

对式(20)两边除以裂隙初始宽度 b_0 (b_0 近似取 $T = 0, \alpha_3 = 0$ 时的值, 即 $b_0 \approx 5.5 \times 10^{-7} \text{m}$), 则可得裂隙结构面的总应变增量形式为

$$d\varepsilon = -d\varepsilon_0(T) + d\varepsilon_1(\alpha_3, T) + d\varepsilon_p(T) + d\varepsilon_0(\alpha_3, T) - d\varepsilon_q - d\varepsilon_i\left(\frac{\partial p}{\partial z}, \frac{\partial T}{\partial z}\right) \\ = -\left|\frac{1}{\alpha_1(T)} + \frac{1}{\alpha_2(T)}\right| d\alpha_3 + [\alpha_3(\alpha_3) - \alpha_4]dT + \alpha_5(T)dp - \frac{1}{\alpha_6(T)}d\Theta - \alpha_7\left(\frac{\partial p}{\partial z}, \frac{\partial T}{\partial z}\right)dt \quad (21)$$

式中 $\alpha_1(T)$ 为温度 T 时裂隙结构面应力为 α_3 处的切线模量(Pa), 由式(6)及 b_0 经拟合出的表达式为

$$\alpha_1(T) = 896.37 + 2.194T - 0.0028T^2 + 2.622 \times 10^{-5}T^3 \quad (22)$$

$\alpha_2(T)$ 为 T 温度时由岩石在 α_3 作用下引起的裂隙结构面变形的虚拟切线模量(MPa), 其值由 Δb_0 的分解式给出, 即

$$\Delta b_0 = \frac{\pi D(1+\nu)}{4E(T)}d\alpha_3 - \frac{\pi D\nu}{4E(T)}d\Theta \quad (23)$$

其中 $\Theta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$ 。这样 $\alpha_2(T)$ 的表达式为

$$\alpha_2(T) = 5.02 + 8.99 \times 10^{-3}T - 5.44 \times 10^{-5}T^2 + 4.40 \times 10^{-9}T^3 \quad (24)$$

$\alpha_3(\alpha_3)$ 为由岩石瞬态热应变, 由式(18)及 b_0 经拟合出的表达式为

$$\alpha_3(\alpha_3) = 0.9496 + 2.10 \times 10^{-8}\alpha_3 \quad (25)$$

α_4 为自由状态下 ($\sigma = 0$), 岩石的热膨胀引起的裂隙结构面在温度 T 时的虚拟切线膨胀系数, 即

$$\alpha_4 = \frac{\pi D\alpha_r}{4b_0} = 0.9496 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (26)$$

$\alpha_5(T)$ 为岩石在动水压力作用下变形引起的裂隙结构面变形的温度 T 时的水压虚拟影响系数(Pa^{-1}), 由 Δb_p 及 b_0 经拟合得

$$\alpha_5(T) = (2.32 - 2.87 \times 10^{-3}T - 1.33 \times 10^{-5}T^2 + 9.53 \times 10^{-9}T^3) \times 10^{-7} \quad (27)$$

$\alpha_6(T)$ 为岩石在体力 Θ 作用下变形引起的裂隙结构面变形的虚拟体积模量(MPa), 其值确定如下:

$$\alpha_6(T) = 26.83 + 0.048T - 2.91 \times 10^{-4}T^2 + 2.40 \times 10^{-7}T^3 \quad (28)$$

$\alpha_7\left(\frac{\partial p}{\partial z}, \frac{\partial T}{\partial z}\right)$ 为裂隙结构面因水压梯度、温度梯度引起的抽象变形速率(m/s), 其值由 Δb_i 确定。文献[3]给出

$$\frac{\partial c_{\text{SiO}_2}}{\partial T} = 6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}, \frac{\partial c_{\text{SiO}_2}}{\partial p} = 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}, \text{ 则有} \\ \alpha_7\left(\frac{\partial p}{\partial z}, \frac{\partial T}{\partial z}\right) = 3.66 \times 10^{-8} \frac{\partial T}{\partial z} + 6.09 \times 10^{-15} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (29)$$

从上述讨论可知, 裂隙结构面本身的抗压变形起着决定作用, 在本文的流量条件下, 抽象变形影响最小。

5 结 语

通过单、正交裂隙花岗岩的试验, 研究了高温、高压下的裂隙岩体渗透特性, 给出了岩体裂隙的温度-应力-水力耦合本构关系式。本构关系可以为裂隙岩体的 THM 耦合分析提供合理的依据。

本项课题的实验研究部分得到国家地震局地质研究所地球构造实验室赵树清等同志的大力协助, 特此表示感谢!

参考文献:

- [1] 许锡昌. 温度作用下三峡花岗岩力学性质及损伤特性初步研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1998.
- [2] 作彦卿. 岩体水力学基础(二)[J]. 水文地质工程地质, 1997(1): 24~18.
- [3] Martin J T, et al. On thermoelasticity and silica precipitation in hydrothermal systems: numerical modeling of laboratory experiments[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(B6): 12095~12107.
- [4] 刘亚晨. 核废料贮存裂隙岩体水热耦合迁移及其与应力的耦合分析[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2000.

润扬大桥 12000 t 试桩顺利结束

润扬大桥南汊桥为单孔双铰钢箱梁悬索桥, 主跨 1490 m, 为目前中国第一、世界第三。主塔桩基采用 2.8 m 深 60~79 m 钻孔灌注桩, 其单桩极限承载力高

达 12000 t, 采用东南大学土木工程学院专利技术“桩承载力自平衡测试法”进行。测试成果为大桥桩基的设计提供了科学依据。

(龚维明 供稿)