

基于三参量流变模型的止水橡皮粘弹性研究

刘礼华, 熊 威, 张宏志, 张清江

(武汉大学土木与建筑工程学院, 武汉 430072)

[摘要] 给出了用三参量流变模型研究止水橡胶粘弹性的基本表达式。结合某高水头闸门止水材料的粘弹性试验, 得到了所采用橡胶材料的流变参数, 并指出了其蠕变变形和应力松弛变化的规律, 为工程设计提供参考依据。

[关键词] 高水头闸门; 橡胶; 粘弹性; 流变

[中图分类号] TV44 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2007)08-0069-03

1 引言

随着国家西部大开发政策的实施, 特别是国家能源战略要求优先发展可再生能源的背景下, 西北、西南地区将建设许多高水头、甚至是特高水头的电站, 对闸门止水材料提出了更高更新的要求。止水材料性能的优劣直接影响闸门止水的效果, 橡胶类止水材料粘弹特性表现在变形蠕变和应力松弛两个方面。这种粘弹性关系可以依据弹性体的特征建立三参量固体流变模型进行研究, 为实际工程设计提供参考依据。

2 三参量流变公式

假设止水材料建立三参量固体流变模型, 由一个 Kelvin 模型和一个弹簧串联而成, 如图 1 所示, 三参量固体流变模型的蠕变曲线如图 2 所示。显然, 模型的应力和应变可用元件参量表示为^[1-3]

$$\begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \\ \sigma = E_1 \varepsilon_1 + \eta_1 \dot{\varepsilon}_1 \\ \sigma = E_2 \varepsilon_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 ε 为止水材料的总应变, 它由蠕变部分应变 ε_1 和弹性部分应变 ε_2 叠加而成; σ 为止水材料的应力; E_1 , E_2 为弹性模量; η_1 为蠕变部分的粘性系数。由拉普拉斯变换与逆变换可导出该力学模型的本构关系为

$$\sigma + P_1 \dot{\sigma} = q_0 \varepsilon + q_1 \dot{\varepsilon} \quad (2)$$

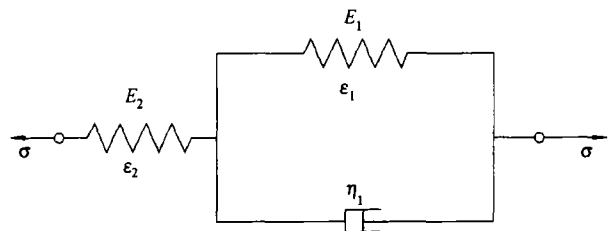


图 1 止水材料三参量固体模型

Fig. 1 Three-parametric solid model of water-stop material

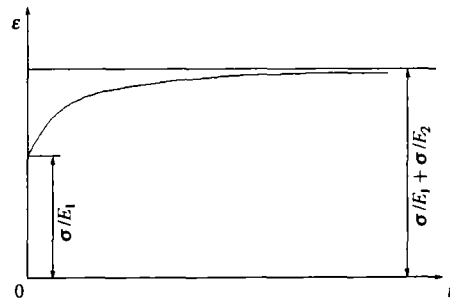


图 2 止水材料三参量蠕变曲线

Fig. 2 Three-parametric creep curve of wafer-stop material

[收稿日期] 2005-12-19; 修回日期 2006-12-06

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(50679059)

[作者简介] 刘礼华(1963-), 男, 江西武宁县人, 工学博士, 武汉大学副教授, 主要从事结构检测与力学分析研究

式中各物理参量为 $P_1 = \eta_1 / (E_1 + E_2)$; $q_0 = E_1 E_2 / (E_1 + E_2)$; $q_1 = E_2 \eta_1 / (E_1 + E_2)$ 。

由橡胶本构方程(2)继续作拉普拉斯变换与逆变换,可导出橡胶材料的蠕变过程及松弛过程的表达式为

$$\varepsilon(t) = \left[\frac{P_1}{q_1} e^{-\frac{q_0}{\eta_1 t}} + \frac{1}{q_0} (1 - e^{-\frac{q_0}{\eta_1 t}}) \right] \sigma_0 \quad (3)$$

$$\sigma(t) = \left[\frac{q_1}{P_1} e^{-\nu/P_1} + q_0 (1 - e^{-\nu/P_1}) \right] \varepsilon_0 \quad (4)$$

令

$$J(t) = \left[\frac{P_1}{q_1} e^{-\frac{q_0}{\eta_1 t}} + \frac{1}{q_0} (1 - e^{-\frac{q_0}{\eta_1 t}}) \right] = \frac{1}{E_2} + \frac{1}{E_1} (1 - e^{-\frac{E_1}{\eta_1 t}}) = a_0 + b_0 (1 - e^{-r}) \quad (5)$$

$$Y(t) = \left[\frac{q_1}{P_1} e^{-\nu/P_1} + q_0 (1 - e^{-\nu/P_1}) \right] = E_2 - \frac{E_2^2}{E_1 + E_2} (1 - e^{-\frac{E_1 + E_2}{\eta_1}}) = c_0 - d_0 (1 - e^{-p}) \quad (6)$$

式中 $a_0 = 1/E_2$; $b_0 = 1/E_1$; $r = E_1/\eta_1$; $c_0 = E_2$; $d_0 = E_2^2/(E_1 + E_2)$; $p = (E_1 + E_2)/\eta_1$; $J(t)$, $Y(t)$ 分别称为橡胶的蠕变柔量和松弛模量,它们是时间的函数,并且

$$\varepsilon(t) = J(t) \sigma_0 \quad (7)$$

$$\sigma(t) = Y(t) \varepsilon_0 \quad (8)$$

式中 σ_0, ε_0 为止水材料的初始应力和应变。

以上是材料单轴拉压时的流变关系,止水材料扭剪时也可采用类似办法确定流变关系,求其流变参量。

3 工程应用

3.1 工程背景

国内某拟建水电站底孔闸门采用伸缩式止水装置,要求止水元件材料能够承受 160 m 以上的水压力。该止水装置由橡胶止水元件、刚性座板、刚性压板及闸门面板等构成。刚性压板将止水元件固定于座板上,座板与止水元件之间形成充水腔。止水元件是止水装置设计的关键,止水元件采用“山”字型断面,由翼头、封头和肢体(含肢臂)三部分构成。为了改善封水效果,配合止水元件各构成部分工作特点的需要,翼头、封头和肢体分别采用国内生产的 A, B, C 三种不同硬度和弹性的改性橡胶材料。

3.2 粘弹性试验

通过测试橡胶的压缩蠕变,从而获得材料粘弹

性特性。试验用材料为 A, B, C 三种改性橡胶,试件为 22 mm(直径) × 12.5 mm(厚)圆形,压载面积为 380 mm²。实试验条件:初始压载 $p_0 = 900$ N, 初始应力 $\sigma_0 = p_0/s \approx 2.369$ MPa(接近最大工作应力), 三种橡胶试样的初始应变分别为 $\varepsilon_A = 0.330$, $\varepsilon_B = 0.274$, $\varepsilon_C = 0.423$ 。试验结果见表 1。

表 1 A, B, C 三种水封橡胶压载作用下不同时刻的应变值(ε_t)

Table 1 Strain value of three sealing rubber at different time under loading

时间/h	材料		
	A	B	C
0	0.330	0.274	0.423
0.5	0.345	0.286	0.476
6	0.369	0.318	0.497
24	0.377	0.323	0.502
48	0.381	0.337	0.514
72	0.384	0.342	0.518
96	0.385	0.346	0.526
240	0.398	0.362	0.546
432	0.400	0.367	0.550
648	0.402	0.377	0.550
768	0.404	0.381	0.551
888	0.404	0.382	0.552
1 008	0.404	0.382	0.554
1 128	0.408	0.385	0.558
1 248	0.412	0.387	0.562
1 368	0.413	0.389	0.564
1 488	0.418	0.390	0.571
1 608	0.418	0.391	0.572
1 776	0.419	0.392	0.573

3.3 试验成果

$\{\varepsilon_i\}$, $\{t_i\}$ 为试验数据的对应列阵,由式(6),用最小二乘原理,对试验数据进行曲线拟合,过程如下:

$$\|\delta\|^2 = \|\Delta\varepsilon\|^2 = (\Delta\varepsilon)^T \Delta\varepsilon = (\{\varepsilon_i\} - \{J(t_i)\} \sigma_0)^T (\{\varepsilon_i\} - \{J(t_i)\} \sigma_0) \quad (9)$$

对式(9)隐含在 J 中的未知数 p_1, q_0, q_1 分别求导数,并令其结果等于零,由此三个方程根据蠕变试验数据联解求出 p_1, q_0, q_1 ,再据此求得三种橡胶材料的流变参量,将流变参量代入式(3)、式(4)即可得到橡胶材料的蠕变和松弛规律表达式,如表 2 所示。由表 2 中的表达式可计算出材料在初始时刻和最终的蠕变量和应力松弛量,如表 3 所示。

表2 A,B,C 三种水封橡胶流变参量和流变公式

Table 2 Rheology parameter and rheology formula of three sealing rubber

材料	E_2/MPa	E_1/MPa	$\eta_1/\text{MPa} \cdot \text{d}^{-1}$	蠕变公式	松弛公式
A	3.274 24	7.836 17	26 120.57	$\epsilon_t = 0.524 7(1 - 0.294 7e^{-0.000 3t})$	$\sigma_t = 2.369(0.705 3 + 0.294 7e^{-0.000 4t})$
B	3.791 6	9.000 57	15 000.95	$\epsilon_t = 0.454 2(1 - 0.296 4e^{-0.000 6t})$	$\sigma_t = 2.369(0.703 6 + 0.296 4e^{-0.000 9t})$
C	2.437 93	7.788 28	15 576.56	$\epsilon_t = 0.652 6(1 - 0.238 4e^{-0.000 5t})$	$\sigma_t = 2.369(0.761 6 + 0.238 4e^{-0.000 7t})$

表3 A,B,C 三种水封橡胶蠕变量与松弛量

Table 3 Creep deformation value and stress relaxation value of three sealing rubber

材料	ϵ_0	σ_0/MPa	ϵ_∞	σ_∞/MPa	$\epsilon_\infty/\epsilon_0$	σ_∞/σ_0	蠕变率/%	松弛率/%
A	0.330	2.369	0.524 7	1.671	1.590	0.705	59.0	29.5
B	0.274	2.369	0.454 2	1.667	1.658	0.704	65.8	29.6
C	0.423	2.369	0.652 6	1.804	1.543	0.762	54.3	23.8

由表3可知,当材料的应力值保持不变时,A,B,C 三种橡胶试件最终蠕变量分别为初应变的59.0%、65.8%和54.3%;当材料的应变值保持不变时,三种橡胶试件最终应力松弛量分别为初应力的70.5%、70.4%和76.2%。

3.4 基本结论

1) 同一试件的蠕变随时间增长而不断增加,但增大幅度逐渐缓慢。不同材质试件的蠕变量是不同的,同一应力水平时,弹性模量小的试件相对蠕变量大,即C橡胶材料的蠕变量最大。

2) 由试验结果可以看出,橡胶的蠕变现象极为显著,曲线变化呈幂指数形式,当 $t \rightarrow \infty$ 时, ϵ_t/ϵ_0 有

一条渐近线。并且A,B,C 三种橡胶的应变和蠕变的变化规律极为相似。

3) A,B,C 三种橡胶长时间受载会产生一定量的蠕变变形,止水装置设计时必须考虑这一变形特点。

参考文献

- [1] 扬挺青. 粘弹性力学 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990. 15~19
- [2] 周光泉, 刘孝敏编著. 粘弹性力学 [M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 1996. 20~23
- [3] 李德海, 王东攀, 高保彬. 围岩粘弹性模型有限元模拟分析 [J]. 矿冶工程, 2005, 2(1): 1~8

Viscoelasticity of Water-stop Rubber Based on Three-parametric Rheology Model

Liu Lihua, Xiong Wei, Zhang Hongzhi, Zhang Qingjiang

(School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

[Abstract] This thesis provided the basic expression formula for viscoelasticity of water-stop rubber based on the three-parametric rheology model. Combining the viscoelastic test of some high-head gate water-stop materials, the rheology parameter was achieved. The thesis pointed out the laws of change of creep deformation and stress relaxation and offered the reference for engineering design.

[Key words] high-head gate; rubber; viscoelasticity; rheology