

冻土蠕变过程的微结构损伤理论*

苗天德 魏雪霞

(兰州大学力学系, 兰州 730000)

张长庆

(中国科学院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000)

摘要 从现代损伤力学观点研究了冻土蠕变同其微结构变化的关系。在蠕变实验和微结构观测研究的基础上, 选择了描述冻土微结构变化的损伤内变量, 建立了内变量演化方程及冻土蠕变的一般损伤理论。这一理论可同时描述蠕变过程中的“强化”现象和“弱化”现象。还对单向压缩情形进行了具体计算并与实验结果进行了比较。

关键词 冻土 蠕变 微结构 损伤力学

迄今为止在宏观水平上以实验数据为基础对冻土蠕变的研究虽已有半个世纪的历史^[1, 2], 但从微观角度出发, 根据蠕变过程冻土微结构变化确定其宏观规律, 即将宏观与微观结合起来研究冻土蠕变的工作却很少。1967年以来, 原苏联学者维亚诺夫等^[3]在实验基础上引入了定性表征冻土微结构损伤的初步概念, 此后这方面的研究没有重大突破。我国关于冻土蠕变过程微结构变化及其机理的研究尚属空白。

1991年以来我们从实验和理论两方面对上述问题进行了研究。基于所做的冻土和多晶冰的系列蠕变试验, 应用“复形-电镜”方法对冻土微结构的观测(研究成果另文发表), 并总结前人的有关研究成果, 作者认为冻土中冰的胶结粘聚力, 在载荷作用下矿物颗粒的重新定向以及微裂纹的萌生和扩展控制着冻土的整个蠕变过程。由此在理论上借助于当代损伤力学处理问题的框架, 引入了冻土蠕变的耗散势, 并将其构造为含冰量、颗粒定向因子以及面积损伤因子等表征微结构变化的内变量的函数, 建议了一个用一般应力分量表示的有单一表达式的屈服条件, 从而建立了冻土蠕变的三维损伤演化方程, 提出了单轴蠕变过程各阶段过渡的判据, 获得了相应的长期强度方程, 并将得到的理论曲线与实验曲线比较, 两者具有良好的一致性。本文的结果实现了在理论上同时描述冻土蠕变过程的“强化”和“弱化”现象。

1 连续损伤力学的基本方程

作为连续介质处理的冻土的力学问题, 应满足以下力学和热力学方程:

1994-04-03 收稿, 1994-08-12 收修改稿

* 国家自然科学基金资助和冻土工程国家重点实验室基金资助项目

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\rho v_k)_{,k} = 0, \text{ (质量守恒)} \quad (1)$$

$$\sigma_{kl,l} + \rho(f_k - \dot{v}_k) = 0, \text{ (动量平衡)} \quad (2)$$

$$\sigma_{kl} = \sigma_{lk}, \text{ (动量矩平衡)} \quad (3)$$

$$\rho \dot{e} - \sigma_{kl} d_{lk} - q_{k,k} = 0, \text{ (能量守恒, 无热源)} \quad (4)$$

$$\rho \dot{\eta} - (q_k/\theta)_{,k} \geq 0, \text{ (熵增原理)} \quad (5)$$

式中, ρ —— 质量密度, v_k —— 位移速度矢量, ($k=1, 2, 3$), σ_{kl} —— 应力张量的分量, f_k —— 体力密度分量, d_{kl} —— 应变速率张量的分量, ($d_{kl} = \frac{1}{2}(v_{k,l} + v_{l,k}) = \dot{\epsilon}_{kl}$), q_k —— 热流矢量的分量, e —— 内能密度, η —— 熵生密度, θ —— 绝对温度.

另外 $(\cdot) = \frac{d}{dt}(\cdot)$ 表示某量关于时间的全微商, $(\cdot)_{,k} = \frac{\partial}{\partial X_k}(\cdot)$ 表示对空间坐标 X_k 的偏微商.

$$\text{引入自由能} \quad \varphi = e - \theta \eta, \quad (6)$$

并假定 φ 是弹性应变 ϵ_{kl}^e , 温度 θ 及损伤内变量 α_i 的函数, 即

$$\varphi = \varphi(\epsilon_{kl}^e, \theta, \alpha_i). \quad (7)$$

将(6), (7)式代入(5)式, 并利用(4)式, 可得

$$-\rho \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \theta} + \eta \right) \dot{\theta} + \left(\sigma_{kl} - \rho \frac{\partial \varphi}{\partial \epsilon_{kl}^e} \right) \dot{\epsilon}_{kl}^e + \sigma_{kl} \dot{\epsilon}_{kl}^p - \rho \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha_i} \dot{\alpha}_i + \frac{1}{\theta} q_k \theta_{,k} \geq 0. \quad (8)$$

上式推导中利用了关系式

$$\dot{\epsilon}_{kl} = \dot{\epsilon}_{kl}^e + \dot{\epsilon}_{kl}^p \quad (9)$$

式中 ϵ_{kl}^p 表示塑性应变. 注意到 $\varphi, \eta, \sigma_{kl}, q_k$ 与 $\dot{\theta}, \dot{\epsilon}_{kl}^e$ 及 $\theta_{,k}$ 无关 (但 $\dot{\epsilon}_{kl}^p$ 和 $\dot{\alpha}_i$ 不是独立本构自变量), 则不等式(8)的满足等价于要求

$$\left. \begin{aligned} q_k &= 0 \text{ (无热传导),} \\ \eta &= -\frac{\partial \varphi}{\partial \theta}, \\ \sigma_{kl} &= \rho \frac{\partial \varphi}{\partial \epsilon_{kl}^e} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

和

$$\sigma_{kl} \dot{\epsilon}_{lk}^p + A_i \dot{\alpha}_i \geq 0, \quad (11)$$

$$\text{式中} \quad A_i = -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha_i}. \quad (12)$$

σ_{kl}, A_i 是热力学广义力, $\dot{\epsilon}_{kl}^p, \dot{\alpha}_i$ 是热力学广义应变率. 对(11)式的处理方法为取耗散势函数

$$F = F(\sigma_{kl}, A_i). \quad (13)$$

按(11)式的要求, (13)式表示的超曲面应是一个凸曲面, 故有

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{kl}^p &= \lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{kl}}, \\ \dot{\alpha}_i &= \lambda \frac{\partial F}{\partial A_i}, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中 λ 系标量乘子.

(14) 式给出了塑性应变 ε_{kl}^p 及损伤内变量 α_i 的演化方程.

2 选择描述冻土蠕变微结构变化的损伤内变量

根据对冻土蠕变过程中微结构变化的观测结果, 并参考前人的研究工作^[3], 基于用尽可能少的损伤内变量刻画出冻土蠕变过程中微结构变化的主要特征的原则, 选取了以下 3 个损伤内变量:

(1) 多晶冰的胶结粘聚力在很大程度上制约着冻土的蠕变变形, 故选取含冰量

$$\xi^{(i)} = \rho^{(i)} / \rho \quad (15)$$

作为损伤内变量之一, 且记 $\xi^{(i)} = \alpha_1$.

其中, ρ —冻土的质量密度, $\rho^{(i)}$ —单位冻土体积中所含冰的质量.

(2) 在荷载作用下冻土内部存在着大量微裂纹的萌生和扩展及土颗粒的重新定向现象, 前者使冻土的有效承载面积减小, 导致承载能力降低; 后者则导致冻土结构的各向异性. 为此引入

$$\omega = 1 - \frac{A_\omega}{A_0} \quad (\text{称面积损伤因子, 记为 } \alpha_3), \quad (16)$$

$$\Omega = 1 - \frac{A_\Omega}{A_0} \quad (\text{称颗粒定向因子, 记为 } \alpha_2) \quad (17)$$

作为另外两个损伤内变量. 上式中, A_ω —实际有效承载面积, A_Ω —未定向颗粒所占面积, A_0 —初始面积, 与 α_i ($i=1, 2, 3$) 对应的广义力 A_i 分别改记为

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \pi \quad (\text{对应 } \alpha_1 = \xi^{(i)}), \\ A_2 &= A \quad (\text{对应 } \alpha_2 = \Omega), \\ A_3 &= B \quad (\text{对应 } \alpha_3 = \omega). \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

3 建议岩土介质的一个屈服准则

由于计算耗散势函数的需要, 作者建议了一个用一般应力分量表示的, 有单一表达式的屈服准则. 此准则在纯拉伸和纯压缩应力状态下分别与 Coulomb 准则重合. 建议的岩土介质的屈服函数

$$G = \bar{\sigma} + h J'_3 / \bar{\sigma}^3 + \alpha J_1 - H, \quad (19)$$

其中, α 是一个反映冻土压缩(膨胀)特性的物质常数.

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= \sqrt{3J'_2} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum (S_i - S_j)^2}, \quad J'_3 = |S_{ij}|, \quad J_1 = \frac{1}{3} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}), \quad h = \frac{81C \sin\varphi \cos\varphi}{9 - \sin^2\varphi}, \\ H &= \frac{18C \cos\varphi}{9 - \sin^2\varphi}. \end{aligned}$$

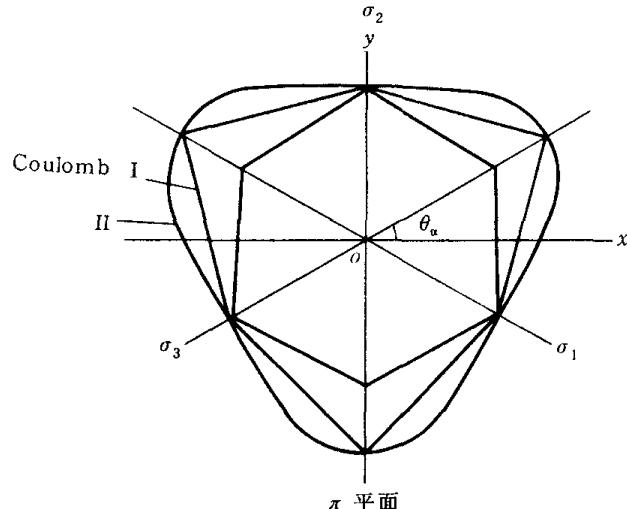


图 1 屈服条件

II——本文

上式中 S_i 为偏应力张量 S_{ij} 的主值, C 为岩土介质的粘聚力, φ 为内摩擦角. (19) 式表达的屈服函数在 π 平面上的屈服面形状如图 1 所示.

4 冻土蠕变损伤演化方程的具体表达

(13) 式表示的 F 函数通常由两部分组成^[4]: 一部分表达粘塑性变形的影响, 用 $F_1(G)$ 表示. 另一部分是随动强化内应力 $\underline{\chi}$ 所带来的效应, 与粘塑性变形无关, 用 $F_2(\bar{\chi})$ 表示. $\bar{\chi}$ 为随动硬化的内应力强度, $\bar{\chi} = \sqrt{3J'_2(\chi)}$.

由于冻土在发生塑性变形之前先发生粘性流动, 故耗散势 F 应具有形式

$$F = F_1(G(\sigma - \underline{\chi}))H(G(\sigma - \underline{\chi})) + F_2(\bar{\chi}), \quad (20)$$

式中, $H(\cdot)$ 为 Heaviside 单位阶跃函数.

具有广泛适应性的一种 F_1 和 F_2 的函数形式为幂次函数, 即

$$F_1(G) = \frac{N}{n+1} \left(\frac{G}{N} \right)^{n+1}, \quad (21)$$

$$F_2(\bar{\chi}) = \frac{M}{m+1} \left(\frac{\bar{\chi}}{M} \right)^{m+1}, \quad (22)$$

式中, N , M , n 和 m 均是与温度有关的材料常数.

为了具体构造出耗散势函数, 特作以下假定:

(1) 冻土的粘聚力 C 受冰控制, 与含冰量有关, 同时因 ω 的增大而减小, 故 C 是 $\xi^{(i)}$ 和 ω 的函数, 但由实验知 C 与 Ω 无关, 故不妨设

$$C = C_0(1-\omega) \frac{\xi_0^{(i)}}{b+1} \left(\frac{\xi^{(i)}}{\xi_0^{(i)}} \right)^{b+1}, \quad (23)$$

式中 C_0 ——初始粘聚力, $\xi_0^{(i)}$ ——初始含冰量, b ——与温度有关的冻土材料常数.

(2) 颗粒重新定向后引起塑性流动的各向异性, 即引起屈服面中心矢量 $\underline{\chi}$ 的变化, 则 $\underline{\chi} = \underline{\chi}(\Omega)$, 同时摩擦角 φ 也因此而发生变化, 故 φ 是 Ω 的函数但与 $\xi^{(i)}$ 及 ω 无关. 即

$$\varphi = \varphi(\Omega) = \varphi(\bar{\chi}). \quad (24)$$

(3) 与含冰量 $\xi^{(i)}$ 对应的广义力 π 相当于一个热力学压力, 它对耗散势函数的影响可考虑为将屈服函数 G 的表达式 (19) 修改为

$$G = \bar{\sigma} + \alpha(J_1 - \pi) + hJ'_3/\bar{\sigma}^3 - H. \quad (25)$$

(4) 为简化计算, 广义力与损伤内变量之间的关系经分析可以表示成如下形式:

$$\left. \begin{array}{l} \pi = \pi(\xi^{(i)}, \omega), (\text{与 } \Omega \text{ 无关}) \\ A = \bar{\chi}(\Omega), (\text{仅与 } \Omega \text{ 有关}) \\ B = -a \left(\frac{C}{C_0} \right) (1-\omega) \text{sign}(\omega), \end{array} \right\} \quad (26)$$

式中, $a > 0$ 为冻土材料常数.

利用以上假定, 以(20)~(26)式代入(14)式, 经整理可得冻土蠕变的三维损伤演化方程

$$\dot{\epsilon}_{kl}^p = \left\{ \lambda \left(\frac{G}{N} \right)^n \left[\frac{3}{2} (1 - 3h\bar{\sigma}^{-4}J'_3)\bar{\sigma}^{-1}S_{kl} + \left(\alpha + \frac{h}{9}\bar{\sigma}^{-1} \right) \delta_{kl} \right. \right. \\ \left. \left. + h(2 - \delta_{kl})\bar{\sigma}^{-3}(J'_3)_{kl} \right] \right\}_{\sigma \rightarrow \tilde{\sigma}} , \quad (27)$$

式中, $(J'_3)_{kl}$ 表示 J'_3 关于 S_{kl} 的代数余子式, $(\quad)_{kl}$ 表示关于 k, l 指标不求和, 而 $\{ \quad \}_{\sigma \rightarrow \tilde{\sigma}}$ 则表示将相应公式中的 σ 置换为 $\tilde{\sigma} - \chi$ (以下同).

$$\dot{\xi}^{(i)} = \left\{ \lambda \left(\frac{G}{N} \right)^n \left[-\alpha + \left(\frac{\partial h}{\partial \xi^{(i)}} J'_3 \bar{\sigma}^{-3} - \frac{\partial H}{\partial \xi^{(i)}} \right) \frac{\partial \xi^{(i)}}{\partial \pi} \right. \right. \\ \left. \left. + \left(\frac{\partial h}{\partial \omega} J'_3 \bar{\sigma}^{-3} - \frac{\partial H}{\partial \omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial \pi} \right] \right\}_{\sigma \rightarrow \tilde{\sigma}} , \quad (28)$$

式中

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial h}{\partial \xi^{(i)}} = \frac{81C_0 \sin \varphi \cos \varphi}{9 - \sin^2 \varphi} (1 - \omega) \left(\frac{\xi^{(i)}}{\xi_0^{(i)}} \right)^b , \\ \frac{\partial H}{\partial \xi^{(i)}} = \frac{18C_0 \cos \varphi}{9 - \sin^2 \varphi} (1 - \omega) \left(\frac{\xi^{(i)}}{\xi_0^{(i)}} \right)^b , \\ \frac{\partial h}{\partial \omega} = -\frac{81C_0 \sin \varphi \cos \varphi}{9 - \sin^2 \varphi} \cdot \frac{\xi_0^{(i)}}{b+1} \cdot \left(\frac{\xi^{(i)}}{\xi_0^{(i)}} \right)^{b+1} , \\ \frac{\partial H}{\partial \omega} = -\frac{18C_0 \cos \varphi}{9 - \sin^2 \varphi} \frac{\xi_0^{(i)}}{b+1} \left(\frac{\xi^{(i)}}{\xi_0^{(i)}} \right)^{b+1} . \end{array} \right\} \quad (29)$$

$$\dot{\omega} = \left\{ \frac{\lambda}{C} \left(\frac{G}{N} \right)^n (hJ'_3 \bar{\sigma}^{-3} - H) \frac{\partial C}{\partial B} \right\}_{\sigma \rightarrow \tilde{\sigma}} , \quad (30)$$

式中

$$\frac{\partial C}{\partial B} = -\frac{C_0}{2a} \frac{\text{sign}(\omega)}{1 - \omega} . \quad (31)$$

$$\dot{\Omega} = -\dot{\epsilon}_{kl}^p \frac{\chi_{dkl}}{\bar{\chi}} + \left\{ \lambda \left(\frac{G}{N} \right)^n \frac{\partial G}{\partial \varphi} - \frac{\partial \varphi(\bar{\chi})}{\partial \bar{\chi}} \right\}_{\sigma \rightarrow \tilde{\sigma}} , \quad (32)$$

式中

$$\frac{\partial G}{\partial \varphi} = J_3' \bar{\sigma}^{-3} \frac{\partial h}{\partial \varphi} - \frac{\partial H}{\partial \varphi}, \quad (33)$$

χ_{dkl} 为 χ 的偏张量的分量.

在蠕变经历一段时间后, 随动硬化内应力便完全松弛. 故(32)式中未计人 $F_2(\bar{\chi})$ 一项对颗粒定向因子 Ω 的影响.

5 单向压缩情形的分析计算, 同实验结果的比较

对于单向压缩情形 ($\sigma_{33} = -\sigma$, 其余 $\sigma_{kl} = 0$), (27) ~ (33) 式退化到一维损伤演化方程

$$\dot{\varepsilon}^p = -\lambda(1-\alpha) \left\{ \frac{1}{N} [(1-\alpha)(\sigma - \chi) - \alpha\pi - T_c] \right\}^n \quad (34)$$

式中

$$T_c = \frac{6C_0 \cos \varphi}{3 - \sin \varphi} (1 - \omega) \frac{\xi_0^{(i)}}{b+1} \left(\frac{\xi^{(i)}}{\xi_0^{(i)}} \right)^{b+1}. \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \dot{\xi}^{(i)} &= \dot{\varepsilon}^p \left\{ \frac{\alpha}{1-\alpha} + \frac{1}{1-\alpha} \left(\frac{2}{27} \frac{\partial h}{\partial \xi^{(i)}} + \frac{\partial H}{\partial \xi^{(i)}} \right) \frac{\partial \xi^{(i)}}{\partial \pi} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{1-\alpha} \left(\frac{2}{27} \frac{\partial h}{\partial \omega} + \frac{\partial H}{\partial \omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial \pi} \right\}, \end{aligned} \quad (36)$$

式中 $\frac{\partial h}{\partial \xi^{(i)}}$, $\frac{\partial H}{\partial \xi^{(i)}}$, $\frac{\partial h}{\partial \omega}$ 及 $\frac{\partial H}{\partial \omega}$ 的表达式仍为(29)式, $\pi(\xi^{(i)}, \omega)$ 的具体表达式待定.

$$\left. \begin{aligned} |\dot{\omega}| &= -T_c \frac{\dot{\varepsilon}^p}{1-\omega}, (\dot{\varepsilon}^p < 0), \\ T_c &= \frac{3C_0}{a(1-\alpha)} \frac{\cos \varphi}{3 - \sin \varphi}. \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} \dot{\Omega} &= -\dot{\varepsilon}^p \left(\frac{2}{3} - \frac{1}{1-\alpha} \right) \frac{\partial G}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial \chi}, \\ \frac{\partial G}{\partial \varphi} &= -6C \frac{1 - 3\sin \varphi}{(3 - \sin \varphi)^2}, \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

$\varphi = \varphi(\chi)$ 的具体表达式待定.

5.1 ω 等的具体演化过程

由于以上诸演化方程中损伤内变量之间的相互耦合, 直接求解十分困难. 为简化计算, 我们将冻土的非衰减蠕变按通常认识划分为 5 个阶段(见图 2). 每一蠕变阶段用一简单函数 $\varepsilon = \varepsilon(t)$ 来拟合, 然后在 $\varepsilon = \varepsilon(t)$ 函数形式已知的情况下, 分析 ω 的具体演化规律.

在相对瞬时变形阶段, 响应是完全弹性的, 即

$$\varepsilon = \varepsilon^e = -\frac{\sigma}{E}, \quad (39)$$

式中 E 为冻土的弹性模量.

在以下的分析中, 还假定每一阶段的内摩擦角 φ 保持不变, 但不同阶段的 φ 可不相同.

(1) 不稳定蠕变阶段(图 2 中的 AB):

设 $-\varepsilon^p = C_1 - C_2(t - t^*)^2, \quad (0 \leq t \leq t_1 \leq t^*), \quad (40)$

$$\varphi = \varphi_1 = \text{const}, \quad (41)$$

t^* 的意义后面给出, $C_1, C_2 > 0$ 为常数. 因 $t=0$ 时, $\varepsilon^p=0$, 故 $C_1=C_2t^{*2}$. 将 (40), (41) 式代入 (37) 式, 并积分得

$(1-\omega)^2 - (1-\omega_0)^2 = -2C_2T'_C(\varphi_1)(t^2 - 2t^*t), \quad (42)$
式中, ω_0 表示初始面积损伤因子. 由上式知在不稳定蠕变阶段 ω 是随时间减小的, 说明冻土微结构在此阶段出现被压密的“强化”现象.

(2) 稳定蠕变阶段(图 2 中的 BC):

设 $-\varepsilon^p = C_3t + C_4, \quad (t_1 \leq t \leq t_2), \quad (43)$

$$\varphi = \varphi_2 = \text{const}, \quad (44)$$

类似地推导可得

$$(1-\omega)^2 - (1-\omega_1)^2 = -2C_3T'_C(\varphi_2)(t - t_1), \quad (45)$$

式中 $\omega_1 = \omega(t_1)$.

$$|\dot{\varepsilon}^p| = C_3 = \left(\frac{\sigma - \sigma_0}{N_1} \right)^n, \quad (46)$$

式中

$$N_1 = \frac{N}{1-\alpha} \left(\frac{1}{\lambda(1-\alpha)} \right)^{1/2n}. \quad (47)$$

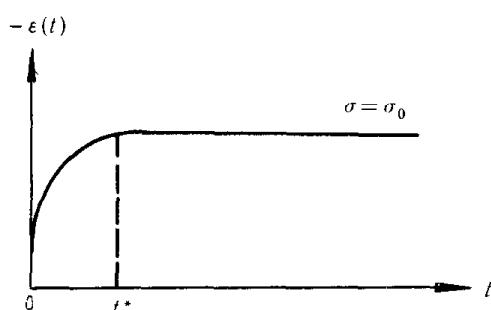


图 3 屈服极限应力下的蠕变曲线

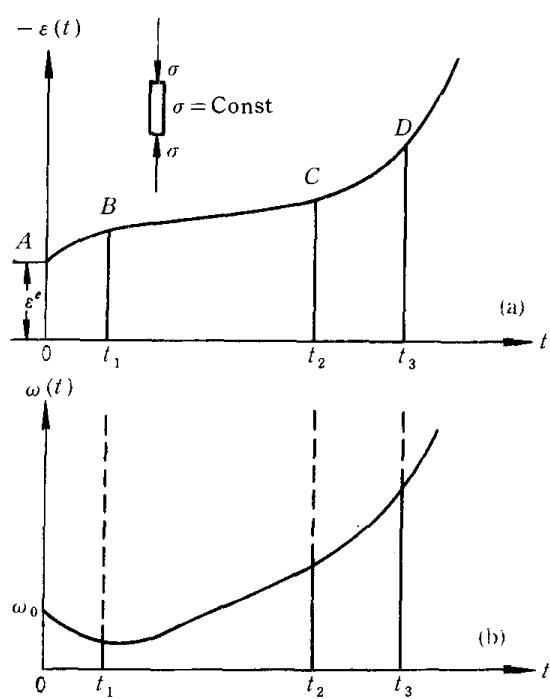


图 2 冻土蠕变曲线(a)和相应的损伤因子 ω 的演化规律(b)

方程 (46) 就是熟知的 Bingham-Щедров 方程, 该方程对冻土和冰蠕变的稳定流阶段的适应性已被一些直接实验结果所证实^[5].

由 (46) 式知, 当 $\sigma = \sigma_0$ 时, $C_3 = 0$, 蠕变将是衰减的. 当 $\sigma > \sigma_0$ 时, $C_3 > 0$, 蠕变将是非衰减的, 故 σ_0 就是冻土的长期强度极限. 我们将 t^* 定义为当施加长期强度极限应力 σ_0 时, 塑性蠕变应变速率减小到零的最短时间. 对于一定温度和一定土质的冻土来说, σ_0 和 t^* 均为常数(图 3).

(3) 漸近流阶段(图 2 中的 CD):

$$-\varepsilon^p = C_5 t^2 + C_6 \quad (t_2 \leq t \leq t_3), \quad (48)$$

$$\varphi = \varphi_3 = \text{const}, \quad (49)$$

$$(1 - \omega)^2 - (1 - \omega_2)^2 = -2C_5 T'_c (\varphi_3) (t^2 - t_2^2), \quad (50)$$

式中 $\omega_2 = \omega(t_2)$.

(4) 崩溃性发展阶段(图 2 中的 DE):

$$-\varepsilon^p = C_7 t^4 + C_8 \quad (t \geq t_3), \quad (51)$$

$$\varphi = \varphi_4 = \text{const}. \quad (52)$$

$$(1 - \omega)^2 - (1 - \omega_3)^2 = -2C_7 T'_c (\varphi_4) (t^4 - t_3^4), \quad (53)$$

式中 $\omega_3 = \omega(t_3)$.

考虑到蠕变曲线的光滑性, 各阶段在过渡点 t_i ($i=1, 2, 3$) 应满足如下的连续性条件:

$$\varepsilon^p(t_i^+) = \varepsilon^p(t_i^-), \quad (54)$$

$$\dot{\varepsilon}^p(t_i^+) = \dot{\varepsilon}^p(t_i^-), \quad (i=1, 2, 3). \quad (55)$$

在冻土非衰减蠕变的整个过程中, $\omega(t)$ 的变化如图 2 中曲线所示. 它反映了冻土中微裂隙及微孔洞的萌生与扩展的发展趋势.

5.2 冻土的材料(物性)常数 Δ_i ($i=1, 2, 3$)

冻土蠕变过程中由一个阶段转入另一个阶段时的 $\omega_i = \omega(t_i)$ ($i=1, 2, 3$) 仅由温度和土质决定, 与所受载荷等外部条件无关. 即 $\omega_i = \omega(t_i) = \text{const}$. 将此分别代入 (42), (45) 和 (50) 式得

$$C_2(t_1^2 - 2t^* t_1) = \Delta_1, \quad (56)$$

$$C_3(t_2 - t_1) = \Delta_2, \quad (57)$$

$$C_5(t_3^2 - t_2^2) = \Delta_3, \quad (58)$$

式中 Δ_i ($i=1, 2, 3$) 也是仅与温度有关的物性常数. (56), (57) 和 (58) 式就是蠕变各阶段过渡的判据. Δ_i 的绝对值分别表示在不稳定蠕变阶段、稳定蠕变阶段及渐近流阶段塑性应变的增量, 因其容易由一条实验曲线测定, 故选择其为新的冻土材料常数.

5.3 冻土的长期强度方程

将 (46) 式代入 (57) 式, 并记 $t_2 = t_p$, 则得冻土长期强度方程

$$\sigma = \sigma_0 + N_1 \left(\frac{\Delta_2}{t_p - t_1} \right)^{1/n}. \quad (59)$$

若令 $\sigma_0 = 0$, $t_1 = 0$, $1/n = \alpha$, $N_1 \Delta_2 = T^*$, 并记 $t_p = T^p$, 则上式退化为熟知的维亚诺夫长期强度方程^[3]

$$\sigma = \left(\frac{T^p}{T^*} \right)^{-\alpha}, \quad (60)$$

此方程已在冻土工程中广泛应用.

5.4 蠕变过程的理论预测, 同实验结果的比较

冻土的材料常数 Δ_i ($i=1, 2, 3$) 及 t^* 可通过一条完整的(包含5个阶段的)非衰减蠕变实验曲线确定. 而 (46) 式中的常数 N_1 , n 及 σ_0 则需要通过不同载荷水平的 3 个蠕变实验确定. 一旦确定了上述材料常数, 便可预测任何载荷水平下的蠕变规律.

图4和图5给出了 -5°C 条件下不同载荷水平的单轴压缩蠕变实验曲线同理论曲线的比较,不难发现两者之间具有良好一致性.

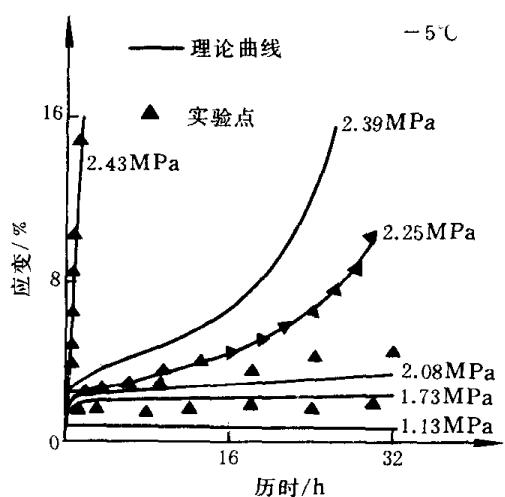


图4 -5°C 温度下理论曲线与实验曲线比较

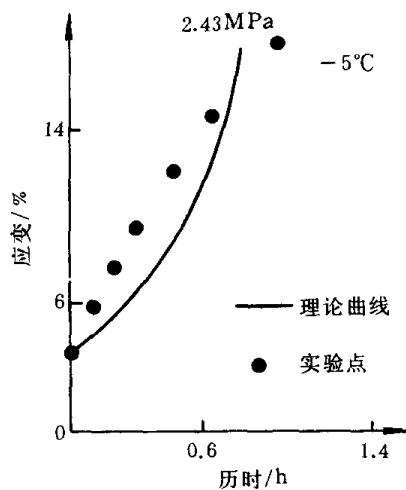


图5 图4中 2.43 MPa 曲线时间放大图

本文是应用损伤力学理论探讨冻土力学问题的一个初步尝试.今后在实验方面尚需完善观测手段,寻找定量观测冻土微结构的方法.并以此为基础深入理论研究,搞清冻土蠕变的细观机理,完善和发展宏观与微观相结合的冻土力学模型,以便能更加准确的预测冻土长期强度和蠕变规律.

参 考 文 献

- 1 Tsytovich N A. Permafrost as a base structures, material of the permanent commision for the study of the nature productive force of the USSR. Moscow: Academy of Science Press, 1930
- 2 ACFEL. Investigation of description classification and strength properties of frozen soils. Technical report 40. AD721745 and AD721746. 1952
- 3 维亚诺夫 C C. 土力学的流变原理. 杜余培译. 北京: 科学出版社, 1987. 322~361
- 4 吴鸿遥. 损伤力学. 北京: 国防工业出版社, 1990. 67~70
- 5 崔托维奇 H A. 冻土力学. 张长庆, 朱元林译. 北京: 科学出版社, 1985. 119~127