

I-6

照射スウェリングの数値解法

法政大学計算センター 正会員 武田 洋

法政大学工学部土木工学科 正会員 前田 重行

1. まえがき

核融合炉等の開発にともなう、中性子照射を受ける機器の材料挙動に関する研究の重要性が増大している。まずスウェリングと密接な関係のある体積変化とひずみの定義に関する基本的考察を行う。続いて一般的なクリープ及びスウェリングの連成型構成方程式に対する陰的スキームを提案する。なお非弾性構成方程式に関しては、ひずみの加算的分解を仮定する連続対塑性論に則るものとする。解析例は、Bates 等により提案されている応力依存型のスウェリング構成方程式を拡張した構成方程式により単軸問題の解析を行うことにする。

2. 体積変化とひずみの定義

大ひずみ領域までを考慮した場合、有限要素定式の基本 $\int \delta (d_{ij}) \sigma_{ij} dV = \int \delta (v_i) p_i dS$ (1)
弱形式としては、仮想速度の原理を用いる場合が多い。こ $\delta d_{ij} = 1/2 (\partial \delta v_i / \partial x_j + \partial \delta v_j / \partial x_i)$ (2)
こで V, S は変形後の形状における体積と表面積、 σ_{ij} は $d = v/l$ (3)
Cauchy 応力、 p_i は表面力、 δd_{ij} は速度場 δv_i に対する変形速度であり、式(2)で定義される。変形速度とひずみの関係を明確にするために、単軸状態を考えると、変形速度は式(3)で表せる。ここで l は変形後の長さである。式(3)を時間について積分することにより、式(4)の関係が得ら $d dt = v dt / l = du / l = dl / l = d \epsilon^L$ (4)
れる。ここで du は変位の微小増分、 $d \epsilon^L$ は対数ひずみの微小 $\epsilon^L = \int d \epsilon^L = \int dl / l = \log l / l_0$ (5)
増分である。なお対数ひずみ ϵ^L は式(5)によって定義される。ここで l_0 は変形後の長さである。以上を考慮に入れると、式(1)を基本とする有限要素定式の場合には、変形速度に対するスウェリングの影響 d^s_{ij} は式(6)のようになる。ここで Δ_{ij} はクロネッカーのデルタ記号であり、 $\dot{\epsilon}^s$ は相当スウェリングひずみ速度であり、式(7)によって表させる。ここで V は変形後の体積、 t は時間である。なお相当 $d^s_{ij} = \Delta_{ij} \dot{\epsilon}^s$ (6)
スウェリングひずみは式(8)を用いて表せる。 $\dot{\epsilon}^s = (1/V)(dV/dt)$ (7) $\epsilon^s = \int \dot{\epsilon}^s = \int dV/V$ (8)

3. 照射スウェリング

照射スウェリングに対する構成方程式としては、式(9)に示すように体積変化 S に対する関数として与えられる場合が多い。ここで、 $\bar{\epsilon}^0$ は相当クリープひずみ、 σ_H は平均直応力、 $S = f(\bar{\epsilon}^0, \bar{\epsilon}^s, \sigma_H, \sigma, T, \phi, t)$ (9)
 σ は相当応力、 T は温度、 ϕ は中性子束であり、体積変化 S の定義は式 $S = (V - V_0)/V_0$ (10)
(10)の通りである。ここで V_0 は変形前の体積である。式(7)より相当スウェリングひずみ速度を体積変化を用いて表すと式(11)のようになる。式(9)、(11)より $\dot{\epsilon}^s = (1/V)(dV/dt) = (1/(1+S)) (dS/dt)$ (11)
相当スウェリングひずみに関する一般式としては、 $\dot{\epsilon}^s = g(\bar{\epsilon}^0, \bar{\epsilon}^s, \sigma_H, \sigma, T, \phi, t)$ (12)
式(12)のようになる。上式の増分形式を考えると次のようになる。

$$\Delta \bar{\epsilon}^s = (\partial g / \partial \bar{\epsilon}^0) \Delta \bar{\epsilon}^0 + (\partial g / \partial \bar{\epsilon}^s) \Delta \bar{\epsilon}^s + (\partial g / \partial \sigma_H) \Delta \sigma_H + (\partial g / \partial \sigma) \Delta \sigma + (\partial g / \partial T) \Delta T + (\partial g / \partial \phi) \Delta \phi + (\partial g / \partial t) \Delta t \quad (13)$$

4. 照射スウェリングを考慮した陰的応力-ひずみ関係

式(13)より、スウェリングひずみ増分は式 $([I] - [S^s]) \Delta \{ \epsilon^s \}$
(14)のように表すことが出来る。ここで $\Delta \{ \epsilon^s \} = \Delta \{ \epsilon^0 \} + [S^c] \Delta \{ \epsilon^c \} + [S^*] \Delta \{ \sigma \}$ (14)
 ϵ^s は陰的スキームに寄与しない項であり、 $([I] - [C^c]) \Delta \{ \epsilon^c \}$
式(13)の $\Delta T, \Delta \phi, \Delta t$ から導かれるのもので $\Delta \{ \epsilon^c \} = [C^s] \Delta \{ \epsilon^s \} + [C^*] \Delta \{ \sigma \}$ (15)
ある。クリープひずみについても同様に考え $\begin{bmatrix} C & -C^s \\ S^c & -S^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \{ \epsilon^c \} \\ \Delta \{ \epsilon^s \} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \{ \epsilon^c \} \\ \Delta \{ \epsilon^s \} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C^* \\ S^* \end{bmatrix} \Delta \{ \sigma \}$ (16)
とめて表すと式(16)のようになる。

従って式(16)より、式(17)のように表すことが出来る。応力-ひずみ関係は、熱ひずみを無視すると式(18)のように表せる。ここで添字[°]は弾塑性成分を意味する。式(18)に式(17)を代入することにより式(19)が得られる。式(19)を応力について整理すると式(20)のようになる。最終的に式(21)の応力ひずみ構成方程式が得られる。

$$\Delta\{\epsilon^{CS}\} = \Delta\{\epsilon^C\} + \Delta\{\epsilon^S\}$$

$$= [A^*] \Delta\{\epsilon^{CS}\} + [A^*] \Delta\{\sigma\} \quad (17)$$

$$\Delta\{\sigma\} = [D^{°P}] \Delta\{\epsilon^{°P}\}$$

$$= [D^{°P}] (\Delta\{\epsilon\} - \Delta\{\epsilon^{CS}\}) \quad (18)$$

$$\Delta\{\sigma\} = [D^{°P}] (\Delta\{\epsilon\} - [A^*] \Delta\{\epsilon^{CS}\} - [A^*] \Delta\{\sigma\}) \quad (19)$$

$$([I] + [D^{°P}][A^*]) \Delta\{\sigma\} = [D^{°P}] (\Delta\{\epsilon\} - [A^*] \Delta\{\epsilon^{CS}\}) \quad (20)$$

$$\Delta\{\sigma\} = ([D^{°P}]^{-1} + [A^*]^{-1})^{-1} (\Delta\{\epsilon\} - [A^*] \Delta\{\epsilon^{CS}\}) \quad (21)$$

$$\bar{\epsilon}^S = \bar{\epsilon}^S_0 f^d \quad (22) \quad \bar{\epsilon}^S_0 = A(\phi t / 10^{26})^B \exp(C) \quad (23)$$

$$A = \alpha_1(T - \alpha_2) \quad (24) \quad C = \alpha_8 + \alpha_9 T + \alpha_{10}/T \quad (25)$$

$$B = \alpha_3 + \alpha_5 / (T - \alpha_4) + \alpha_7 / (T - \alpha_6)^2 \quad (26)$$

$$\alpha_1 = 1 \times 10^{-12} \quad \alpha_2 = 40 \quad \alpha_3 = 2.05 \quad \alpha_4 = 623.0 \quad \alpha_5 = -27.0$$

$$\alpha_6 = 623.0 \quad \alpha_7 = 78.0 \quad \alpha_8 = 32.6 \quad \alpha_9 = -0.015 \quad \alpha_{10} = -5100$$

5. 修正Bates構成方程式に対する考察

スウェリング効果に対する応力の依存性を考慮した構成方程式としてはBatesとGilbertによって提案されているものがある。ここではその方程式を若干拡張し、式(22)のスウェリング構成方程式を用いることにする。ここで $\bar{\epsilon}^S$ は相当スウェリングひずみ、 $\bar{\epsilon}^S_0$ は無応力状態に対する相当スウェリングひずみ、 f^d は応力依存係数である。無応力状態に対する相当スウェリングひずみとしては式(23)を仮定する。ここで ϕ は中性子束(n/m²SEC)であり、係数A、B、C及び定数 α_i ($i=1 \sim 10$)は上の通りである。相当スウェリングひずみに対する応力依存係数としては式(27)を仮定する。

$$\text{ここで } \sigma_H \text{ は静水圧応力, } \sigma_P \text{ は最大スウェリ} \quad f^d = 1 + p[\sigma_H + \beta \log(\sigma_H / \sigma_P)] + \beta(1/\sigma_H - 1/\sigma_P) \quad (27)$$

$$\text{ングに対する応力, 定数 } p, \beta \text{ は次の通りであ} \quad \bar{\epsilon}^S = \bar{\epsilon}^S_0(t) f^d(\sigma_H) \quad (28)$$

$$\text{る。} P = 0.024 \text{ MPa}^{-1}, \beta = 350 \text{ MPa} (\sigma_H > \sigma_P) \text{。式} \quad \Delta \bar{\epsilon}^S = (\partial \bar{\epsilon}^S_0 / \partial t) f^d \Delta t + \bar{\epsilon}^S_0 (\partial f^d / \partial \sigma_H) \Delta \sigma_H \quad (29)$$

$$(22) \text{ の増分形式を考えるために, 式(22)を式} \quad \partial \bar{\epsilon}^S_0 / \partial t = A B \phi / 10^{26} (\phi t)^{B-1} \exp(C) \quad (30)$$

$$(28) \text{ のようにおく。式(28)の増分を考えると,} \quad \partial f^d / \partial \sigma_H = p(1 - \beta / \sigma_H) - \beta / \sigma_H^2 \quad (31)$$

式(29)のようになる。式(23), (27)より式(30), (31)次のようになる。スウェリングひずみ(%)

6. 解析例題

ここでは単軸問題を考える。2荷重履歴としては、2種類の中性子照射を考え、中性子照射後に先端に集中荷重を作用させるものとする。中性子照射の量は、 $\phi = 0.7 \times 10^{19}$ (n/m²SEC)の中性子束と、 $\phi = 1.0 \times 10^{19}$ (n/m²SEC)の中性子束を100日間照射する場合である。なお中性子照射後の作用荷重は300MNとする。最大スウェリングに対する応力 σ_P は、 $\phi = 0.7 \times 10^{19}$ (n/m²SEC)の場合には $\sigma_P = 100$ MPaとし $\phi = 1.0 \times 10^{19}$ (n/m²SEC)の場合には $\sigma_P = 130$ MPaとする。図1に解析結果を示すが、図よりここでのアルゴリズムを用いることにより、応力に依存するスウェリング効果の現象を数値的に解析できることが検証された。

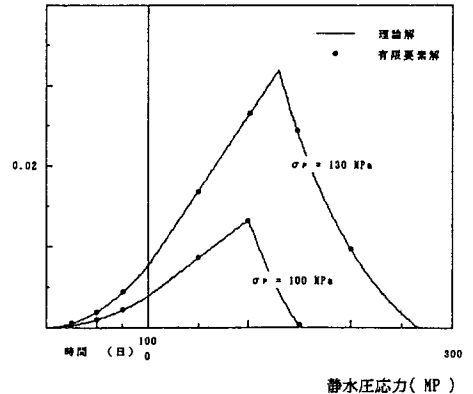


図-1 解析結果

7. あとがき

ここでは応力依存型のスウェリング構成方程式を用いて、有限要素法等の数値解析を行う場合のアルゴリズムについて考察し、例題を用いてその検証を行った。今後の課題としては、実際の核融合炉機器コンポーネント等の複雑な問題に対する応用を通してこのアルゴリズムの効率及び健全性に対する研究が残されている。

【参考文献】 1) J.F.Bates and E.R.Gilbert: Experimental Evidence for Stress Enhanced Swelling, Journal of Nuclear Materials 59, pp.95-102, 1976 2) 武田 洋: 非線型問題における数値解法の基礎, 構造工学における有限要素法の理論と応用, 日本鋼構造協会, 1984