

宁夏膨胀土膨胀变形的速率过程参数的确定

徐永福

(上海隧道工程股份公司 上海 200233)

摘 要 运用速率过程理论,研究了非饱和膨胀土的膨胀变形特征.根据速率过程理论,证明了膨胀土膨胀变形速率与时间在双对数坐标上呈直线相关.膨胀变形速率的对数与剪应力呈直线相关;膨胀变形量是时间的幂函数,或是时间的对数函数,取决于 $\dot{\epsilon} \sim t$ 直线的斜率.宁夏膨胀土的膨胀变形试验结果验证了本文的理论结果.

关键词 非饱和土 膨胀土 速率过程理论

中图号 TU443

速率过程理论最初是 Eyring^[1]提出的,已被广泛应用于研究土的蠕变、固结变形,以及其它与时间有关的变形行为^[2].膨胀土的膨胀变形是时间的函数^[3],因此速率过程理论同样可以用来描述膨胀变形行为.本文的尝试得到了宁夏膨胀土的膨胀变形试验的验证.

1 速率过程理论

速率过程理论是研究粒子在一定力场内,取决于时间的变形行为.粒子的变形行为取决于活化能的大小,粒子活化频率定义为

$$f = \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{\Delta F}{NkT}\right) \tag{1}$$

其中

$$Nk = R$$

式中: k ——Boltzmann 常数; h ——Planck 常数; T ——绝对温度, K; ΔF ——活化能; N ——Avogadro 常数; R ——气体常数.在剪应力方向的活化能为

$$f^{\uparrow} = \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{\Delta F/N - \tau\lambda/2}{kT}\right) \tag{2}$$

而在 τ 的反相方向上,粒子的活化能为

$$f^{\downarrow} = \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{\Delta F/N + \tau\lambda/2}{kT}\right) \tag{3}$$

在剪切力 τ 的作用下,粒子活化频率的净增量为

$$\Delta f = f^{\uparrow} - f^{\downarrow} = \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{\Delta F}{RT}\right) \sinh\left(-\frac{\tau\lambda}{2kT}\right) \tag{4}$$

活化粒子并不是全部都能越过势垒,并在给定方向上产生 λ' 位移.令 κ 为成功越过势垒并产生位移 λ' 的粒子数占活化粒子的比例,应变速率是单位时间内粒子在单位长度上的位移,则膨胀土的膨胀变形速率

$$\dot{\epsilon} = \kappa\lambda' \Delta f = \chi \frac{2kT}{h} \exp\left(-\frac{\Delta F}{RT}\right) \sinh\left(\frac{\tau\lambda}{2kT}\right) \tag{5}$$

其中

$$\chi = \kappa\lambda'$$

Mitchell^[2]认为,对于大多数变形问题, $\frac{\tau\lambda}{2kT} > 1$,则有

$$\sinh(\frac{\tau\lambda}{2kT}) \approx \frac{1}{2} \exp(\frac{\tau\lambda}{2kT}) \tag{6}$$
$$\dot{\epsilon} = \chi \frac{kT}{h} \exp(-\frac{\Delta F}{RT}) \exp(\frac{\tau\lambda}{2kT}) \tag{7}$$

膨胀土的膨胀变形速率随时间衰减,类似于土的蠕变. 膨胀速率随时间的变化可以表示为

$$\ln[\frac{\dot{\epsilon}(t,D)}{\dot{\epsilon}(t_0,D)}] = -m \ln(\frac{t}{t_0}) \tag{8}$$

式中 : D ——应力强度 ; m ——常数 ; t ——时间单位,令 $t = 1 \text{ min}$. $\dot{\epsilon}(t_0, D)$ 可以用式(7)表示,则

$$\dot{\epsilon} = \chi \frac{kT}{h} \exp(-\frac{\Delta F}{RT}) \exp(\frac{\tau\lambda}{2kT}) t^{-m} = K_0 \exp(K_2 \tau) t^{-m} \tag{9}$$

其中

$$K_0 = \chi \frac{kT}{h} \exp(-\frac{\Delta F}{RT})$$
$$K_2 = \frac{\lambda}{2kT}$$

可以看出, K_2 是直线 $\lg \dot{\epsilon} \sim \tau$ 的斜率 ; m 是直线 $\lg \dot{\epsilon} \sim \lg t$ 的斜率的绝对值 ; $K_0 = \dot{\epsilon}(t = 1, \tau = 0)$. 根据式(9)可以得到膨胀变形的表达式

$$\epsilon = \int \dot{\epsilon} dt = K_0 e^{K_2 t} \frac{t^{-m} - t_0^{-m}}{1 - m} \quad (m \neq 1) \tag{10}$$

$$\epsilon = \int \dot{\epsilon} dt = K_0 e^{K_2 t} (\ln t - \ln t_0) \quad (m = 1) \tag{11}$$

2 膨胀变形的试验结果

宁夏膨胀土的膨胀变形试验是在轻便压缩仪上完成的. 膨胀土的干密度分别为 1.61 g/cm^3 和 1.51 g/cm^3 ,含水量分别为 17.3% 和 25.3% . 压力是在膨胀变形前一次性加上的,每个试验的压力分别为 10 kPa , 20 kPa , 30 kPa , 40 kPa 和 50 kPa . 水是从土样底部单向浸入的,加水的同时开始计时.

图 1 表示了膨胀变形速率与时间在双对数坐标上的关系. 从图中可以看出,直线的斜率 m 与土样的干密度和含水量相关. 图 2 表示了膨胀速率的对数与压力的关系. 图中表明, K_2 值随土样的干密度和含水量的变化而变化. 图 3 表示了膨胀变形与时间的关系. 从图中可以看出,式(10)估算的结果与实测结果符合得较好. 由膨胀变形试验测得的参数 K_0 , K_2 和 m 列于表 1 中.

表 1 宁夏膨胀土样的初始状态和膨胀变形参数

Table 1 Initial physical indexes and parameters of swelling deformation

干密度 ρ_d /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水量 w_0 /%	压力 P /kPa	K_0	K_2	m
1.61	17.3	10	0.462	0.008	0.56
1.51	17.3	10	0.496	0.012	0.60
1.61	25.3	10	0.402	0.012	0.58

3 结 论

速率过程理论成功地描述了膨胀土的膨胀变形行为,为解释膨胀变形的试验结果提供了理论依据.

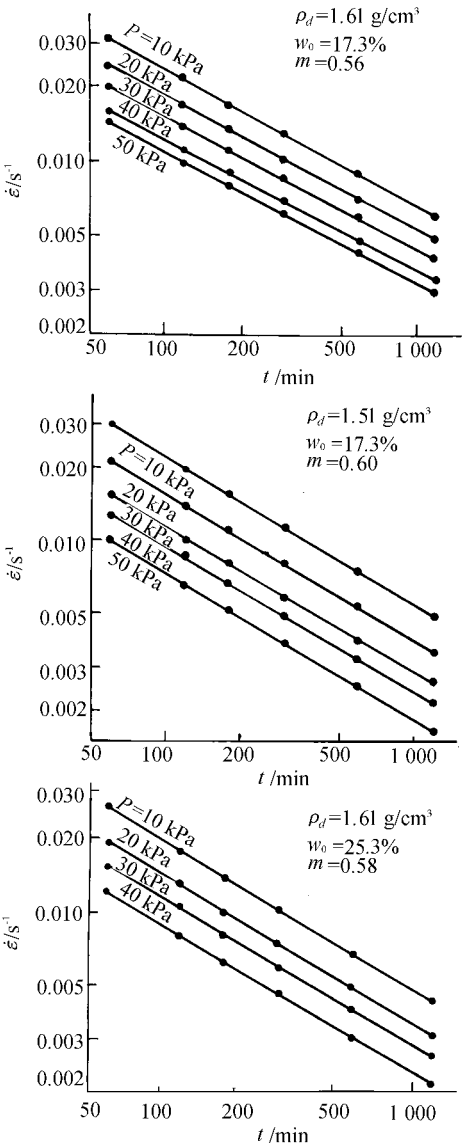


图1 宁夏膨胀土的膨胀变形速率与时间的关系

Fig.1 Relationship between rate of swelling deformation and time

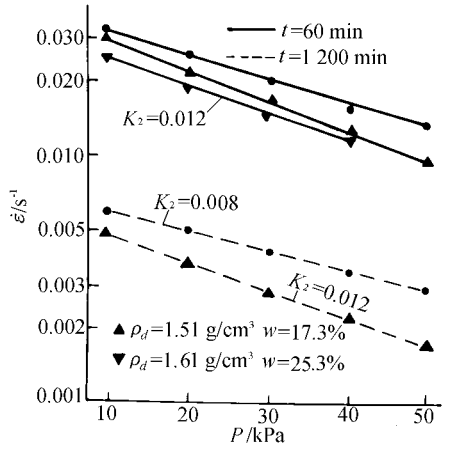


图2 宁夏膨胀土的膨胀变形速率与压力的关系

Fig.2 Relationship between rate of swelling deformation and overpressure

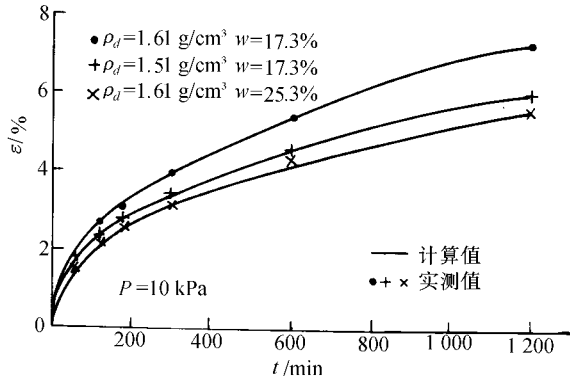


图3 宁夏膨胀土的膨胀变形与时间的关系

Fig.3 Relationship between swell and time

参 考 文 献

1 Glasstone S, Laidler K, Eyring H. The theory of rate process. New York: McGraw-Hill Book Co Inc, 1941. 1 ~ 10
2 Singh A, Mitchell J K. General stress-strain-time function for soils. J Soil Mech and Found Div, 1968, 94(1): 21 ~ 46
3 徐永福, 殷宗泽. 宁夏膨胀土的膨胀变形特征的试验研究. 水利学报, 1997(9): 27 ~ 30

Parameter Determination by Rate Process Theory for Swelling Deformation of Ningxia Expansive Soil

Xu Yongfu

(Shanghai Tunnel Engineering Co Ltd, Shanghai 200233)

Abstract The swelling deformational character is studied by use of the rate process theory in this paper. It is shown that there is a linear relation between the logarithm of the swelling rate and the logarithm of time, and a linear relation between the logarithm of the swelling rate and shear stress; and the swell is a power function or a logarithm function of time, depending on the slope of line $\dot{\epsilon} \sim t$. The theoretical results are verified by the test results of Ningxia expansive soil.

Key words unsaturated soil; expansive soil; rate process theory