷载较小的情况下, 蠕变逐步衰减至最终稳定; 随着荷载的增加, 蠕变变形量增大, 岩体表现出一定的等速蠕变性质。根据黏弹性理论可知, 本次试验的薄层状页岩是有弹性变形和流变变形的典型黏弹性体。依据现场压缩流变试验结

果, 采用数值分析方法对其流变曲线进行最小二乘法拟合分析。根据上述推导的刚性承压板现场压缩流变广义开尔文、伯格斯模型的表达式, 通过自定义拟合曲线公式对其现场压缩流变试验曲线进行拟合, 其拟合结果见图 1、2。其流变模型参数拟合结果见表 2。

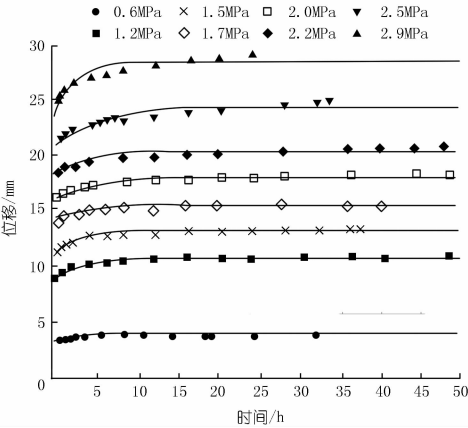


图 1 现场压缩流变曲线拟合(广义开尔文模型)

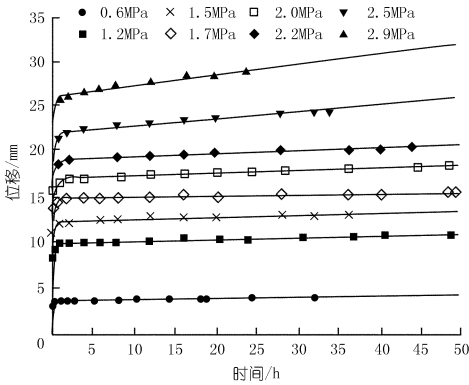


图 2 现场压缩流变曲线拟合(伯格斯模型)

表 2 现场压缩流变试验流变参数拟合结果

法向应力 σ /MPa	广义开尔文流变模型				伯格斯流变模型			
	G_1 /MPa	η / (MPa · h)	R		G_1 /MPa	η_1 / (MPa · h)	η_2 / (MPa · h)	R
0.6	154.5	429.7	0.8997		13.58	1.623	14400	0.9126
1.2	45.4	198.5	0.9300		6.79	0.917	15340	0.9276
1.5	84.9	238.9	0.9384		7.17	0.895	15380	0.8983
1.7	141.6	706.1	0.9126		3.97	0.399	29450	0.9428
2.0	100.2	699.9	0.9243		4.94	0.534	17820	0.9406
2.2	107.1	500.0	0.9025		6.21	0.6428	19460	0.9420
2.5	84.46	521.6	0.9277		3.62	0.3734	8683	0.9726
2.9	92.49	240.5	0.8280		3.14	0.3094	6754	0.9627
平均值	101.3	441.9	-		6.18	0.7117	15910	-

注: G_1 为黏弹性剪切模量, η_1, η_2 为黏滞系数

由拟合结果可以看出, 广义开尔文模型主要反映衰减蠕变的特性, 而伯格斯模型通常可以反映衰减蠕变及定常蠕变特性, 其拟合曲线与岩体载荷流变试验曲线吻合程度更高, 更适用于软岩流变特性的描述。

4 结 论

- (1) 薄层状页岩在外荷载的长期作用下蠕变变形量较大,表现出显著的软岩黏弹性特征。
- (2) 广义开尔文模型主要反映衰减蠕变的特性,而伯格斯模型则可以反映衰减蠕变及定常蠕变特性。
- (3) 由于原位流变实测曲线表现出弹性变形、黏性流动等特性,伯格斯模型对其试验曲线的拟合效果更好,更适用于薄层页岩(软岩)流变特性的描述。
- (4) 由半无限空间弹性理论推导的基于刚性承压板原位流变试验的流变本构(Burgers)模型及建立的岩体流变力学参数辨识方法合理可行,可供工程参考和应用。

参考文献:

[1] 孙钧.岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J].岩石力学与工程学报,2007,26(6):1081-1106.

[2] 李云鹏,王芝银,丁秀丽.岩体原位流变荷载试验的力学参数与模型反演[J].实验力学,2005,20(2):297-303.

[3] 刘成宇.土力学(第二版)[M].北京:中国铁道出版社,2004.

[4] 赵海斌,翦波.构皮滩水电站通航建筑物第二级升船机塔楼结构及基础处理专题-地基岩体力学特性及工程处理模型试验研究成果报告[R].长沙:中国水电顾问集团中南勘测设计研究院,2012.

[5] 丁秀丽.岩体流变特性的试验研究及模型参数辨识[D].武汉:中国科学院研究生院,2005.

[6] 张强勇,张建国,杨文东,等.软弱岩体蠕变模型辨识与参数反演[J].水利学报,2008,39(1):66-72.

[7] 朱珍德,李志敬,朱明礼,等.岩体结构面剪切流变试验及模型参数反演分析[J].岩土力学,2009,30(1):99-104.

[8] 周火明,钟作武,张宜虎,等.岩体原位试验新技术在水电工程中的初步应用[J].长江科学院院报,2011,28(10):112-117.

[9] 周火明,丁秀丽,李维树,等.构皮滩水电站岩石力学研究[J].人民长江,2006,37(3):8-10.

(编辑:郑毅)

In - situ rheological test and study of soft rock at Goupitan Hydropower Station

CHEN Jiansheng, JIAN Bo, ZUO Chengrong, YU Xinhua

(Powerchina Zhongnan Engineering Corporation, Changsha 410014, China)

Abstract: An in - situ rheological test of thin - layer shale was carried out for the second - level shiplift foundation at Goupitan Hydropower Station. The research shows that the thin shale has a large amount of creep deformation under the long - term external load, which is of prominent visco - elastic characteristic. According to the elasticity theory of semi - infinite space, the analytical expression of rheological constitutive relation, Burgers model, is derived based on rigid bearing plate in - situ rheological test. And the identification way for rock rheological constitutive model parameter is built. Therefore, the solution to the rheological parameters determination of rock mass based on in - situ rheological test is settled.

Key words: soft rock; in - situ rheological test; Burgers Model; parameter identification

.....

(上接第 44 页)

Research on interaction between tunnel lining concrete hydration heat and frozen wall

YE Qing, SHI Rongjian, CHEN Bo

(State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: For the tunnel construction using frozen construction method, we study the mutual influence of tunnel lining concrete hydration heat and frozen wall temperature field by comparison of numerical simulation and field test. It is shown that in the initial supporting period, under the action of the heat - insulation layer formed by the wooden board outside the steel arch and the shotcrete, the influential depth of the hydration heat on frozen wall can only reach a superficial range of 30 to 100mm after the secondary concrete lining, only the temperature of surface frozen earth rise to above 0℃ in short time and drop to below zero soon after. Although the secondary lining concrete is influenced by the low temperature of the outside frozen wall, the internal temperature of the concrete can rise to above 28℃, while the temperature of outer surface of the concrete drops to below zero in 20 days, which demonstrates that the increase of concrete strength is hardly affected. The results of numerical simulation are consistent with those of the field test.

Key words: temperature field; frozen wall; frozen construction method; hydration heat